

# Abschlussbericht BWPLUS

## Konzeptionierung einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur im Gewerbe- und Industriepark Hochdorf in Freiburg (GIP\_H2ochdorf)

von

M. Sc. Tobias Nusser  
M. Sc. Andreas Theophil

EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH

Förderkennzeichen: BWRWK24107

Laufzeit: 01.06.24 – 30.11.24

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

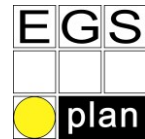
November 2024



## Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

*Ingenieure aus  
Leidenschaft*



Auftraggeber

Stadt Freiburg  
Umweltschutzamt  
Fehrenbachallee 12  
79106 Freiburg

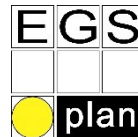
Jana Strecker  
Dirk Kron

Auftragnehmer

EGS-plan Ingenieurgesellschaft für  
Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH  
Gropiusplatz 10  
70563 Stuttgart  
Web: [www.egs-plan.de](http://www.egs-plan.de)  
Tel. +49 711 99 007 - 5

M.Sc. Tobias Nusser  
M.Sc. Andreas Theophil

*Ingenieure aus  
Leidenschaft*



## Kurzfassung

Das Projekt „Grüner Wasserstoff im GIP Hochdorf“ widmet sich der Entwicklung eines Konzeptes für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Gewerbe- und Industriepark Hochdorf in Freiburg. Das Vorhaben ist Bestandteil des Förderprogramms „Regionale Wasserstoffkonzepte“ (RWK) des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.

Ein wichtiger Bestandteil der Machbarkeitsstudie ist die Analyse des Wasserstoffbedarfs der ansässigen Unternehmen im Gewerbe- und Industriepark (GIP) Hochdorf. Über eine Marktbefragung sind Logistikunternehmen wie die Streck Transportgesellschaft mbH und Götz-Transport GmbH dabei als Schlüsselkunden identifiziert worden. Der in den Szenarien ermittelte perspektivische Wasserstoffbedarf für den Betrieb von LKWs wird auf bis zu 1.300 Tonnen pro Jahr geschätzt.

Auf Basis der potenziellen Bedarfsmengen ist eine Wasserstoffinfrastruktur konzipiert worden. Diese sieht den Aufbau einer Wasserstofftankstelle mit einer Kapazität von bis zu 38 LKW-Betankungen pro Tag vor. Zusätzlich ist die Installation eines Elektrolyseurs mit einer Leistung von rund 5 MW<sub>el</sub> vorgesehen. Dieses System ermöglicht es, grünen Wasserstoff direkt vor Ort aus Strom von erneuerbaren Energien zu erzeugen. Zur Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch werden Speicherlösungen eingeplant, die eine kontinuierliche Versorgung auch bei schwankendem Bedarf gewährleisten. Parallel dazu wurde die Möglichkeit einer Anbindung an das regionale Wasserstoffnetz untersucht. Die erste H<sub>2</sub>-Leitung soll ab 2029 durch das „RHYn Interco“-Projekt verfügbar sein und bietet eine langfristige Versorgungsperspektive.

Durch ein modulares Anlagendesign können die Kapazitäten der Erzeugungs- und Betankungsanlagen flexibel an zukünftige Anforderungen angepasst werden. Zusätzlich wird die Sektorenkopplung, wie etwa durch Nutzung von Abwärme und die Einbindung bestehender Photovoltaikanlagen im Gewerbegebiet, vorangetrieben. Diese Maßnahmen dienen als Beitrag zum Klimaschutz und der regionalen Wertschöpfung, da lokale Unternehmen und gegebenenfalls auch Bürger sich aktiv an dieser Wasserstoffwirtschaft beteiligen sollen.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit ergab, dass ein niedriger Strompreis bei hoher Auslastung des Elektrolyseurs entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist. Ebenso ist die Einbeziehung von Fördermitteln und die Möglichkeit, Abwärme zu vermarkten ein Schlüssel für einen effizienten Betrieb. Grundsätzlich sind wettbewerbsfähige Wasserstoffkosten mit der lokalen Produktion erkannt worden.

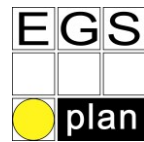
**Das zentrale Ergebnis der Machbarkeitsstudie ist eine technisch funktionierende Konzeption für die Wasserstoffinfrastruktur bestehend aus Betankungsanlage und Wasserstofferzeugung auf einem Grundstück im GIP Hochdorf. Ein wirtschaftlich tragfähiges Betreibermodell wird bei der Vermarktung des grünen Wasserstoffs über die Tankstelle im Bereich des Schwerlastverkehrs erwartet.**

Mit Abschluss der Machbarkeitsstudie rückt nun die Zusammenstellung eines Kernteams williger Akteure für die weitere Koordination und Projektentwicklung in den Fokus. Besonderes Augenmerk liegt dabei auch auf der notwendigen Aktivierung von Fördermitteln für die Planung und Umsetzung dieses Wasserstoff-Modellprojektes.

## Inhalt

Kurzfassung.....	iii
Inhalt.....	iv
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	vii
Abkürzungsverzeichnis.....	viii
1 Einleitung und Zielsetzung.....	9
1.1 Ausgangssituation.....	9
1.2 Zielstellung.....	10
1.3 Vorgehensweise.....	10
2 Untersuchung lokaler Wasserstoffbedarfe und Analyse des H <sub>2</sub> -Kernetzbaus in der Region.....	12
2.1 H <sub>2</sub> -Marktabfrage im GIP Hochdorf.....	12
2.2 Analyse des H <sub>2</sub> -Kernetzbaus für die Region Freiburg.....	13
2.3 Analyse Wärmenetzausbau und Masterplan-Wärme der Stadt Freiburg ...	16
2.4 PV-Erzeugungspotenziale und Stromnetzkapazitäten.....	17
2.5 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen für den GIP Hochdorf.....	17
3 Simulation und Grobauslegung der H <sub>2</sub> -Anlage inkl. Abwärmenutzung.....	19
3.1 Ableitung der Versorgungsansätze.....	19
3.2 Konzeptionierung der Wasserstoffinfrastruktur.....	22
3.3 Entwicklung eines Anlagenlayouts und nötiger Flächenbedarfe.....	26
3.4 Genehmigungsrechtliche Aspekte.....	27
4 Entwicklung eines Geschäfts- und Betreibermodells.....	29
4.1 Analyse potenzieller Rollen und Aufgaben.....	29
4.2 Beschaffungsoptionen für erneuerbaren Strom.....	30
4.3 Ermittlung der Investitionskosten und wirtschaftlichen Kennzahlen im Betrieb	33
5 Vorbereitung der Umsetzungsphase.....	38
5.1 Identifizierung eines Projektteams für die Umsetzungsphase.....	38
5.2 Zeitlicher Ablauf der nächsten Schritte zur Umsetzung des Vorhabens.....	39
6 Stakeholder Einbindung.....	40
6.1 Workshop mit den lokalen Akteuren im GIP Hochdorf.....	40
6.2 Zusammenfassung weiterer Gespräche im Rahmen der Machbarkeitsstudie	43
7 Fazit.....	45
Literaturverzeichnis.....	46
Anhang.....	A

*Ingenieure aus  
Leidenschaft*



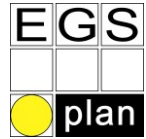
Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsrechnung..... A  
Teilnehmerliste des Workshops..... B

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des GIP Hochdorf in der Stadt Freiburg .....	9
Abbildung 2: Bedarfsszenarien für Wasserstoff im Schwerlastverkehr im GIP Hochdorf .....	13
Abbildung 3: Wasserstoffkernnetz im Zieljahr 2032.....	14
Abbildung 4: Leitungsplan des RHYn-Interco-Projektes bis zum Jahr 2035.....	15
Abbildung 5: Abstrahierter Leitungsverlauf im Netzgebiet der badenovaNETZE zum Anschluss von Freiburg an das Wasserstoffnetz bis 2029 .....	15
Abbildung 6: Ausbauplanung des Wärmeverbund-Freiburg West.....	16
Abbildung 7: Tanklastprofil aus bisherigen Betriebserfahrungen.....	19
Abbildung 8: Versorgungsvarianten der Wasserstofftankstelle im GIP Hochdorf .....	20
Abbildung 9: Lastverlauf Bedarf und Erzeugung von Wasserstoff der Variante Eigenversorgung im mittleren Bedarfsszenario .....	20
Abbildung 10: Lastverlauf Bedarf und Erzeugung von Wasserstoff der Variante Mischversorgung im mittleren Bedarfsszenario .....	21
Abbildung 11: Energieflussdiagramm der Variante Mischversorgung im mittleren Bedarfsszenario.....	22
Abbildung 12: Schrittweiser Aufbau der modularen Infrastruktur bis 2035 .....	25
Abbildung 13: Konzept für Anlagenlayout in modularer Bauweise .....	27
Abbildung 14: Anwendungsbedingungen der Genehmigungsverfahren für Wasserstoffanlagen.....	28
Abbildung 15: Strombezugsanforderungen für die grüne Wasserstoffherzeugung.....	31
Abbildung 16: Investitionskosten (netto).....	34
Abbildung 17: Jahresgesamtkosten (netto) .....	35
Abbildung 18: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse verschiedener Einflüsse auf den Brutto-Verkaufspreis des erzeugten Wasserstoffs.....	36

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Dimensionierungsgrößen für die Variante Mischversorgung mit den Bedarfswerten von 2030 .....	21
Tabelle 2: Schrittweiser Ausbau der Tankstellenkomponenten bis 2035.....	24
Tabelle 3: Randbedingungen Wirtschaftlichkeitsrechnung .....	33
Tabelle 4: Wasserstoffverkaufspreis nach Sensitivitäten (Obergrenzen, Bruttopreise) .....	37
Tabelle 5: Darstellung eines möglichen Kernteams zur Umsetzung der Wasserstofftankstelle im GIP Hochdorf .....	38
Tabelle 6: Übersicht der erweiterten Akteure, die im Umfeld der Umsetzung einbezogen werden sollten .....	39
Tabelle 7: Annahmen der Kosten und Preise für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.. A	
Tabelle 8: Investitionskostenansatz der Hauptkomponenten.....	A



## Abkürzungsverzeichnis

- BEV Batterieelektrisches Fahrzeug
- BEW Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
- EE Erneuerbare Energie
- FCEV Brennstoffzellenfahrzeug
- GIP Green Industry Park
- MD Mitteldruck
- PPA Power Purchase Agreement
- RWK Regionale Wasserstoffkonzepte



# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Stadt Freiburg strebt bis zum Jahr 2035 die Erreichung der Klimaneutralität an. Die Dekarbonisierung aller Verbrauchssektoren und die Beschleunigung der lokalen Energiewende sind zentrale Herausforderungen, mit denen sich das Umweltschutzamt konkret im Alltag befasst. Die Gewerbe- und Industriegebiete Nord und Hochdorf in Freiburg werden dabei schrittweise zu Green Industry Parks (GIP) transformiert (<https://greencity.freiburg.de/pb/bausteine/greenindustrypark.html>).

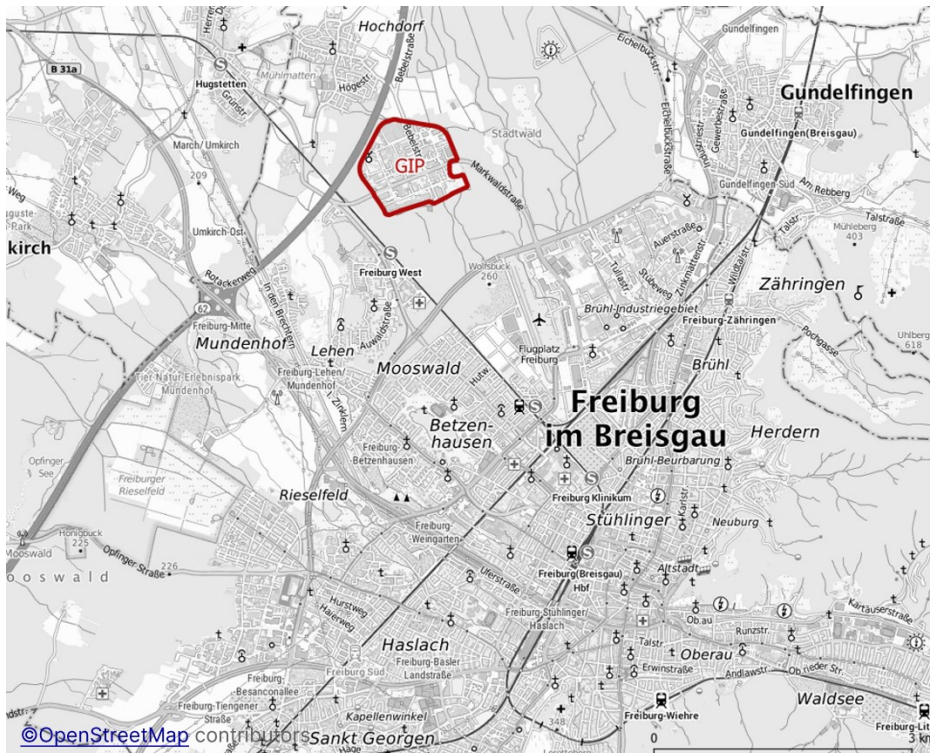


Abbildung 1: Lage des GIP Hochdorf in der Stadt Freiburg

Der GIP Hochdorf (Abbildung 1) ist sehr stark von Unternehmen geprägt, die im Logistikbereich tätig sind. Speziell Speditionen im Bereich der Schwerlast-Logistik haben zur Erfüllung der RED II Anforderungen, in Stufen steigende Bedarfe an grünem  $H_2$  angemeldet. Bisher kommen LKWs zum Einsatz, die u.a. auf der Betriebstankstelle der Firma Streck Transport GmbH mit Diesel betankt werden.

Der Aufbau einer lokalen  $H_2$ -Infrastruktur könnte auf einem freien Grundstück im GIP Hochdorf erfolgen. Die Erzeugung von grünem  $H_2$  und der Aufbau einer Tankstelle könnten helfen, den Wirtschaftsstandort in Hochdorf zu stärken und zukunftsfähig zu machen.

Speziell im Hinblick auf den zukünftigen Anschluss Freiburgs an das überregionale Wasserstoff-Kernnetz kann das Konzept ein attraktiver Baustein einer lokalen Wasserstoffwirtschaft darstellen. Sowohl für eine redundante leitungsgebundene Versorgung als auch die Einspeisung von grünem  $H_2$  in das Kernnetz für die Versorgung von Verbrauchern außerhalb des GIP Hochdorf.

## 1.2 Zielstellung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Konzeptes zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur im Green Industry Park (GIP) Hochdorf in Freiburg.

Mit der Konzeptentwicklung soll eine standortbezogene Lösung für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und den Aufbau einer Betankungsinfrastruktur auf der Freifläche der Spedition Streck Transport GmbH im GIP Hochdorf erarbeitet werden. Der hierfür erforderliche Strom soll durch Direktabnahme-Verträge aus regionalen Windkraft- und Solaranlagen bezogen werden (Ziel 100 % zur Erfüllung der RED II Anforderungen). Die dabei anfallende Abwärme soll durch die Einspeisung in ein lokales Wärmenetz im GIP Hochdorf oder in das Verbundwärmenetz Freiburg nutzbar gemacht werden und signifikant die Effizienz steigern.

Begleitend zur Konzeptentwicklung wird im Rahmen des Projekts ein Betreiberkonzept erarbeitet, die Genehmigungsfähigkeit bewertet sowie ein Umsetzungsplan für die nächsten Schritte erstellt.

Die frühzeitige Beteiligung und Vernetzung der lokalen Akteure (H<sub>2</sub>-Erzeuger, Tankstellenbetreiber, Speditionen, Wärmenetzbetreiber) soll im Rahmen des Vorhabens durch regelmäßige Workshops und Abstimmungsgespräche Akzeptanz und Verbindlichkeit für die weitere Umsetzung schaffen. Das Ziel besteht darin Angebot und Nachfrage vor Ort zusammenzuführen und ein williges Umsetzungsteam identifizieren zu können.

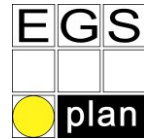
Mit dem Vorhaben soll ein relevanter Beitrag zur Erreichung der Klimaneutralität der Stadt Freiburg im Jahr 2035 als auch der Klimaziele der Unternehmen im GIP Hochdorf geleistet werden. Darüber hinaus soll damit der Industrie- und Logistikstandort GIP Hochdorf gesichert und gestärkt werden. Besonders im Hinblick auf den relativ späten Anschluss der Region Freiburg an das Wasserstoff-Kernnetz (gemäß [www.h2-fuer-bw.de](http://www.h2-fuer-bw.de) ab 2030) sind die dezentralen Wasserstoffprojekte zur frühzeitigen Dekarbonisierung aller Verbrauchssektoren wichtig. Die Erfahrungen aus dem Projekt sollen genutzt werden, um Wissen in die Entwicklung weiterer Projekte in der Region zu transferieren.

## 1.3 Vorgehensweise

Die Machbarkeitsstudie zur Konzeptionierung einer dezentralen Wasserstoffinfrastruktur im Gewerbe- und Industriegebiet Hochdorf in Freiburg wurde im Auftrag der Stadt Freiburg durch die Firma EGS-plan aus Stuttgart erarbeitet. Die Vorgehensweise zur Erarbeitung der Machbarkeitsstudie ist dabei stark darauf ausgerichtet Ergebnisse zu erarbeiten, die für eine mögliche Umsetzung im Anschluss verwertbar sind.

Für die **Grundlagenermittlung** sind zu Beginn die potenziellen Wasserstoffbedarfe im Gewerbegebiet durch eine Marktabfrage eruiert worden. Ebenso wurden die wesentlichen infrastrukturellen Rahmenbedingungen in der Region geprüft. Anschließend erfolgte die **Auslegung der Systemkomponenten** anhand von Simulationen und die Erarbeitung möglicher Konzepte für die Versorgung im Bereich des Schwerlastverkehrs mit grünem Wasserstoff aus lokaler Produktion. In dieser Phase wurde auch der **Workshop mit den lokalen Akteuren** vor Ort durchgeführt, um eine frühzeitige und breite Beteiligung der wesentlichen Akteure zu gewährleisten und die Rückmeldungen im weiteren Projektverlauf berücksichtigen zu können. Aufbauend auf der Anlagenkonzeption für ein Grundstück im GIP Hochdorf ist eine

*Ingenieure aus  
Leidenschaft*



**Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Konzeptes** angestellt und daraus eine Bewertung der Machbarkeit abgeleitet worden. Abschließend und in Vorbereitung der nächsten Umsetzungsschritte wurden erste Gespräche über die Genehmigungsfähigkeit des Konzeptes geführt. Zusätzlich ist ein Vorschlag für ein **Kernteam der wichtigsten Akteure** erarbeitet worden und die erforderlichen **nächsten Schritte für eine Projektumsetzung** wurden aufgezeigt.

## 2 Untersuchung lokaler Wasserstoffbedarfe und Analyse des H<sub>2</sub>-Kernnetzausbau in der Region

### 2.1 H<sub>2</sub>-Marktfrage im GIP Hochdorf

Basierend auf einer bestehenden Marktabfrage aus dem Jahr 2022/23 wurden die lokalen Spediteure im Rahmen der Machbarkeitsstudie erneut kontaktiert, um aktuelle Einschätzungen und Entwicklungen zu erfragen. Die Befragungen fanden in Form von Telefoninterviews oder Online-Meetings statt. Dabei wurden die Anzahl der bestehenden Fahrzeuge und deren typische jährliche Fahrleistung abgefragt, um ein Bedarfsszenario des gesamten Schwerlastfernverkehrs als Ausgangsbasis zu erhalten. Die Befragungen bezogen sich dabei stets auf den Schwerlastverkehr (N3). Leichtere Fahrzeuge blieben aufgrund guter Antriebsoptionen als batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge (BEV) in dieser Studie unberücksichtigt. Darüber hinaus wurden individuelle Bestrebungen und Prognosen über die zukünftige Bedarfsstruktur und voraussichtliche Anteile des Betriebs mit Wasserstoffantrieben erfragt.

Die Ergebnisse zur Bestandssituation ergeben ein klares Bild. Der lokal größte Kraftstoff-Bedarf im GIP Hochdorf entfällt auf die Spedition Streck Transport GmbH. Darüber hinaus sind im GIP Hochdorf einzelne weitere Spediteure im Schwerlastverkehr aktiv.

Bezüglich vorhandener Pläne zur Erreichung der Klimaneutralitätsziele der Unternehmen ergab sich ein sehr heterogenes Bild. Die meisten Betriebe sind noch unentschlossen, ob bzw. in welchem Umfang Wasserstoff in ihrem zukünftigen Fuhrpark als Treibstoff zum Einsatz kommen soll. Einzelne Akteure haben sich bereits für eine vollständige Umrüstung auf BEV entschieden. Speziell im Segment der schweren Nutzfahrzeuge im Fernverkehr wird allerdings vornehmlich von einer gemischten Fahrzeugflotte aus BEV und wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen (FCEV) ausgegangen.

Der so ermittelte, aktuelle Gesamtbestand an Schwerlast-LKW im GIP Hochdorf liegt bei 76 Fahrzeugen. Dabei wurden die Fahrzeuge der Spediteure berücksichtigt, die bereits konkrete Absichten zum Einsatz von Wasserstoff in Ihrem Fuhrpark kommuniziert haben. Das beinhaltet die Firma Götz Transport GmbH und die Streck Transportgesellschaft mbH einschließlich der Subunternehmer, die für die ortsansässigen Speditionen fahren.

Unter der Annahme einer vollständigen Umstellung dieser Fahrzeuge auf Wasserstoffantriebe resultiert ein jährlicher Wasserstoffbedarf von rund 1.368 t/a.

Die so ermittelten 76 Fahrzeuge bilden als theoretischer Bedarf das Maximalszenario ab (100 % des Bedarfs werden durch Wasserstoff versorgt). Davon ausgehend wurde ein **Mittel-(50 %) und ein Minimalszenario (30 %)** definiert. Alle Szenarien beinhalten einen kontinuierlichen Bedarfshochlauf beginnend im Jahr 2026 über 2028 bis 2030, siehe Abbildung 2.

Die durchschnittlich erwarteten Absatzzahlen neuer Nutzfahrzeuge der Gruppe N3 mit Wasserstoffantrieb liegen im Jahr 2030 nach Untersuchungen der NOW-GmbH (NOW 2023) für Deutschland bei 17,2 % der gesamten Neuzulassungen. Unter der Annahme eines frühen Aufbaus der nötigen Infrastruktur und der Umstellung einzelner Fahrzeuge der Akteure vor Ort auf Wasserstoff wird das Minimalszenario als realistische Planungsgrundlage innerhalb der vorliegenden Machbarkeitsstudie herangezogen. Mit Blick auf die weitere Entwicklung über 2030 hinaus und unter Berücksichtigung, dass neben den konkret einbezogenen Akteuren auch eine

zusätzliche Marktnachfrage (bisher unentschlossene Betriebe, Privatfahrzeuge, Nutzfahrzeuge außerhalb der Schwerlast-LKW, etc.) für die Nutzung einer öffentlichen Tankanlage für Wasserstoff im GIP Hochdorf bestehen wird, wird im Rahmen der Machbarkeitsstudie das Mittel-Szenario als Leitszenario verwendet.

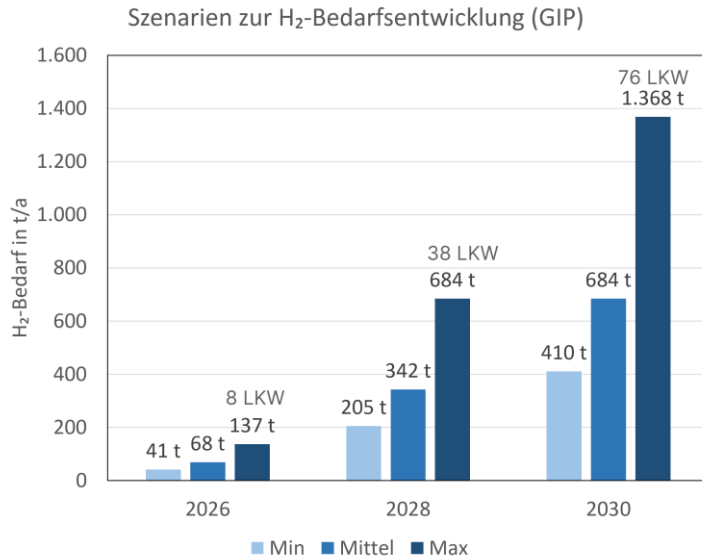


Abbildung 2: Bedarfsszenarien für Wasserstoff im Schwerlastverkehr im GIP Hochdorf

## 2.2 Analyse des H<sub>2</sub>-Kernetzbaus für die Region Freiburg

Die Analyse der nationalen Wasserstoffstrategie zeigt, dass die Region Freiburg zunächst als eigenständiger Teil des deutschen H<sub>2</sub>-Kernetzes entwickelt wird. Dies ist in der Darstellung der am 22.10.2024 genehmigten Ausbauplanungen in Abbildung 3 zu sehen.

## Genehmigtes Wasserstoffkernnetz

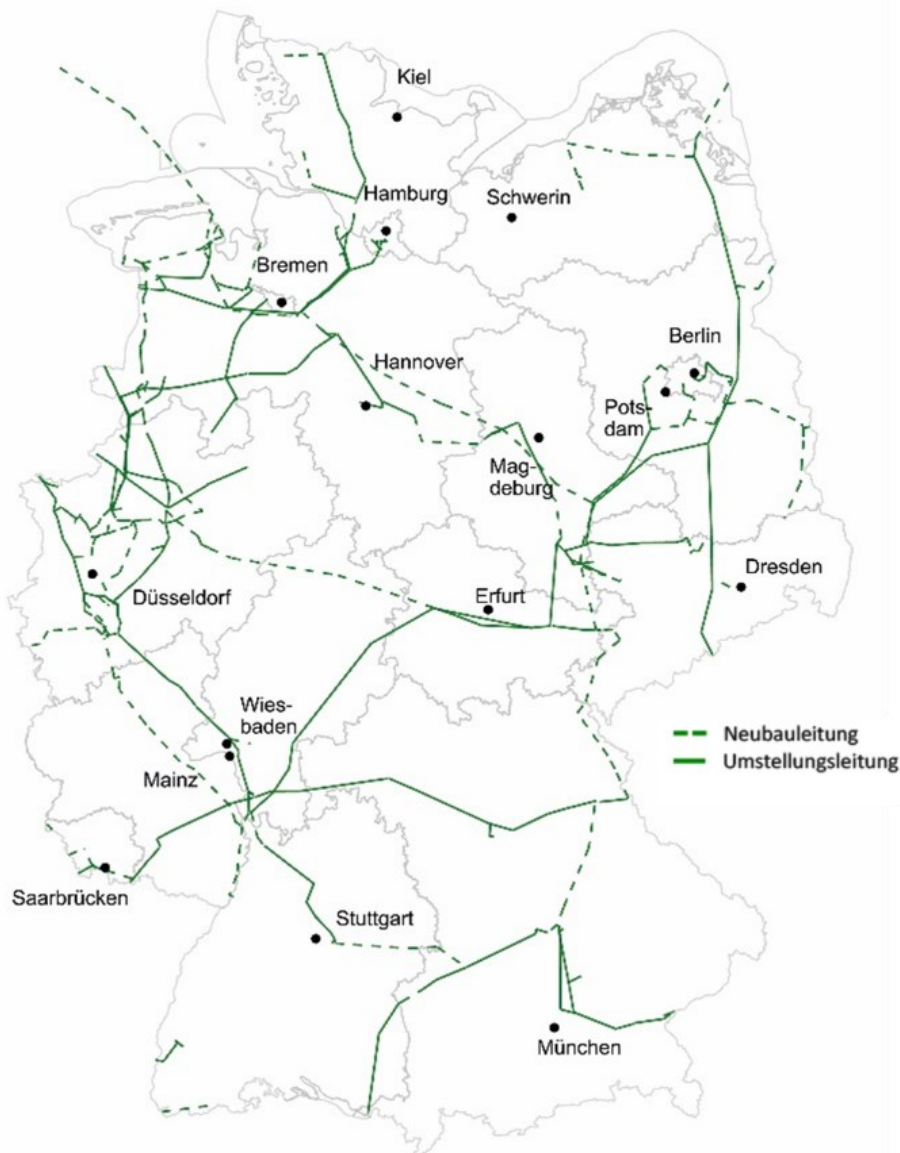


Abbildung 3: Wasserstoffkernnetz im Zieljahr 2032

Quelle: (BNA 2024)

Die Region Freiburg soll zunächst über eine grenzübergreifende Verbindung aus Frankreich erschlossen werden. Im Rahmen des RHYN-Interco-Projektes der terranets bw und badenovaNETZE erfolgt ein schrittweiser Anschluss des südbadischen Raums an den europäischen Wasserstoff-Backbone (vgl. Abbildung 4). Ab 2029 soll planmäßig eine H<sub>2</sub>-Pipeline die ersten Verbraucher in Freiburg mit Wasserstoff aus Frankreich versorgen. Zur Erschließung wird fast vollständig auf die Umwidmung bereits bestehender Erdgasleitungen zurückgegriffen. Die geplante Anschlussleitung verläuft in unmittelbarer Nähe zum GIP Hochdorf. Der abstrahierte Leitungsverlauf ist in Abbildung 5 dargestellt. Eine Anbindung an das H<sub>2</sub>-Netz durch eine neu zu verlegende Anschlussleitung von unter 1.000 m Länge wird daher als realistisch eingeschätzt. Dieser Anschluss bietet sowohl Chancen für eine Versorgung des Standortes mit Wasserstoff als auch zur Einspeisung lokaler Erzeugungsmengen aus einer Elektrolyseanlage in diese Wasserstoff-Leitung.

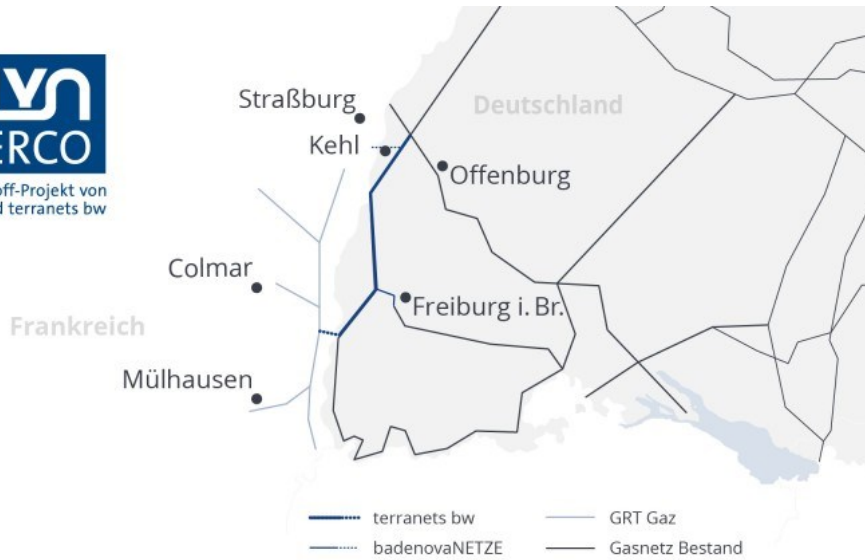


Abbildung 4: Leitungsplan des RHYN-Interco-Projektes bis zum Jahr 2035  
 Quelle: (badenovaNETZE)

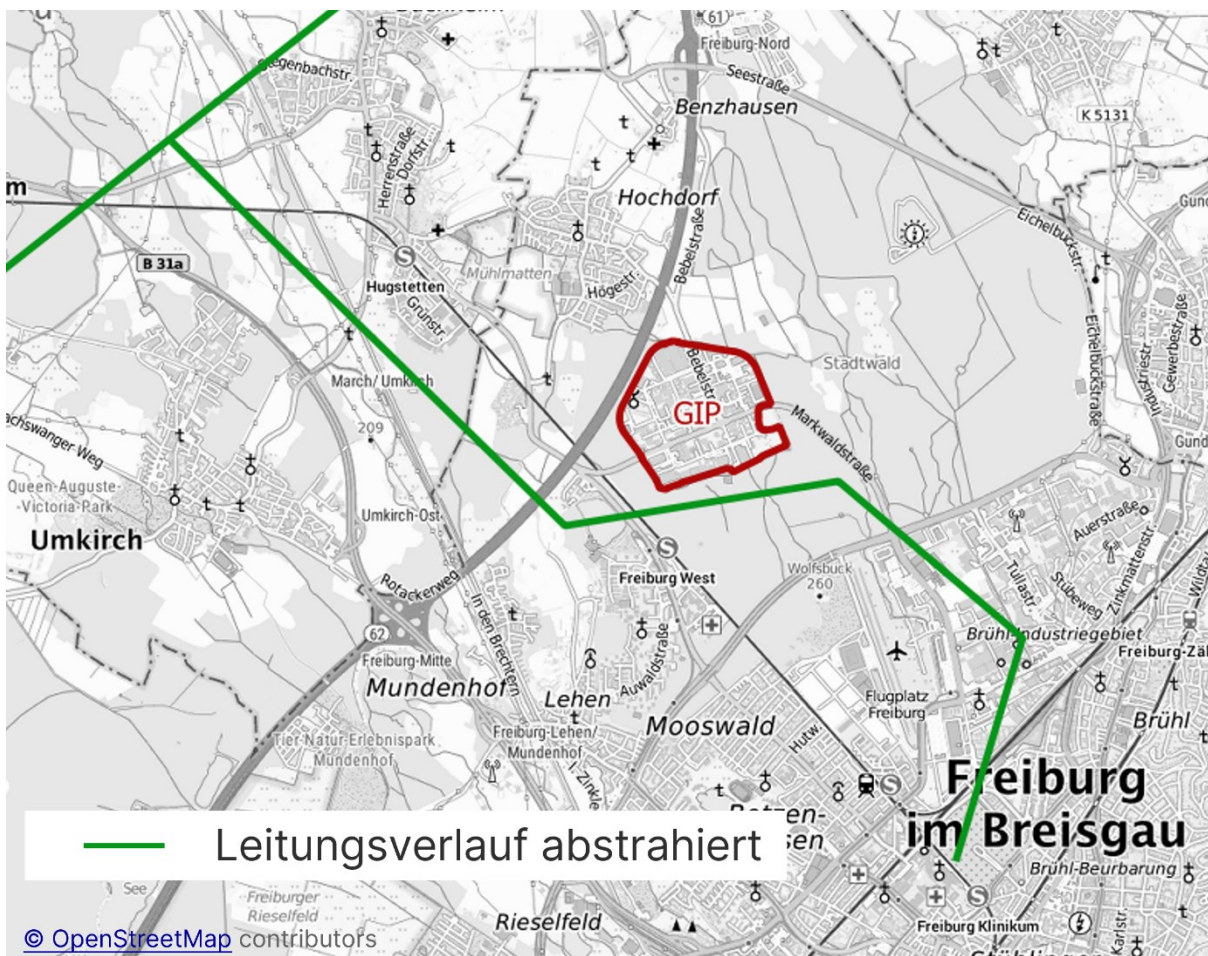


Abbildung 5: Abstrahierter Leitungsverlauf im Netzgebiet der badenovaNETZE zum Anschluss von Freiburg an das Wasserstoffnetz bis 2029

Quelle: eigene Darstellung nach Informationen der badenovaNETZE

## 2.3 Analyse Wärmenetzausbau und Masterplan-Wärme der Stadt Freiburg

Bei der Elektrolyse fallen relevante Abwärmemengen auf einem Temperaturniveau von 50-60 °C an. Diese sind prinzipiell geeignet, um in räumlicher Nähe Niedertemperatur-Wärmebedarfe zu decken oder mittels Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau z.B. in Wärmenetze eingespeist zu werden.

Die Ausbaupläne der badenovaWÄRMEPLUS im Wärmeverbund Freiburg West sind in Abbildung 6 dargestellt. Für das GIP Hochdorf ist aktuell keine Erschließung über ein Wärmenetz vorgesehen. In rund 1.500 m Entfernung befindet sich die bestehende Heizzentrale „Landwasser“, die seit den 60er Jahren in Betrieb ist. Diese wird in einem ersten Ausbausritt mit der neuen Energiezentrale bei der Cerdia verbunden, wodurch industrielle Abwärme aus Freiburg Nord bereits einen Teil der fossilen Wärme ersetzt. Perspektivisch könnte die Abwärme aus einer Wasserstoffherstellungsanlage am GIP Hochdorf eine weitere attraktive Wärmequelle (in Kombination mit Hochtemperatur-Wärmepumpen) für die Dekarbonisierung des Freiburger Wärmeverbundes darstellen.

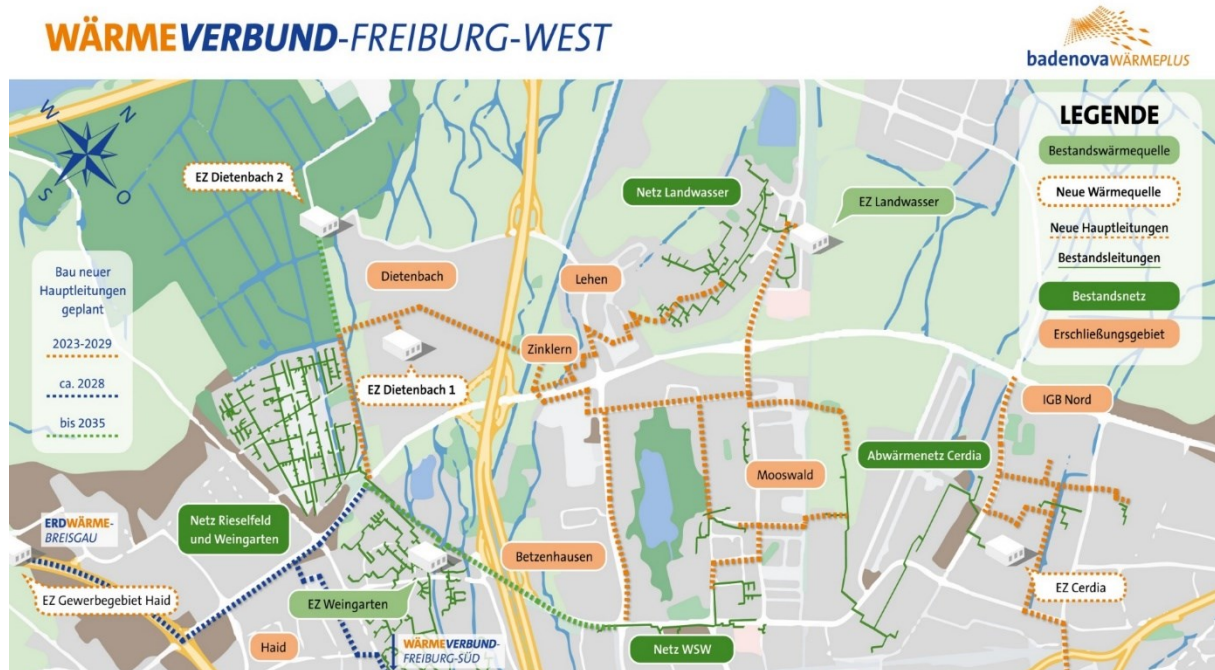


Abbildung 6: Ausbauplanung des Wärmeverbund-Freiburg West

Quelle: (badenovaWÄRMEPLUS)

### Synergien einer Abwärmenutzung

Ein relevanter Wärmeverbraucher im GIP Hochdorf ist die Taifun Tofu GmbH mit zwei Standorten im Gebiet. Durch den Bedarf an Prozessdampf ist die Nutzung von Abwärme aus der Elektrolyse zunächst als nicht geeignet eingestuft. Allerdings fallen im Produktionsprozess Abwärmemengen an, die derzeit ungenutzt bleiben.

Im Falle einer Wärmeleitung zum Transport der Abwärme aus dem GIP Hochdorf in Richtung Energiezentrale „Landwasser“ könnten prinzipiell die Abwärmemengen der Firma Taifun Tofu in die Wärmeleitung ebenso eingespeist werden. Diese Option ist



als Chance in der weiteren Projektentwicklung zu betrachten, für die Machbarkeitsuntersuchung der Wasserstofftankstelle jedoch nicht weiter relevant.

## 2.4 PV-Erzeugungspotenziale und Stromnetzkapazitäten

Zum Betrieb einer Elektrolyse sind die benötigten Strommengen und Leistungskapazitäten zu berücksichtigen. Dafür wurde die Situation am Standort im GIP Hochdorf untersucht.

Im ersten Schritt wurden die bestehenden PV-Anlagen im GIP Hochdorf analysiert. Aktuell sind nach Marktstammdatenregister im GIP Hochdorf bereits 24 Dachanlagen mit einer Gesamterzeugerleistung von 3 MW<sub>p</sub> installiert. Die daraus resultierende jährliche Stromerzeugung wurde in Abhängigkeit der Anlagenausrichtung und Dachneigung auf 3.150 MWh abgeschätzt. Freie PV-Potenziale werden auf Grundlage des Solaratlas (Energieatlas LUBW) auf zusätzlich 8 MW<sub>p</sub> geschätzt. Rechnerisch ergibt sich daraus ein jährliches Erzeugungspotenzial im GIP Hochdorf von weiteren 8.150 MWh.

Die verfügbare Netzanschlussleistung ist eine weitere wichtige technische Voraussetzung für die Errichtung eines Elektrolyseurs. Nach Gesprächen mit der badenovaNETZE ist für die Umsetzung einer Elektrolyseanlage im MW-Maßstab eine Erweiterung der Anschlussleistung im Gewerbegebiet nötig. Aufgrund bestehender Anfragen ist eine schrittweise Erweiterung der Netzleistung durch den Bau einer neuen Umspannstation in den nächsten Jahren bereits vorgesehen, die dann auch eine Erweiterung der Elektrolyseleistung voraussichtlich ab den Jahren 2029/2030 als machbar erachten lässt. Die aktuelle Leistungskapazität ist speziell im GIP Hochdorf bereits als „angespannt“ einzuordnen.

## 2.5 Zusammenfassung der Rahmenbedingungen für den GIP Hochdorf

Der GIP Hochdorf bietet gute Voraussetzungen für den Aufbau einer integralen Wasserstoffinfrastruktur. Die Standortrahmenbedingungen sind gegeben und perspektivisch wurden im Rahmen von Marktabfragen und Analysen relevante Wasserstoffbedarfe angemeldet.

Innerhalb des GIP wird ein konkreter Wasserstoffbedarf erwartet, um die Grundauslastung einer Tankstelle zu sichern. Die größte Nachfrage kommt von der Spedition Streck Transport GmbH, die sowohl eigene als auch von Subunternehmen betriebene LKW nutzt. In Zusammenarbeit mit weiteren Spediteuren wie Götz Transport GmbH ergibt sich ein potenzieller jährlicher Bedarf von bis zu 1.368 Tonnen Wasserstoff im Maximalszenario, das auf einer vollständigen Umstellung von 76 Schwerlastfahrzeugen basiert. Selbst im konservativen Szenario (30 % Umstellung) würde der Bedarf eine solide Basis für den Betrieb der Anlage darstellen. Die Befragungen zeigen jedoch eine noch nicht eindeutige Haltung der Unternehmen zur Einführung von Wasserstofffahrzeugen, mit einer mittelfristigen Tendenz zu gemischten Flotten aus batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Schwerlastbereich.

Ein weiterer Vorteil des Standorts ist die geplante Nähe zum nationalen Wasserstoff-Kernnetz, das bis 2029 eine Anbindung über eine weniger als 1.000 Meter lange Leitung ermöglicht. Dies eröffnet Optionen für die Versorgung des Standorts mit Wasserstoff und die Einspeisung lokal erzeugter Mengen. Einschränkend ist für den kurzfristigen Betrieb einer Elektrolyse die knappe Leistungskapazität des Stromnetzes

im GIP Hochdorf als Herausforderung zu nennen. Diese wird aber in den nächsten Jahren durch eine neue Umspannstation deutlich erhöht, was perspektivisch die Realisierbarkeit einer Elektrolyseanlage für die lokale Wasserstoffproduktion begünstigt.

Bereits installierte PV-Anlagen liefern innerhalb des GIP Hochdorf eine Leistung von 3 MW<sub>p</sub>, während zusätzliche Flächen für bis zu 8 MW<sub>p</sub> identifiziert wurden. Dies ergibt ein geschätztes jährliches Erzeugungspotenzial von über 10.000 MWh am Standort.

Zusätzlich bietet die Nähe zu potenziellen Wärmeabnehmern interessante Synergien. Bei der Wasserstoffproduktion entstehende Abwärme könnte einen Beitrag zur kommunalen Wärmewende leisten, indem diese für eine Einspeisung in das Verbundwärmenetz Freiburg bereitgestellt wird.

Die Kombination aus potenziellem H<sub>2</sub>-Bedarf, geplanter Netzanbindung, wachsendem Stromnetz und lokalem PV-Potenzial macht das GIP Hochdorf zu einem attraktiven Standort für den Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffinfrastruktur. Die strategischen Standortvorteile ermöglichen nicht nur eine zukunftsweisende Mobilitätslösung, eine Erhöhung der Versorgungssicherheit, sondern auch die Stärkung des Wirtschaftsstandorts durch die erhöhte lokale Wertschöpfung bei der Bereitstellung des grünen Wasserstoffs.

### 3 Simulation und Grobauslegung der H<sub>2</sub>-Anlage inkl. Abwärmennutzung

#### 3.1 Ableitung der Versorgungsansätze

Für die Konzeptionierung der Tankstellenanlage wurden die Komponenten zur Beschaffung, Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff in die Dimensionierung einbezogen. Die nötige Kapazität und Komponentenbetrachtung der Aufbereitungs- und Abgabeinfrastruktur der Tankstelle wurden ebenfalls mit abgebildet. Zur Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Bedarfs wurde ein typisches Tankprofil bei den Spediteuren erfragt. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Darin ist der vorherrschende Schichtbetrieb deutlich erkennbar. Die größten Betankungsmengen kommen in den Morgen- und Abendstunden zustande. Samstags ist noch ein geringerer Bedarf am Vormittag zu verzeichnen.

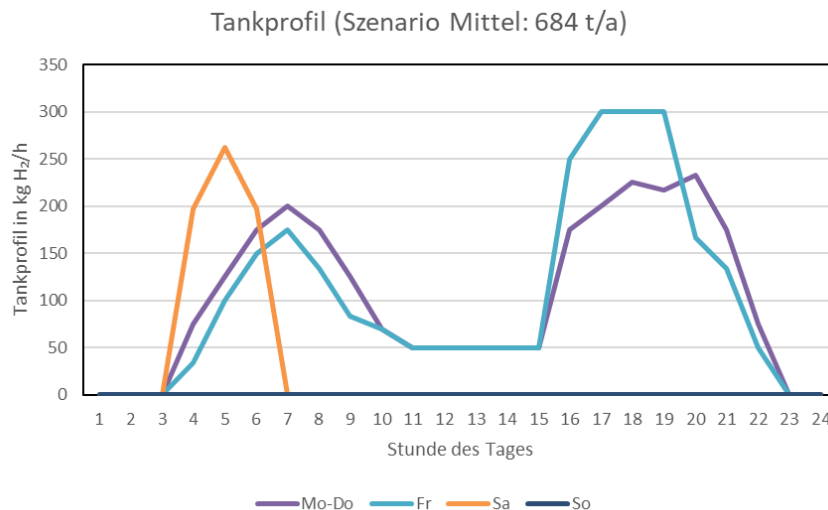


Abbildung 7: Tanklastprofil aus bisherigen Betriebserfahrungen

Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus (Streck 2024)

Auf Basis dieses Lastprofils und den angenommenen Jahresmengen wurden verschiedene Versorgungsansätze untersucht (Abbildung 8). Eine Variante besteht in der Vollversorgung mit Wasserstoff aus Elektrolyse vor Ort, eine zweite Variante in der Vollversorgung über das Wasserstoffnetz, die dritte Variante stellte die optimierte Mischversorgung unter Nutzung beider Bezugsquellen dar.

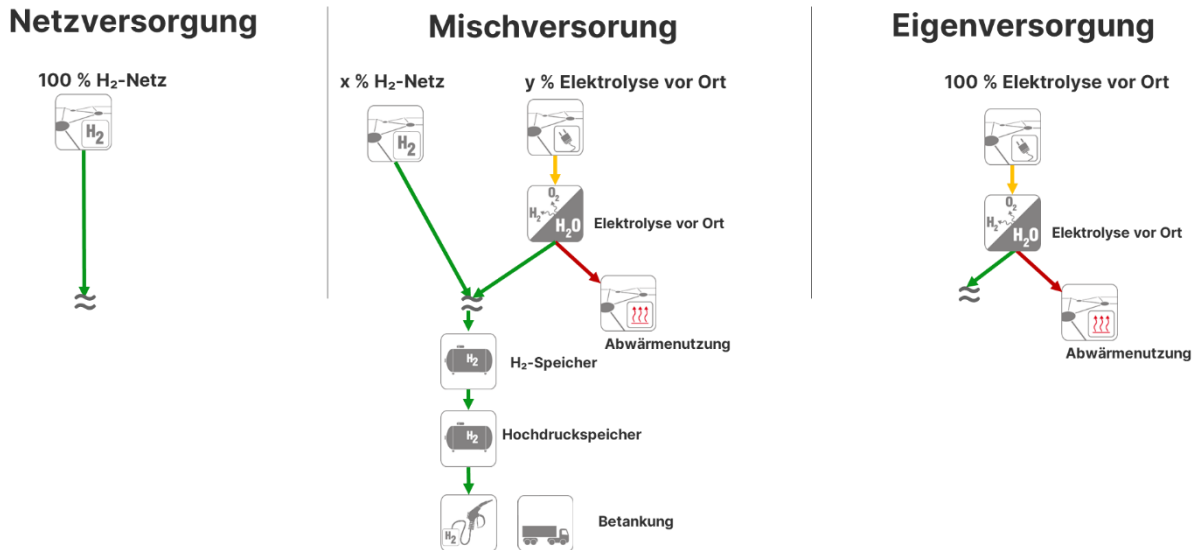


Abbildung 8: Versorgungsvarianten der Wasserstofftankstelle im GIP Hochdorf

Ziel aller Varianten ist die gesicherte Versorgung mit grünem Wasserstoff. Durch Variation der Elektrolyseleistung und Kapazität eines Pufferspeichers für den erzeugten Wasserstoff konnte eine optimierte Anlagenstruktur für den Eigenversorgungsfall ermittelt werden. Der Speicher wurde ausreichend dimensioniert, um die Lastspitzen abpuffern zu können. Damit kann der Elektrolyseur im Grundlastbetrieb hohe Betriebszeiten erreichen und während der Schwachlastphase den Speicher wieder füllen. Diese zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Bedarfsdeckung ist in den Profilen in Abbildung 9 ablesbar. Bei der Dimensionierung der Komponenten wurde darauf geachtet, dass der Elektrolyseur eine hohe Volllaststundenzahl erreicht. Dies erhöht die Versorgungssicherheit und Aussagekraft der Analyse, da im Gesamtsystem, positive und negative Abweichungen in Erzeugung und Verbrauch teilweise ausgeglichen werden.

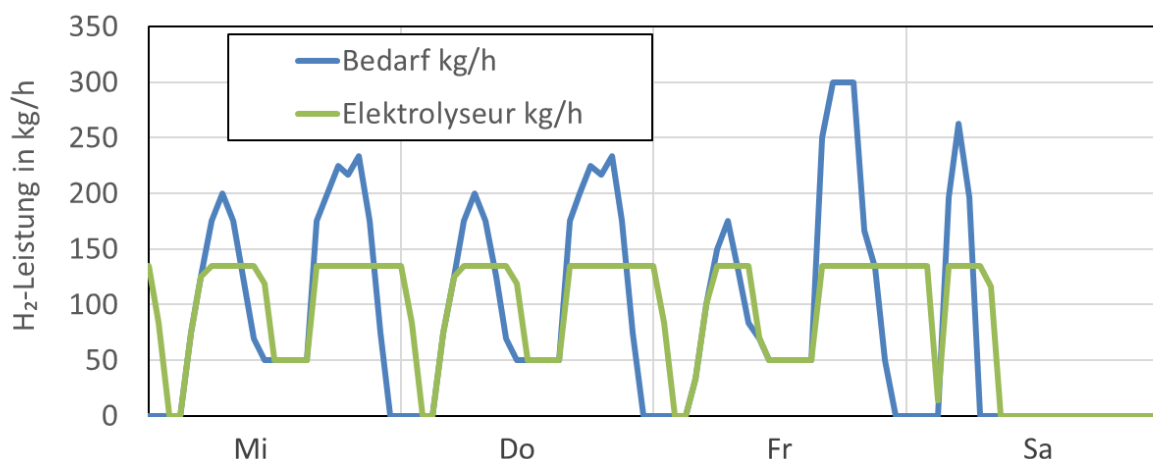


Abbildung 9: Lastverlauf Bedarf und Erzeugung von Wasserstoff der Variante Eigenversorgung im mittleren Bedarfsszenario

Analog wurde die Dimensionierung der Komponenten und der Anlagenbetrieb für die Variante Mischversorgung optimiert. In Abbildung 10 sind beispielhaft die Profile für

die Wasserstoffherzeugung aus der Elektrolyse vor Ort und durch den Bezug aus der vorgelagerten H<sub>2</sub>-Pipeline („Netzausgleich“) enthalten.

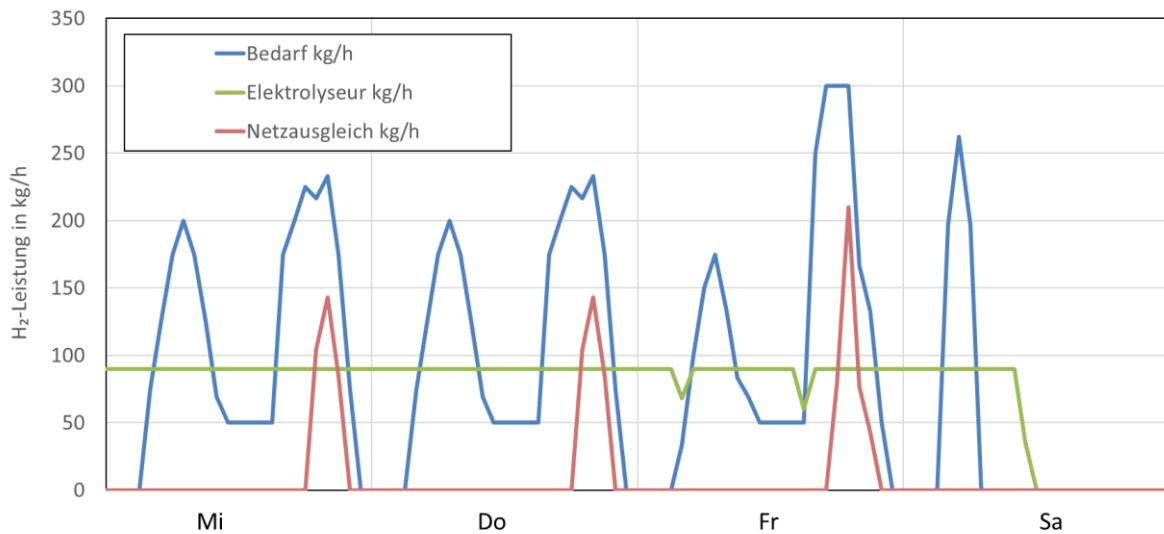


Abbildung 10: Lastverlauf Bedarf und Erzeugung von Wasserstoff der Variante Mischversorgung im mittleren Bedarfsszenario

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden die Versorgungsvarianten der reinen Netzversorgung und der Mischversorgung (Tabelle 1) ermittelt, wobei der Elektrolyseur in der Mischvariante kleiner ausfallen kann und dessen Vollaststundenzahl deutlich ansteigt.

Tabelle 1: Dimensionierungsgrößen für die Variante Mischversorgung mit den Bedarfswerten von 2030

	Szenario Min	Szenario Mittel
Anzahl LKW	23	38
Bedarf Wasserstoff im Jahr	410 t/a	684 t/a
Bedarf Wasserstoff am Tag	1,5 t/d	2,5 t/d
Leistung Elektrolyseur	2,5 MW <sub>el</sub>	5 MW <sub>el</sub>
H <sub>2</sub> -Produktion vor Ort	302 t/a	595 t/a
Strombedarf Elektrolyse	16.800 MWh/a	33.000 MWh/a
H <sub>2</sub> Netzbedarf	108 t/a	89 t/a
Mitteldruckspeicher	250 kg	500 kg

Die Mischversorgung wird im Rahmen der Machbarkeitsstudie als Zielsystem betrachtet. Die in Tabelle 1 dargestellten Bedarfs- und Versorgungsszenarien haben zur Bereitstellung der Wasserstoffmengen variierende Rahmenbedingungen. Exemplarisch sind hierfür in dem Energieflussdiagramm in Abbildung 11 die relevanten Energieströme für die Mischversorgung im mittleren Bedarfsszenario aufgezeigt. Für diesen Versorgungsfall ist die Wasserstoffinfrastruktur modular konzipiert worden, um möglichst flexibel den Anforderungen des zeitlichen Hochlaufs der Wasserstoffnachfrage gerecht werden zu können.

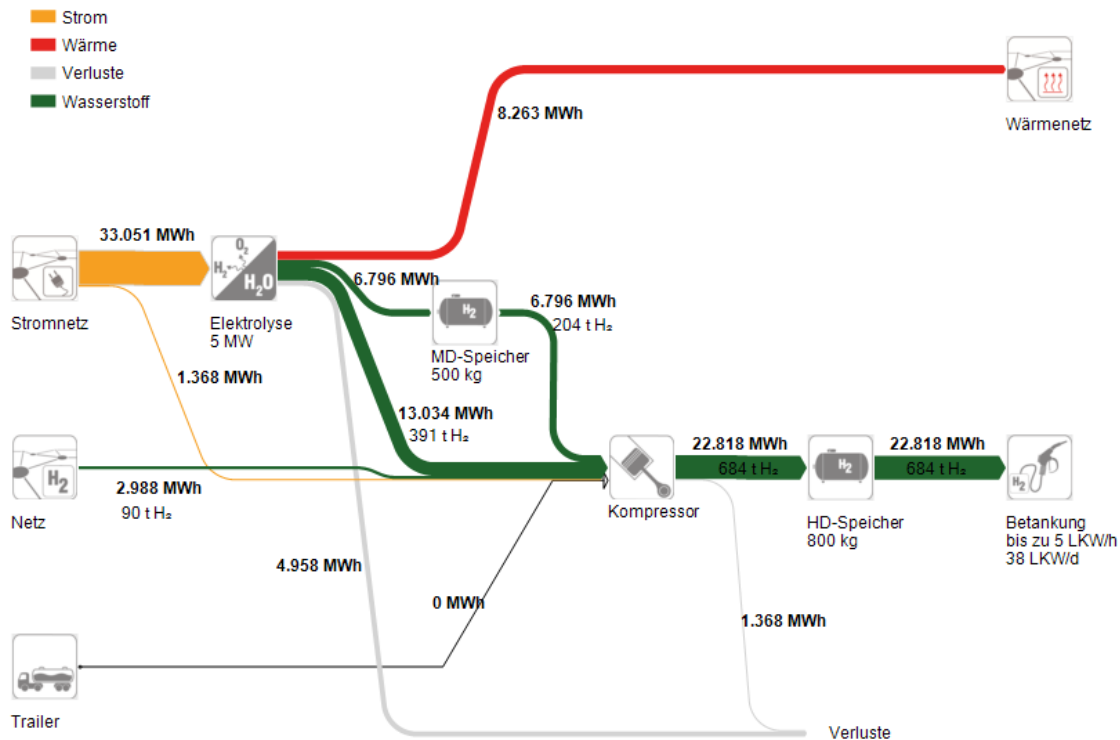


Abbildung 11: Energieflussdiagramm der Variante Mischversorgung im mittleren Bedarfsszenario

### 3.2 Konzeptionierung der Wasserstoffinfrastruktur

Aufbauend auf den Versorgungsansätzen aus Kapitel 3.1 ist die Wasserstoffinfrastruktur dimensioniert worden. Ziel ist eine Optimierung der Anlagenkonzepte unter Berücksichtigung des Entwicklungspfads bis 2035 im Hinblick auf die Anlagendimensionierung und die Versorgungssicherheit. Um diese Ziele zu erreichen ist ein modularer und damit höchst flexibler Ansatz für die Gesamtanlage entwickelt worden.

Für diese Optimierung sind alle wesentlichen Anlagenkomponenten mitberücksichtigt. Folgende Stellschrauben konnten für die obigen Ziele identifiziert werden:

- Diversifizierung der H<sub>2</sub>-Quellen (Elektrolyse, Trailerstation, H<sub>2</sub>-Leitung)
- Modulare Anlagenkomponenten (Elektrolyse, H<sub>2</sub>-Speicher, Zapfstellen)
- Flächenverfügbarkeit bzw. -vorhaltung

Der Hochlauf der Bedarfsmengen und der dazu korrelierende Ausbau der Anlagen wurde auf Basis der in Abbildung 2 gezeigten Bedarfsmengen und den Rückmeldungen der Transportunternehmen beim Workshop (vgl. Abschnitt 6.1) angenommen. Die zeitlichen Stufen sind in Abbildung 12 und Tabelle 2 aufgezeigt.

Demnach ist für den Start ein Probetrieb mit 1-2 Fahrzeugen pro Spedition angenommen. In der Kalkulation wurde davon ausgegangen, dass sich alle Speditionen, die Interesse bekundet haben mit mindestens einem Fahrzeug beteiligen können. Dies entspricht einem ersten Jahresbedarf aus insgesamt 2-3 Fahrzeugen und damit den für 2026 dargestellten Bedarfsmengen des minimalen Bedarfsszenarios von ca. 41 t. Die dafür benötigte Wasserstoffmenge kann durch Anlieferung aus Trailern oder aus Eigenerzeugung der Elektrolyse erfolgen. Dabei reicht die kleinste angenommene Modulgröße des Elektrolyseurs von 2,5 MW<sub>el</sub> bereits zur Alleinversorgung des Bedarfes aus. Mit 910 Vollaststunden während dieser zeitlich befristeten ersten Phase ist eine höhere Auslastung durch zusätzliche Befüllung von Trailern mit dem produzierten Wasserstoff denkbar, hier aber nicht mit abgebildet. Über die Trailerstation kann alternativ auch der gesamte Bedarf vollständig gedeckt werden, was von Beginn an eine Redundanz in der Versorgungssicherheit bietet.

Nach einem erfolgreichen Probetrieb kann mit einem stetigen Anstieg des Wasserstoffbedarf nach den ermittelten Bedarfsszenarien gerechnet werden. Für 2028 ist noch mit einem leichten Zuwachs nach dem beschriebenen Minimalszenario gerechnet. In der Kalkulation wird also von 11 Fahrzeugen mit einem Gesamtbedarf von 205 t/a gerechnet. Damit geht der Wasserstoffantrieb mit 14% der Fahrzeuge auch für die Transportunternehmen allmählich in den Regelbetrieb über. Da die Anlagentechnik bereits für 2026 reichlich dimensioniert war, ist dafür keine Erweiterung der Technik nötig. Der Elektrolyseur kann durch den Anstieg der Vollaststunden auf fast 4.600 weiterhin die Gesamtversorgung des Bedarfs sicherstellen und erreicht damit ebenfalls eine deutlich höhere Auslastung. Auch in dieser Phase behält die Trailerstation als Backupvariante ihre Bedeutung. Ebenso kann je nach Entwicklung der Szenarien weiterhin produzierter Wasserstoff in Trailer verfüllt werden.

Für das Jahr 2030 wird mit einer weiteren Bedarfssteigerung gerechnet. Beim Workshop wurde das Erreichen der Bedarfsmenge nach dem Minimalansatz bis zu dem Jahr teilweise verhalten betrachtet. Teilweise wurde aber mit einer üblichen Austauschrate der Fahrzeuge von 4 Jahren argumentiert, was bei entsprechender Marktentwicklung (CO<sub>2</sub>-Preise, Zweitmarkt für Dieselfahrzeuge, etc.) zu einer deutlichen Beschleunigung der Entwicklung führen könnte. Daher wird für den hier aufgezeigten Entwicklungspfad eine Bedarfsspanne zwischen der Fortführung der Bedarfsentwicklung nach dem Minimalszenario und einem Anstieg auf das mittlere Bedarfsszenario angesetzt. Bei weiterem Verlauf nach dem Minimalszenario (23 Fahrzeuge) bleibt die Anlagendimensionierung ausreichend. Für die Bedarfsdeckung werden allerdings zusätzliche Wasserstoffmengen aus der dann fertiggestellten Wasserstoffleitung nötig. Sollte sich die Inbetriebnahme dieser Leitung noch verzögern ist in dieser Ausbaustufe die Trailerstation essenziell zur ausreichenden Bedarfsabdeckung. Für einen stärkeren Anstieg nach dem mittleren Szenario (38 Fahrzeuge) wird eine Erweiterung der Tankstelleninfrastruktur nötig. Eine Kapazitätsverdopplung der Komponenten Elektrolyseur und Mitteldruckspeicher sind für eine ausreichende Wasserstoffherzeugung in Betracht zu ziehen. Auch in diesem Fall werden Trailerstation und/oder Wasserstoffnetz als zusätzliche Bezugsquelle benötigt.

Spätestens ab 2030 wird mit einer starken Entwicklung des Wasserstoffbedarf ggf. leicht über das mittlere Bedarfsszenario hinaus in der Machbarkeitsstudie gerechnet, was eine nochmalige Erweiterung des Elektrolyseurs auf bis zu 7,5 MW<sub>el</sub> mit sich bringt. Außerdem kann dann auch über eine Erweiterung der Zapfsäulen nachgedacht werden, da die Zahl der Fahrzeuge damit einen maximal gleichzeitigen Tankbedarf von 5 Fahrzeugen pro Stunde überschreitet. Bei der Betankungskapazität von 3 Fahrzeugen je Stunde pro Zapfstelle würde sich in Hochlastzeiten ein verstärkter Rückstau bilden. In Kombination mit der ab 2029 vorhandenen Wasserstoffleitung und den ab 2030 deutlich erhöhten Netzkapazitäten kann die volle Flexibilität des Standortes ausgespielt werden. Eine zusätzliche Erweiterung der Elektrolyse für die Produktion von Wasserstoff auch für den Vertrieb über das Netz oder Trailer ist eine gute Entwicklungsoption.

Aus dem beschriebenen Ablauf wird ersichtlich, dass die Randbedingungen für die finale Ausbauoption am Standort zwar noch nicht final definiert sind, der modulare Ansatz aber jegliche Flexibilitäten besitzt, um auf noch unsichere zukünftige Entwicklungen reagieren zu können.

*Tabelle 2: Schrittweiser Ausbau der Tankstellenkomponenten bis 2035*

Ausbaustufe	2026	2028	2030 (Min)	2030 (Mittel)	2035
Anzahl LKW	2-3	11	23	38	≥38
H <sub>2</sub> -Bedarf	41 t/a	205 t/a	410 t/a	684 t/a	≥ 684 t/a
Elektrolyseur					
Leistung elektrisch	2,5 MW <sub>el</sub>	2,5 MW <sub>el</sub>	2,5 MW <sub>el</sub>	5 MW <sub>el</sub>	5-7,5 MW <sub>el</sub>
Volllaststunden	913	4.564	6.709	6.610	>6.000
Abwärmeleistung	0,6 MW	0,6 MW	0,6 MW	1,2 MW	1,2-1,9 MW
H <sub>2</sub> -Bezug	0	0	108 t/a	89 t/a	
MD-Speicher	250 kg	250 kg	250 kg	500 kg	500-750 kg
Anzahl Zapfstellen	2	2	2	2	2-4



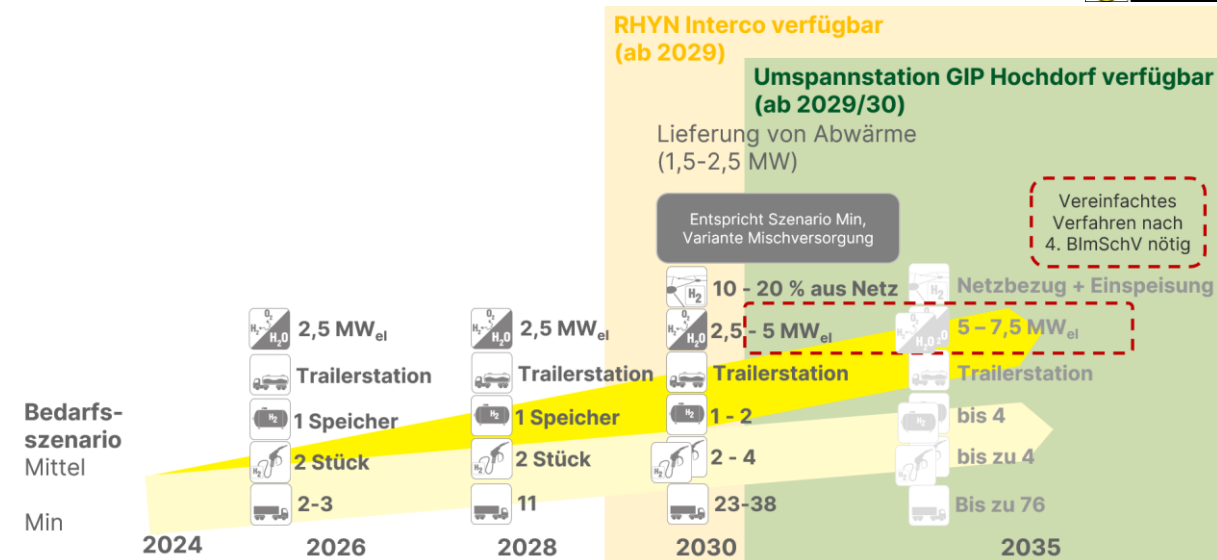


Abbildung 12: Schrittweiser Aufbau der modularen Infrastruktur bis 2035

Neben der lokalen Wasserstoffherzeugung und Anlieferung ist die Betankungsinfrastruktur für die LKWs von besonderer Relevanz. Auch diese kann modular in Abhängigkeit von der Anzahl der Zapfstellen konzipiert werden. Die Tankstelle ist in der Ausgangssituation mit zwei Zapfstellen auf verschiedenen Druckstufen (350 und 700 bar) bestückt, um neben dem Schwerlastverkehr auch potenziell für PKW eine Tankmöglichkeit zu bieten. Je Zapfstelle können stündlich bis zu drei LKW betankt werden. Die Pufferspeicher für die H<sub>2</sub>-Erzeugung werden als Mitteldruckspeicher mit einer Einzelkapazität von 250 kg angenommen. Dies entspricht Hochtank-Druckspeichern mit einem Platzbedarf von 3,3x3,3 m bei einer Höhe von ca. 18 m, die für die Lagerung von Wasserstoff bis 50 bar eingesetzt werden können.

Eine weitere wichtige modulare Einheit bildet der Elektrolyseur. Dieser kann in Containerbauweise in 2,5 MW Stufen skaliert werden. Bei einer Endausbaustufe von bis zu 10 MW<sub>el</sub> fällt ein Platzbedarf von ca. 23x22 m an. Die Trailerstation wird nicht modular abgebildet, da für die Anlieferung eines Wechseltrailers von Beginn an zwei Trailerboxen mit einem Platzbedarf von ca. 20x20 m (einschließlich Peripherie) benötigt werden.

### 3.3 Entwicklung eines Anlagenlayouts und nötiger Flächenbedarfe

Auf Basis der Konzeptionierung der Wasserstoffinfrastruktur konnte ein beispielhaftes Flächenlayout für die Anlage entwickelt werden. Diese ist in Abbildung 13 dargestellt.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie fokussiert sich die Betrachtung auf ein potenziell geeignetes Grundstück im GIP Hochdorf. Dieses befindet sich im Eigentum der Firma Streck Transport GmbH, wird aktuell vor allem als LKW-Stellplatzfläche genutzt und ist bereits zum Teil verkehrlich erschlossen.

Das angestrebte Layout der Gesamtanlage hat zum Ziel, die verfügbare Fläche möglichst effizient zu nutzen und dabei möglichst wenig bestehende Stellplatzflächen zu verbrauchen. Gleichzeitig sollen Entwicklungsmöglichkeiten für einen modularen Aufbau der Anlage bestehen. Daher wurden die Anlagenkomponenten im südlichen Teilbereich der Fläche konzentriert, der derzeit nicht als Parkplatzfläche genutzt wird. Lediglich die Tankplätze zur Betankung der Fahrzeuge sind im derzeitigen Fahrbereich angeordnet.

In der **ersten Ausbaustufe** wird eine Tanksäule mit zwei Zapfstellen (je eine zur Betankung bei 350 bar und 700 bar) vorgesehen, die für 40 Fahrzeuge pro Tag als ausreichend betrachtet wird. Dabei ist eine Erweiterungsoption um eine weitere Tanksäule mit 2 Zapfstellen in Richtung Parkplatzmitte vorgesehen. Bei einer Erweiterung auf zwei Tanksäulen kann die Tankstelle für alle dargestellten Szenarien ausreichend Fahrzeuge versorgen.

Direkt anschließend in engem räumlichen Zusammenhang befinden sich alle weiteren Komponenten, die mit hochverdichtetem Wasserstoff über 50 bar betrieben werden, um die erforderlichen Leitungswege kurz halten zu können. Für die Anlagenperipherie zum Tankstellenbetrieb wird eine Fläche von 900 m<sup>2</sup> vorgesehen. Auch die Trailerabfüllstation sollte zur Vermeidung kurzer Wege nicht über 50 m von der Anlagenperipherie entfernt sein. Diese wurde daher im westlichen Bereich der Fläche platziert. So kann die Fläche abseits der Parkplätze optimal genutzt werden, und durch die umlaufende Weißerlenstraße trotzdem eine Durchfahrtslösung der Trailerstation realisiert werden, was zusätzlich Aufwand und Platzbedarf zum Rangieren spart. Im Zentrum des Bereichs befindet sich die Technikfläche zur Tankstelle, die Kompressoren, Hochdruckspeicher, Kühlaggregate und Mitteldruckspeicher enthält. Seitlich abgegrenzt kann die Elektrolyseanlage platziert werden. Diese Fläche bietet Erweiterungsmöglichkeiten der Elektrolyse auf bis zu 10 MW<sub>el</sub> elektrischer Anschlussleistung und ist damit ebenfalls für sämtliche Ausbauszenarien ausreichend dimensioniert.

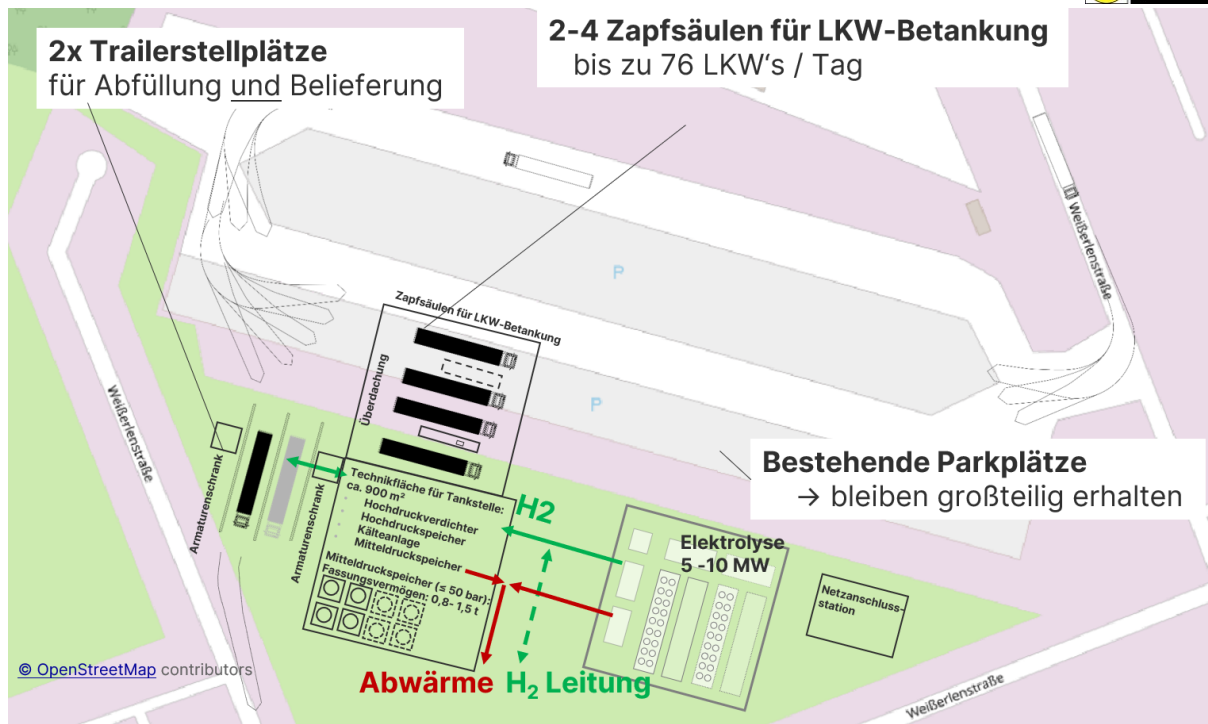


Abbildung 13: Konzept für Anlagenlayout in modularer Bauweise

### 3.4 Genehmigungsrechtliche Aspekte

In dem nachfolgenden Kapitel erfolgte eine erste genehmigungsrechtliche Einordnung der im Rahmen der Machbarkeitsstudie beschriebenen Wasserstoffinfrastruktur. Die Einordnung ist nach Abstimmung mit dem Regierungspräsidium Freiburg vorgenommen worden.

Für die Genehmigung technischer Anlagen sind prinzipiell Baugenehmigungen erforderlich. Je nach Art und Größe der Anlage können zusätzlich weitere Genehmigungsanforderungen bestehen. So gilt für Elektrolyseanlagen bisher generell die Pflicht zum förmlichen Genehmigungsverfahren nach 4. BImSchV. Seit 15.11.2024 gelten auch für Elektrolyseanlagen mögliche Abstufungen in Abhängigkeit der Anlagengröße. Für die Einordnung der Gesamtanlage im Verfahrensablauf ist das jeweils höherrangige Verfahren der Einzelkomponenten für die gesamte Anlage anzusetzen. Für das beschriebene Vorhaben im GIP Hochdorf sind dabei die Leistung des Elektrolyseurs und die gesamte Speicherkapazität bzw. die stationäre Lagermenge von Wasserstoff ausschlaggebend. Dabei ist ab den in Abbildung 14 gezeigten Grenzwerten das jeweilige Genehmigungsverfahren anzuwenden. Alle gezeigten Verfahren weisen dabei die Konzentrationswirkung auf, wodurch die untergeordneten bzw. nachrangigen Genehmigungen, wie die Baugenehmigung nach Baurecht stets inklusiv behandelt werden.

Für die in der Machbarkeitsstudie vorgenommene Einordnung ist die Dimensionierung der Anlagentechnik und des Betriebs nach dem Bedarfsszenario Mittel als Verfahrensgrundlage angenommen. Die gespeicherten Wasserstoffmengen bleiben in dem Szenario unter 5 t. Die Elektrolyseleistung wird zwischen 5 und 7,5 MW<sub>el</sub> liegen, was ein vereinfachtes Verfahren zur Folge hat. Die dafür zuständige Behörde ist die untere Genehmigungsbehörde und damit die Stadt Freiburg. Da die Genehmigungsverfahren für Elektrolyseanlagen bisher im förmlichen Verfahren durch

das Regierungspräsidium Freiburg betreut wurden, bestehen dort bereits Erfahrungen zu wichtigen Rahmenbedingungen für die Genehmigungsfähigkeit.

In einem Vorabstimmungstermin wurde das Vorhaben in Hochdorf gemeinsam mit einer Vertreterin des Regierungspräsidiums erörtert. Dabei wurden keine grundlegenden Hindernisse in der Genehmigungsfähigkeit erkannt. Sollten entgegen der bisherigen Konzeptionierung die stationären Lagermengen die Menge von 5 t übersteigen, wäre mit der Prüfung nach Störfallverordnung nach 12.BImSchV auch eine Abstandsbewertung von Schutzgütern, wie der nahegelegenen Moschee erforderlich, voraussichtlich aber nicht hinderlich. Für die Genehmigung der Anlage nach dem vereinfachten Verfahren nach 4. BImSchV ist ein Standort in einem Industriegebiet hilfreich. Laut Bebauungsplan befindet sich der betrachtete Standort in einem ausgewiesenen Gewerbegebiet. In dem Fall wäre eine Ausweisung der Fläche als Sondergebiet zum Beispiel für Energiewirtschaft oder technische Infrastrukturen möglich.

Ergänzend hierzu hat das Stadtplanungsamt in einer informellen Voranfrage geäußert, keine grundsätzlichen Bedenken zur Planung des Vorhabens im GIP Hochdorf zu haben.

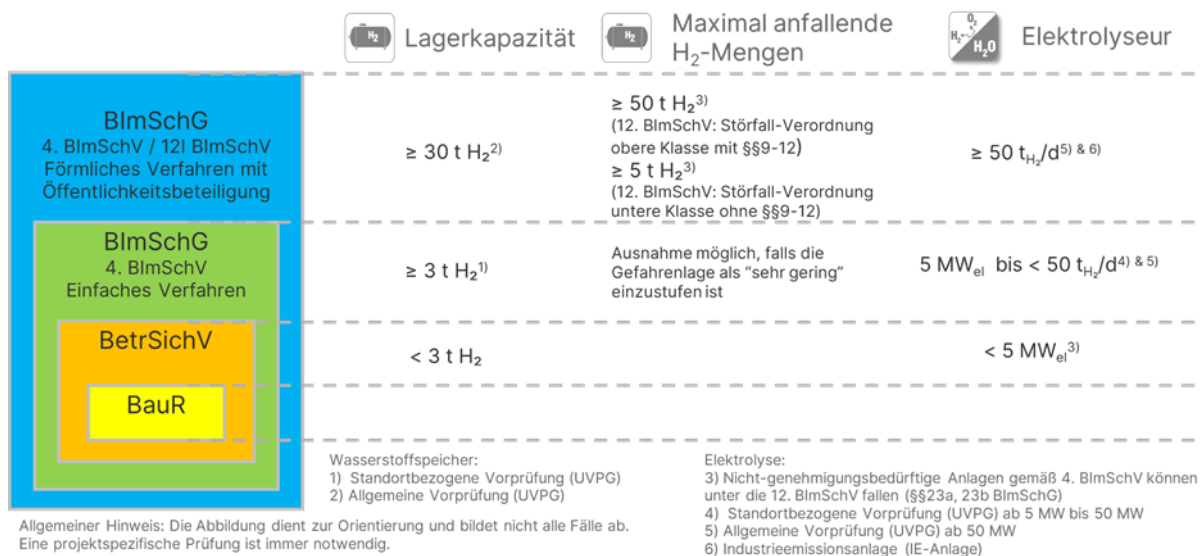


Abbildung 14: Anwendungsbedingungen der Genehmigungsverfahren für Wasserstoffanlagen

## 4 Entwicklung eines Geschäfts- und Betreibermodells

Ein weiterer Bestandteil der Machbarkeitsstudie ist die Entwicklung eines Geschäfts- und Betreibermodells für die Wasserstoffinfrastruktur im GIP Hochdorf. Hierzu sind zunächst mögliche Betriebsformen und potenzielle Rollen der hierfür erforderlichen Akteure beleuchtet worden. Darüber hinaus sind die Beschaffungsoptionen von erneuerbarem Strom untersucht und als Rahmenbedingung in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Betrieb der Anlagen mit eingeflossen. Diese erlaubt mit einer detaillierten Auflistung der Investitionskosten und Vollkosten eine erste Indikation zu möglichen Wasserstoffkosten und damit auch zur Bewertung eines Geschäftsmodells.

### 4.1 Analyse potenzieller Rollen und Aufgaben

Zum Betrieb der Tankstelle sind Akteure mit unterschiedlichen Interessen und Aufgaben gefordert. Dafür werden im folgenden verschiedene Rollen definiert, die im weiteren Verlauf ausgefüllt werden müssen, um das Projekt erfolgreich umsetzen zu können. Dabei können einzelne Akteure durchaus auch mehrere Rollen besetzen.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie für die Wasserstoffinfrastruktur im GIP Hochdorf wird grundsätzlich angesetzt, dass der Betrieb der Tankstelle, der Wasserstoffherzeugung, der Wasserstoff- und Wärmenetze durch unterschiedliche Akteure erfolgt. Ein Betrieb mehrerer Bausteine durch einen Akteur wird jedoch nicht ausgeschlossen.

Zunächst muss ein **Tankstellenbetreiber** gefunden werden, der sich um Wartung und Betrieb der Tankstelle kümmert. Der Betreiber beschafft die nötigen Mengen an Wasserstoff und rechnet die abgegeben Einheiten nach der Betankung von den Kunden ab.

Die **Kunden** der Tankstelle können als eine eigene Rolle definiert werden, die auf mehrere Akteure aufgeteilt ist. Die Kunden nutzen Wasserstofffahrzeuge, die an der Tankstelle betankt werden. Die Ankerkunden der Tankstelle sind die Speditionen im GIP Hochdorf, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass vorbeifahrender Verkehr von der A5 den nötigen Umweg zur Betankung aufnehmen wird, solange der GIP Hochdorf keine direkte Autobahnanbindung erhält. Für die Speditionen wird die Tankstelle vermutlich die einzig sinnvolle Tankoption darstellen, insbesondere solange das Netz an Wasserstofftankstellen noch nicht flächendeckend aufgebaut ist. Daraus besteht eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen Tankstellenbetreiber und Ankerkunden. Um das nötige Vertrauen und Bereitschaft zu schaffen ist daher eine frühzeitige Beteiligung beider Rollen an der Projektentwicklung zu empfehlen. Nach einer Untersuchung der Wasserstoffpreise an bereits bestehenden deutschen Wasserstofftankstellen lagen die üblichen brutto-Verkaufspreise für grünen Wasserstoff im Jahr 2024 bei rund 15-17 €/kg (*H2.live 2024*). Diese Preise dürfen daher auch an der geplanten Tankstelle im GIP Hochdorf nicht überschritten werden. Für die Speditionen ist darüber hinaus eine hohe Zuverlässigkeit der Tankmöglichkeit entscheidend, da ein Ausfall zu hohen Vertragsstrafen aus einer Nichterfüllung bestehender Lieferverträge führen kann.

Weitere Kunden der Tankstelle bestehen im Umfeldverkehr gegebenenfalls durch PKWs. Durch das derzeit begrenzte Angebot an H<sub>2</sub>-Tankstellen wird bis zum flächendeckenden Ausbau dieser Infrastruktur für H<sub>2</sub>-PKW ein gewisser Umweg

tolerierbar sein. Für die Hochlaufphase kann dieses Kundenpotenzial die Wirtschaftlichkeit des Tankstellenbetriebs unterstützen.

Die Erzeugung von Wasserstoff für den Betrieb der Tankstelle wird vorwiegend durch den **Betreiber der Elektrolyseanlage** geleistet. Dieser muss die nötigen Strommengen für die Wasserstoffproduktion beschaffen. Dabei ist für einen wirtschaftlichen Betrieb eine hohe Auslastung des Elektrolyseurs, bei gleichzeitig geringen Strompreisen anzustreben. Der erzeugte Wasserstoff wird in der Kalkulation nach dieser Studie vollständig durch den Tankstellenbetrieb abgenommen. Weitere Vertrieboptionen insbesondere für eine Wochenendproduktion bestehen darin, Trailer zu befüllen oder erzeugten Wasserstoff in das Wasserstoffnetz einzuspeisen. Die Betreiberrolle der Elektrolyseanlage könnte grundsätzlich auch durch den gleichen Akteur ausgefüllt werden, der die Betreiberrolle der Tankstelle innehat.

Eine weitere wesentliche Rolle im Umfeld der Anlage ist der **Stromversorger**. Dessen Aufgabe besteht in der Erzeugung und dem Vertrieb von grünem Strom an den Betreiber der Elektrolyseanlage. Die Erzeugung des Stroms sollte idealerweise in räumlicher Nähe zum Elektrolyseur und in einem konkreten Anlagenzusammenhang aus erneuerbaren Energien, wie Wind oder Solar geschehen. Für eine sichere Kalkulation sind möglichst langfristige Stromlieferverträge zu gesicherten Konditionen hilfreich. Der Stromversorger kann auch aus mehreren verschiedenen Akteuren bestehen, die aus ihren jeweiligen Stromerzeugungsanlagen die Produktionsmengen anbieten.

Ebenfalls ist im Falle des Standorts im GIP Hochdorf durch den möglichen Anschluss an die Wasserstoffleitung der zugehörige **Gasnetzbetreiber** als eigene Rolle im Projekt zu sehen. Dieser ermöglicht den Anschluss des Anlagenverbundes an die Gasleitung und ist in der Lage, Mehr- oder Mindermengen im Betrieb auszugleichen. Eine bidirektionale Anbindung kann die Funktion erfüllen, grünen Wasserstoff für eine Versorgungsgarantie aus dem vorgelagerten Netz zu beziehen oder auch um lokal erzeugten grünen Wasserstoff potenziellen Kunden an der Wasserstoffleitung zu verkaufen.

## 4.2 Beschaffungsoptionen für erneuerbaren Strom

Grüner Wasserstoff bedarf bei einer Erzeugung über eine Elektrolyse-Anlagen erneuerbaren Strom. Daher werden im Zuge der Machbarkeitsstudie die Beschaffungsoptionen hierfür analysiert.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Strombeschaffung zum Betrieb des Elektrolyseurs. Eine Variante ist der Einkauf der nötigen Strommengen direkt an der Strombörse EEX. Die Beschaffungspreise an der Börse schwanken viertelstündlich je nach Angebot und Nachfrage und lagen im Jahr 2024 bei durchschnittlich 7,6 ct/kWh.

Neben dem Börsenhandel kann anteilig der benötigte Strom über direkte Lieferverträge, sogenannte Power Purchase Agreements (PPA) beschafft werden. Dabei wird vertraglich zwischen Stromerzeuger und Verbraucher die Lieferung und Abnahme des Stroms geregelt. Der Vertrag kann eine vollständige Abnahme des produzierten Stroms aus einer konkreten Anlage beinhalten oder die kontinuierliche Belieferung der geforderten Strommenge für den Verbraucher. Die jeweils zusätzlich erzeugten oder fehlenden Energiemengen müssen anderweitig beschafft bzw. weiterverkauft werden. Die Preise für den gelieferten Strom können individuell vereinbart werden, wobei ein fester Arbeitspreis bei Gesamtabnahme der erzeugten Energie typisch ist. Dies schafft Planungssicherheit für beide Seiten. Für den

beispielhaften Betrieb eines Elektrolyseurs könnten auch mehrere Lieferverträge mit verschiedenen Anlagenbetreibern abgeschlossen werden.

In beiden Varianten muss die nötige Strommenge über das öffentliche Stromnetz transportiert werden. Dabei fallen in der Regel Netzentgelte für die Netzdurchleitung, die Stromsteuer und weitere Abgaben an. Wird der Strombezug für die Elektrolyse nach den Kriterien der 37.BImSchV gesichert, können die Netzentgelte, sowie Stromsteuern entfallen. Für die Wirtschaftlichkeit ist dies besonders relevant. Eine Übersicht über die Anforderungen für die Herstellung von grünem Wasserstoff liefert Abbildung 15.

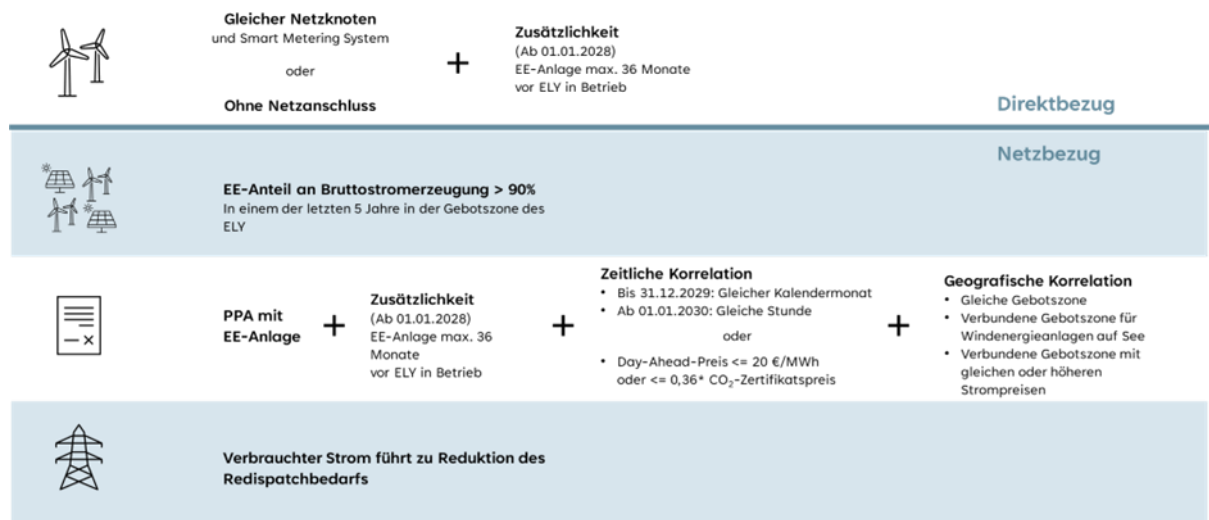


Abbildung 15: Strombezugsanforderungen für die grüne Wasserstoffherzeugung

Quelle: Eigene Bearbeitung in Anlehnung an (FfE 2023); 37. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

Grundsätzlich wird für die Beschaffungsoptionen zwischen einem Direktbezug und einem Netzbezug unterschieden. Bei einem **Direktbezug** muss ein gleicher Netzknoten inkl. Smart Metering System oder kein Netzanschluss an ein öffentliches Stromnetz vorliegen. Ab 01.01.2028 müssen zudem alle Erneuerbare Energien-Anlagen (EE-Anlagen) maximal 36 Monate vor der Elektrolyse in Betrieb gegangen sein.

Bei einem **Netzbezug** gibt es drei Möglichkeiten. Eine Möglichkeit ist der reine Netzbezug. Hierfür muss der EE-Anteil an der Bruttostromerzeugung in einem der letzten 5 Jahre in der Gebotszone des Elektrolyseurs größer als 90 % gewesen sein. Eine zweite Möglichkeit ist der vertragliche Abschluss eines PPA mit einer EE-Anlage. Hierfür müssen jedoch drei Prinzipien eingehalten werden. Ab 01.01.2028 müssen alle EE-Anlagen, die mit einem PPA genutzt werden, maximal 36 Monate vor der Elektrolyse in Betrieb gegangen sein. Bis 31.12.2029 dürfen die Strommengen bilanziell im Kalendermonat bereitgestellt werden. Ab 01.01.2030 muss eine stundengenaue Zuordnung erfolgen, außer wenn der Day-Ahead-Preis der Strombörse unter 20 €/MWh liegt. In diesem Fall kann der Betreiber bilanziell den Strom seines PPAs beziehen. Die Strombilanz muss am Ende des Kalenderjahres jedoch ausgeglichen sein. Zu guter Letzt muss ein PPA in der gleichen Gebotszone sein. Von der Gebotszone wäre der Betreiber befreit, wenn er ein PPA von einer Windenergieanlage auf See bezieht, die in einer verbundenen Gebotszone ist oder

das PPA in einer verbundenen Gebotszone den gleichen oder höheren Strompreis aufweist, wie er in der gleichen Gebotszone ist. Die letzte Möglichkeit zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ist die Nutzung des Netzstroms, der zu einer Reduktion des Redispatchbedarfs führt. Unter Einhaltung dieser Anforderungen wird grüner Wasserstoff in Form von Renewable Fuel of Non-Biological Origin (RFNBO-Wasserstoff) erzeugt. Dieser RFNBO-Wasserstoff wird innerhalb der Europäischen Union als grüner Wasserstoff deklariert.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der **Direktlieferung** ohne Durchleitung durch das öffentliche Stromnetz. Dafür müssen ausreichende Erzeugungskapazitäten in unmittelbarer Nähe errichtet werden. Der Vorteil liegt wie auch bei den PPA's in der Planungssicherheit für beide Seiten. Dies ermöglicht sowohl dem Stromproduzenten als auch dem Verbraucher attraktivere Preise zu vereinbaren.

Für die Machbarkeitsstudie wird in dieser frühen Prozessphase kein konkretes Strombezugskonzept vorgeschlagen. Grundsätzlich gilt, dass ein zukünftiger Betreiber am freien Markt prüfen wird, welche PPA's für den projektspezifischen Anwendungsfall in Frage kommen. In der Regel ergänzen sich PPA's aus PV- und Windenergie sehr gut, da diese eine relativ gleichbleibende Verfügbarkeit im Jahresverlauf ermöglicht.

### ***Exkurs zum Thema regionaler, erneuerbarer Strom***

Beispiele für lokale Stromversorgung aus regenerativen Quellen konnte im Gespräch die Ökostrom Erzeugung Freiburg GmbH aufzeigen. Für Industriebetriebe in der Rheinebene wird die Stromversorgung beispielsweise für 11-12 ct/kWh durch eine Direktlieferung aus zwei Windanlagen angeboten. In dem Fall wird bereits eine Elektrolyseanlage eingesetzt um Überschussstrom insbesondere am Wochenende aufzunehmen und damit eine Netzeinspeisung zu vermeiden. Alle Anlagen der Ökostrom Freiburg tragen durch eine Beteiligung der Bürger und Unternehmen an der Investition auch zu lokaler Wertschöpfung und Akzeptanz bei. In den kommenden Jahren plant die Ökostrom Freiburg den Ausbau weiterer 40 Windkraftanlagen mit rund 150 MW-Leistung.

Auch die benachbarte PV-Anlage auf dem Dach des zentralen Kunstdepots stellt eine Option für die Strombeschaffung dar. Die Anlage wird derzeit als volleinspeisende Anlage nach EEG betrieben. Die bisherige Vergütung ist damit noch bis zum Jahr 2031 gesetzlich zugesichert. Danach können neue Vereinbarungen getroffen werden, wobei eine Vermarktung über PPAs oder auch eine Direktvermarktung mögliche Optionen darstellen. Mit einer jährlich erzeugten Strommenge von 230 – 260 MWh stellen die Erträge dieser Einzelanlage für den Bedarf des Elektrolyseurs (17 – 33 GWh/a) allerdings nur eine untergeordnete Rolle dar.

Darüber hinaus kommen Neuanlagen auf den größten Dachflächen im GIP Hochdorf für die Versorgung des Elektrolyseurs in Frage. So besteht beispielsweise auf den Dächern der Spedition Streck Transport GmbH ein Potenzial von ca. 1,5 MW<sub>p</sub>, wovon 430 kW<sub>p</sub> bereits in der Umsetzung sind. Die erzeugte Energiemenge wird höchstwahrscheinlich zu großen Teilen für den Betrieb von eigenen Ladestationen für BEV-LKW eingesetzt werden, jedoch könnten sich durch die besondere Rolle dieses Akteurs und die großen weiteren Dachpotenziale durchaus attraktive Vermarktungskonzepte ableiten lassen.



### 4.3 Ermittlung der Investitionskosten und wirtschaftlichen Kennzahlen im Betrieb

Die Wirtschaftliche Betrachtung des Vorhabens basiert auf der Dimensionierung in der Variante Mischversorgung anhand des mittleren Bedarfsszenarios.

Die Grundlagen der Berechnungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Als Betrachtungszeitraum wurden 15 Jahre bei einem Diskontierungszinssatz von 2 % gewählt. Preissteigerungen und Finanzierungskosten wurden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt nach der Annuitätenmethode, angelehnt an die VDI 2067. Für die Kostenansätze wurde auf die Erfahrungen aus anderen Projekten und bereits vorliegenden Richtpreisangeboten zurückgegriffen.

*Tabelle 3: Randbedingungen Wirtschaftlichkeitsrechnung*

Randbedingung	Wert
Betrachtungszeitraum	15 Jahre
Diskontierungszins	2 %
Preissteigerungen	0 %

Die Investitionskosten berücksichtigen folgende Anlagenbestandteile:

- Wasserstofftankstelle als Gesamtsystem inklusive Zapfstellen, Verdichter, Hochdruckspeicher, Schnittstelle zu Elektrolyseanlage in der Dimensionierung für 40 LKW,
- Trailerabfüllstation mit 2 Stellplätzen, einschließlich Anlagenperipherie, zusätzlicher Verdichtereinheit und Betonschutzwänden,
- Elektrolyseanlage in modularer Bauweise einschließlich Rückkühlwerke und Anlagenperipherie,
- Pufferspeicher für die Speicherung von Wasserstoff auf Niederdruckniveau
- Trafostationen für den Anschluss der Elektrolyseanlage,
- Kosten für die Anschlussleitung an das Wasserstoffnetz, sowie zur Heizzentrale Landwasser,
- Allgemeine Baumaßnahmen zur Erschließung des Grundstücks,
- Genehmigungskosten,
- Planungskosten (9 % der Investitionssumme),
- Sonstiges (Sicherheitsaufschlag von 10 %).

Die Gesamtinvestitionskosten belaufen sich auf rund 18,7 Mio €. Die größten Anteile davon entfallen mit jeweils ~ 5 Mio € auf den Elektrolyseur und die Tankstellenkomponenten selbst. Der nächste größere Kostenpunkt entsteht für die Wasserstoffleitung und Trailerfüllstation. Auf unter 2 Mio € wird die Wärmetrasse zur Abgabe von Abwärme an das nahegelegene Wärmenetz bemessen.

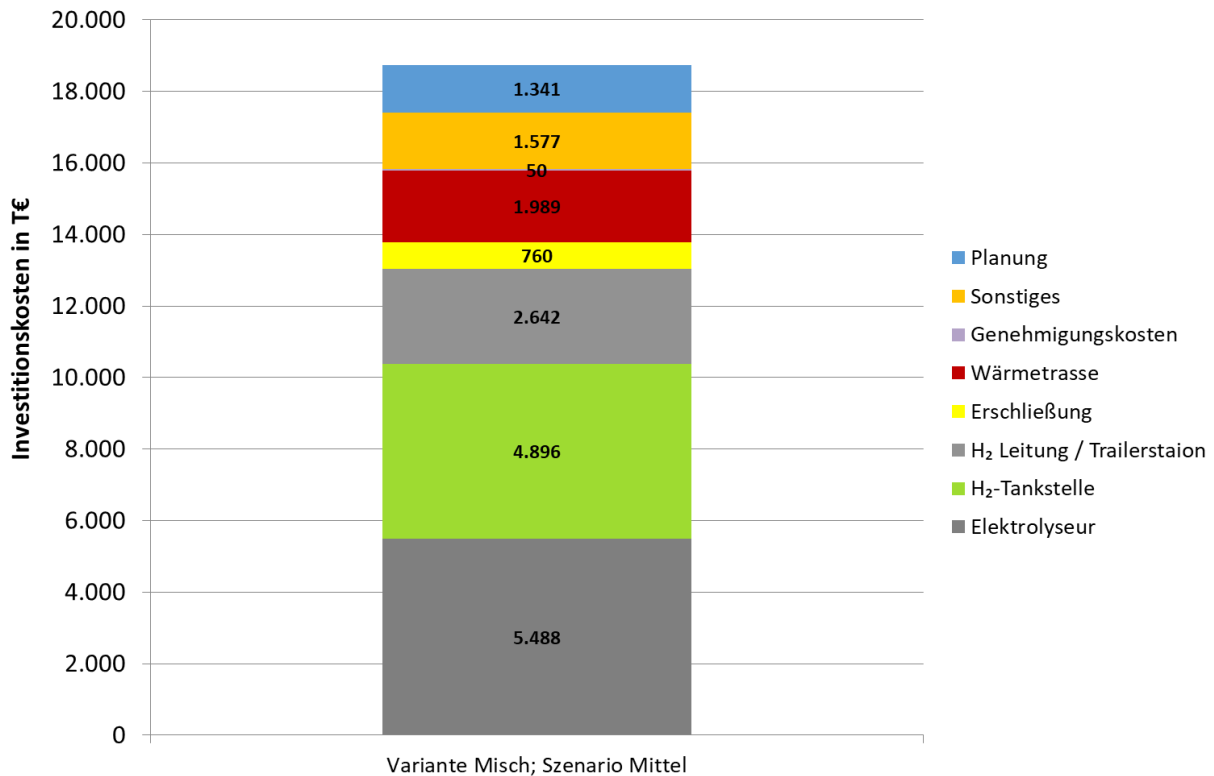


Abbildung 16: Investitionskosten (netto)

Auf den Betrachtungszeitraum aufgeteilt ergibt sich aus den Investitionskosten eine jährliche Annuität von 1,2 Mio €/a. Dies ist in Abbildung 17 durch die linken Balken dargestellt. Zu den kapitalgebundenen Kosten (bedingt durch die Investitionskosten) kommen jährlich anfallende Kosten für den Betrieb der Anlagen. Die betriebsbedingten Kosten, wie Versicherung, Personal, Geländepacht, Reparatur und Wartung der Anlagen fallen mit einer Annuität von ca. 400.000 €/a vergleichsweise gering aus. Den größten Kostenanteil über die Betrachtungszeit nehmen die bedarfsgebundenen Kosten ein. Mit einer Annuität von 3,5 Mio €/a fallen 67% der Jahresgesamtkosten auf diese Kostengruppe. Darin wiederum liegt der entscheidende Anteil mit 2,6 Mio €/a (76 %) in der Strombeschaffung für den Elektrolyseur. Eine Elektrolyse zur Erzeugung von grünem Wasserstoff ist derzeit von nahezu allen relevanten Steuern, Abgaben und Umlagen beim Strompreis befreit. Die Stromkosten leiten sich daher maßgeblich von den PPA-Preisen ab. In der Studie wird in einer Kombination von PV- und Windkraft-Strom von einem Strompreis von ca. 7 Cent pro kWh (ct/kWh) ausgegangen. Der restliche Strombedarf der Anlagenperipherie wird mit einem Industriestrompreis von 22 ct/kWh angenommen. Eine Übersicht der getroffenen Preisannahmen findet sich im Anhang in Tabelle 7.

Auf der rechten Seite der Darstellung von Abbildung 17 sind die resultierenden Jahresgesamtkosten in rot darstellt, die sich nach Abzug der Gutschriften für Förderungen und den Erlösen aus der Wärmeauskopplung ergeben. Für die Förderung ist eine optimistische Annahme getroffen worden, in der alle Komponenten der Wasserstoffinfrastruktur (Tankstelle, Elektrolyse und Wasserstoffleitung) mit 50 % der Investitionskosten bezuschusst werden. Grundlage dafür kann gegebenenfalls eine Förderung aus den Beantragungen der „3H2“-Initiative für das Hydrogen-Valley Südbaden sein, wonach 45 % der Investitionskosten gefördert werden können. Ebenso kann eine Orientierung an dem Förderaufruf des Bayerischen

Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie dienen, welches ebenso bis zu einer Gesamthöhe von 5 Mio € einen Förderzuschuss in Höhe von 45 % der Investition in die Hauptkomponenten vorsieht. Es ist zu erwarten, dass sich ein zukünftiges Förderprogramm in Baden-Württemberg an diesem Programm orientieren wird.

Darüber hinaus können 40 % Investitionsförderung aus der Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) für die Verlegung der Wärmetrasse angenommen werden. Daraus ergibt sich ein theoretischer Förderzuschuss von bis zu 8,2 Mio € (Annuität: 639.000 €/a) für das Projekt. In ähnlicher Größenordnung wirken sich die Erlöse aus dem Verkauf von Abwärme über den gesamten Betrachtungszeitraum aus. Mit einer Annuität von 420.000 €/Jahr zeigt sich die Nutzung der Abwärme als weitere entscheidende Komponente zur Erreichung eines wettbewerbsfähigen Wasserstoffpreises im Projekt.

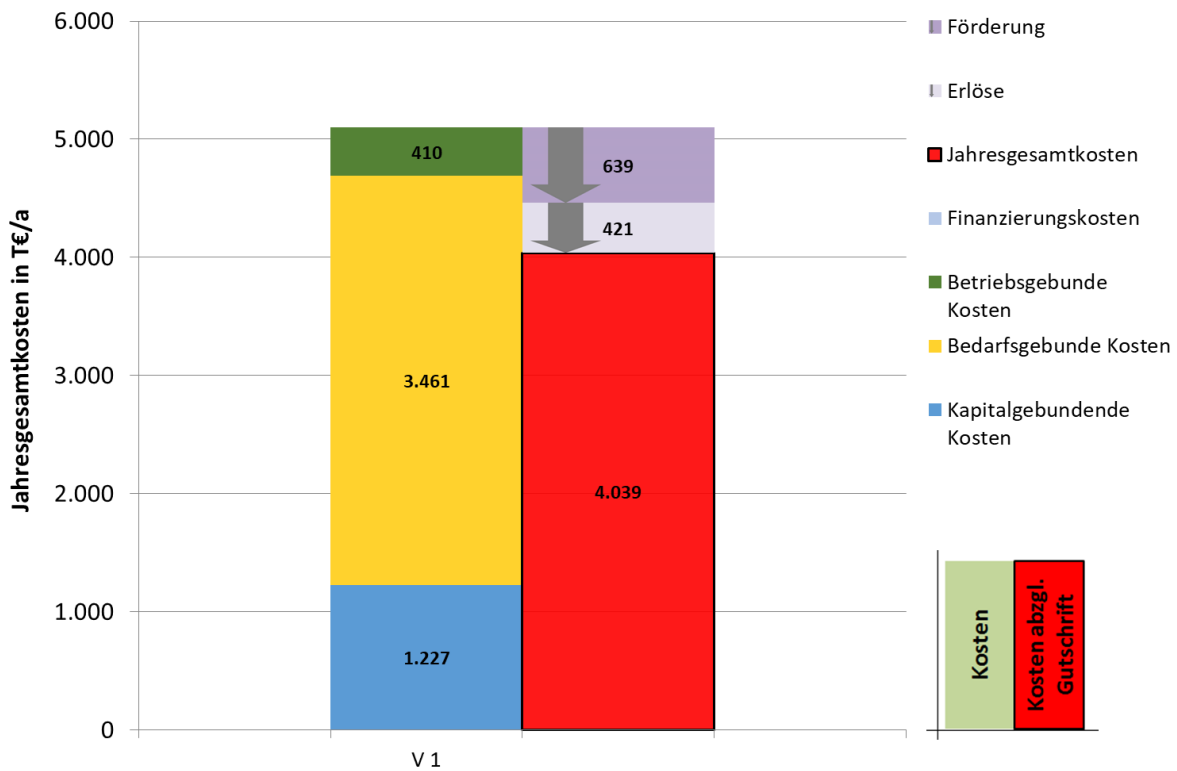


Abbildung 17: Jahresgesamtkosten (netto)

Aus den verbleibenden Jahresgesamtkosten kann auf die Wasserstoffgestehungskosten geschlossen werden. Diese entsprechen einer Mischkalkulation unter Berücksichtigung der Erträge aus Wärmeverkauf und Förderung. Die Gestehungskosten liegen für die getroffenen Annahmen bei 5,79 €/kg. Bei einer gesamten Gewinnmarge von 20 % resultiert ein Preis für den grünen Wasserstoff in Höhe von rund 8,30 €/kg (brutto). Unter Berücksichtigung von Projektunwägbarkeiten und der groben Kostenannahmen wird dieses Niveau als geeignet eingestuft, um einen Business-Case für die Vermarktung des grünen Wasserstoffs an einer Tankstelle im GIP Hochdorf zu erreichen.

Eine Sensitivitätsanalyse der wesentlichen Annahmen ermöglicht eine Einschätzung über die Aussagekraft der Ergebnisse und Unsicherheiten bei veränderlichen Rahmenbedingungen. Dabei wurden drei Parameter variiert:

- Der Strombezugspreis der Elektrolyse wurde um -1 bis +3 ct/kWh (-14 % bis + 43 %) variiert.
- Der Wärmeverkaufspreis wurde um  $\pm 2,5$  ct/kWh ( $\pm 50$  %) variiert.
- Der Einfluss der Förderung wurde durch eine Variation ohne Förderzuschüsse dargestellt.

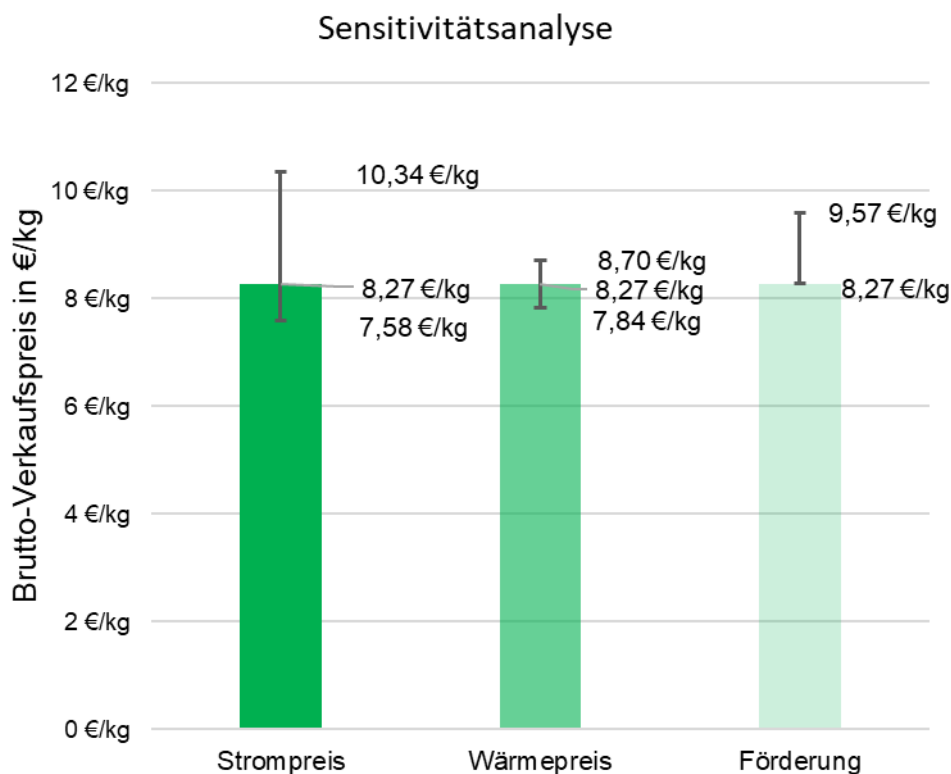


Abbildung 18: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse verschiedener Einflüsse auf den Brutto-Verkaufspreis des erzeugten Wasserstoffs.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass sich der Business-Case auch im Rahmen der untersuchten Parametervariation positiv darstellen lässt und das Projekt daher gute Voraussetzungen aufweist, im GIP Hochdorf das Angebot einer Wasserstoffbetankung für den Schwerlastverkehr zu errichten. Ein besonderes Augenmerk ist demnach auf eine günstige Strombeschaffung für den Elektrolyseur zu legen, aber auch die Förderungen haben einen relevanten Einfluss. Die Variation des Wärmepreises hingegen hat einen eher untergeordneten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

*Tabelle 4: Wasserstoffverkaufspreis nach Sensitivitäten (Obergrenzen, Bruttopreise)*

	Verkaufspreis in €/kg	Verkaufspreis in €/MWh
Grundbetrachtung	8,27 €/kg	248 €/MWh
Ohne Förderung	9,57 €/kg	287 €/MWh
Bei Stromkosten von 10 ct/kWh	10,34 €/kg	310 €/MWh

## 5 Vorbereitung der Umsetzungsphase

Um die nächsten Schritte zur Umsetzung des Vorhabens vorzubereiten, sind bereits in der Machbarkeitsstudie wichtige Schlüsselakteure zu identifiziert worden und die Absicht formuliert, ein Projektteam aufzustellen. So kann durch eine frühzeitige Koordination ein effektiver Übergang in die Projektentwicklung und die nötige Bereitschaft zur Mitwirkung erreicht werden. Ebenso wichtig ist die Aufstellung eines ersten Zeitplans für die Fortsetzung der nächsten Schritte im Planungsablauf.

### 5.1 Identifizierung eines Projektteams für die Umsetzungsphase

Aus den relevanten Akteuren wurde ein Kernteam definiert, welches als zentrale Interessensgemeinschaft aktiv zu einem Erfolg des Projektes beitragen kann. Die wichtigen Akteure für die aktive Umsetzung wurden bereits auf verschiedene Weise in den bisherigen Ablauf eingebunden. So wurden schon im Vorfeld zu dieser Machbarkeitsstudie mit einigen der unten genannten Akteure Gespräche geführt, die sich auch bereits durch einen Letter of Intent für die Unterstützung des Vorhabens ausgesprochen haben. Außerdem wurden weitere Akteure im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie identifiziert. Durch den Workshop, aber auch in Form von zahlreichen Einzelgesprächen wurden die bisherigen Überlegungen bereits besprochen und die weitere Mitwirkungsbereitschaft erfragt. Eine Zusammenfassung einiger relevanter Gespräche sind in Kapitel 6.2 zu finden.

Als Initiator und Koordinator kann das Umweltschutzamt Freiburg die erstellte Machbarkeitsstudie über die weiteren Projektphasen begleiten. Zusätzlich sind weitere Schlüsselakteure nötig, die in Tabelle 5 aufgelistet sind.

*Tabelle 5: Darstellung eines möglichen Kernteams zur Umsetzung der Wasserstofftankstelle im GIP Hochdorf*

<b>Akteur</b>	<b>Rolle in der Projektentwicklung</b>
Umweltschutzamt Freiburg	Entwicklungsmanagement seitens der Stadtverwaltung
ITG	Fördermittelverwaltung, Vernetzung regionaler Akteure
Spedition Streck Transport GmbH	Grundstückseigner, zentraler H <sub>2</sub> -Verbraucher
badenovaNETZE	Netzanschlüsse Strom und H <sub>2</sub>
FWTM	Netzwerker, Wirtschaftsförderer

In einem erweiterten Kreis ist die regelmäßige Einbeziehung an der Projektentwicklung der in Tabelle 6 genannten Partner zu empfehlen.

Tabelle 6: Übersicht der erweiterten Akteure, die im Umfeld der Umsetzung einbezogen werden sollten

Akteur	Rolle in der Projektentwicklung
Götz Transport GmbH	Spediteur mit Ambitionen in H <sub>2</sub> ; gemeinsame Fahrzeugbeschaffung für den Probetrieb
Spedition Gschwander	Spediteur mit Ambitionen in H <sub>2</sub> ; gemeinsame Fahrzeugbeschaffung für den Probetrieb
Regierungspräsidium Freiburg Stadt Freiburg	Genehmigungsverfahren
IHK Südlicher Oberrhein	Netzwerker
Klimapartner Südbaden	Netzwerker

## 5.2 Zeitlicher Ablauf der nächsten Schritte zur Umsetzung des Vorhabens

Nachdem die grundlegende technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit des Vorhabens aufgezeigt werden konnte und auch mögliche Akteure dem Vorhaben wohlwollend gegenüberstehen, können die nächsten Schritte zur weiteren Projektentwicklung angestoßen werden. In einem ersten Schritt sind die willigen Schlüsselakteure zu einem Kernteam zusammenzustellen. Dies kann federführend durch das Umweltschutzamt der Stadt Freiburg koordiniert werden und sollte zeitnah im ersten Quartal 2025 erfolgen. Anschließend ist die Unterstützung der Trinationalen Wasserstoffinitiative „3H2“ über die ITG anzustreben, um anstehende Planungsaufgaben in dem Vorhaben in dem aktuell in Vorbereitung befindlichen Förderantrag zum Aufbau des Hydrogen Valley Südbaden zu integrieren. Damit kann sowohl die strategische Einbindung in das regionale Gesamtkonzept als auch die finanzielle Unterstützung der anfallenden Investitionen durch Fördermittel erreicht werden.

Ebenso hilfreich und anzustreben sind verbindliche Zusagen der Schlüsselakteure zur Nutzbarkeit der untersuchten Potenzialfläche und Anschaffung von ersten H<sub>2</sub>-LKW für dieses Vorhaben. Zudem sind im Rahmen einer Marktaktivierung potenzielle Betreiber anzufragen und zu bewerten.

Anschließend können auf Basis dieser Machbarkeitsstudie konkrete Planungen der Anlage folgen und die nötigen Unterlagen für das vereinfachte Verfahren nach 4.BImSchV zusammengestellt werden.

Nach Erteilung der Genehmigung kann in die Umsetzungsphase der nötigen Bauarbeiten übergegangen werden. Da für die Planung und Vorbereitung des Genehmigungsverfahrens ca. 6 Monate einzuplanen sind und für das vereinfachte Verfahren 3 Monate vorgeschrieben werden, ist einschließlich der Errichtung bis zur Inbetriebnahme ein Zeitraum von mindestens 2 Jahren einzuplanen.

## 6 Stakeholder Einbindung

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden zahlreiche Gespräche mit relevanten und möglichen Akteuren geführt. Dabei wurde bereits in der Bedarfsabfrage deutlich, dass die Speditionen hinsichtlich ihrer Strategieentwicklung stark unterschiedlich aufgestellt sind. Während Einzelne das Thema nachhaltiger Antriebe bisher nicht betrachtet haben und dem auch aktuell nicht offen gegenüberstehen, haben andere Betriebe, besonders im Kurzstreckeneinsatz bereits klare Vorstellungen zur Dekarbonisierung ihrer Fahrzeugflotte entwickelt. Wasserstofffahrzeuge kommen bei diesen Betrieben nur in Ausnahmefällen zum Einsatz. Betreiber von Schwerlastfahrzeugen im Fernverkehr sehen dagegen den Einsatz von Wasserstoff als einen Teil der Lösung, zögern aber in einer Entscheidung für diese Strategie. Der Grund liegt darin, dass die nötige Infrastruktur bisher kaum vorhanden und Wasserstofffahrzeuge bei den Herstellern weniger ausgereift sind als die batterieelektrischen Varianten. Trotzdem kommt dieser Technologie eine hohe Aufmerksamkeit zu, was an den kurzen Betankungszeiten und den voraussichtlich höheren Reichweiten der Fahrzeuge im Vergleich zu BEV liegt.

### 6.1 Workshop mit den lokalen Akteuren im GIP Hochdorf

Auf die Fragen dieser potenziellen H<sub>2</sub>-Abnehmer sollte unter anderem beim Akteursworkshop am 16. Oktober 2024 eingegangen werden. Dieser wurde in den Räumlichkeiten der Firma Streck Transport GmbH im Gewerbe- und Industriepark Hochdorf abgehalten. Gastgeber waren Herr Kron von der Initiative Green Industry Park und Mitarbeiter des Umweltschutzamtes der Stadt Freiburg sowie Herr Penner, Geschäftsführer der Firma Streck Transport GmbH. Der Workshop informierte die verschiedenen anwesenden Stakeholder über aktuelle Entwicklungen, Perspektiven und Herausforderungen im Rahmen der vorliegenden Machbarkeitsstudie.

Die Präsentation von EGS plan führte die Teilnehmer in den aktuellen Sachstand des Projektes ein.

Anschließend beleuchteten Stephanie Wagner und Dr. Volker Banhardt von e-mobil BW die aktuellen Optionen und Herausforderungen bei der Beschaffung von BEV und FCEV sowie deren Marktentwicklung und Reichweiten. Ein Schwerpunkt lag auf der Analyse der verfügbaren Modelle und deren Eignung für unterschiedliche Transportaufgaben, insbesondere im Schwerlastverkehr.

Batterieelektrische Fahrzeuge sind bereits heute in Kleinserie verfügbar und werden vor allem im Regionalverkehr als praxistaugliche Option angesehen. Zu den führenden Herstellern gehören Volvo, Daimler und MAN. Die Reichweiten dieser Fahrzeuge betragen typischerweise 200 bis 300 km, was sie für den Verteilerverkehr und kurze bis mittlere Strecken geeignet macht. Neuere Entwicklungen versprechen Reichweiten von bis zu 600 km, deren Verfügbarkeit ab 2024/2025 zu erwarten ist. Trotz der Fortschritte bleiben die Ladezeiten ein zentraler Aspekt, der die Betriebsabläufe beeinflusst. Zudem ist die Ladeinfrastruktur, insbesondere für Schwerlastfahrzeuge, noch nicht flächendeckend verfügbar, was die Nutzung batterieelektrischer Fahrzeuge einschränkt.

Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge zeichnen sich vor allem durch größere Reichweiten und kurze Betankungszeiten aus. Dies macht sie insbesondere für den Fernverkehr und Langstrecken attraktiv.



Die aktuelle Modellpalette umfasst Fahrzeuge, die mit Reichweiten von 450 bis 800 km ausgestattet sind. Diese Fahrzeuge nutzen gasförmigen Wasserstoff, der unter zwei unterschiedlichen Druckstufen gespeichert wird:

- **350 bar**  
Diese Druckstufe wird vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen im Bereich Logistik und Schwerlastverkehr eingesetzt. Der Vorteil liegt in den etwas niedrigeren Anforderungen an die Tankinfrastruktur und die geringeren Betriebskosten.
- **700 bar**  
Diese Druckstufe ist primär für leichtere Nutzfahrzeuge und Pkw konzipiert, da sie eine größere Energiedichte ermöglicht und somit längere Reichweiten bei gleichem Tankvolumen bietet. Für den Schwerlastverkehr ist sie weniger verbreitet, könnte jedoch zukünftig an Bedeutung gewinnen.

Ein weiteres Entwicklungsfeld ist die Nutzung von flüssigem Wasserstoff. Dieses Konzept ermöglicht Reichweiten von bis zu 1.000 km und wird für den Fernverkehr und Langstrecken bevorzugt. Flüssiger Wasserstoff erfordert jedoch eine aufwendigere Infrastruktur, da die Tanks stark gekühlt und isoliert sein müssen, um die Verflüssigung des Wasserstoffs aufrechtzuerhalten.

Die Verfügbarkeit wasserstoffbetriebener Nutzfahrzeuge ist noch begrenzt, da viele Modelle sich in der Feldtestphase befinden. Die Serienfertigung wird jedoch ab 2025 erwartet, was eine größere Marktverfügbarkeit und Kostensenkungen in Aussicht stellt.

Die Wahl zwischen batterieelektrischen und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen hängt neben den Kosten maßgeblich von den Einsatzanforderungen ab. Während BEVs in naher Zukunft vor allem im Regionalverkehr dominieren könnten, zeichnen sich neben BEVs auch FCEVs als Lösung für den Fernverkehr ab. Dabei wird die Skalierung von Infrastruktur und Fahrzeugangebot entscheidend für die breite Einführung sein.

Ergänzend zu den Antriebstechnologien stellte Michael Kolb von der Mint Hydrogen Germany GmbH seine Erfahrungen und Herausforderungen für den Aufbau von Wasserstoffbetankungsstrukturen vor. Bei der Standortwahl können verschiedene Kriterien berücksichtigt werden. Geeignet sind sowohl Unternehmensgelände als auch Plätze in Autobahnnähe oder als urbane und suburbane Mobility-Hubs errichtete Anlagen. Dabei kann besonders eine erweiterte Zielgruppe aus verschiedenen Verkehrsträgern wie ÖPNV, Werkverkehr, Systemverkehren und Flughafenbussen zur wirtschaftlichen Auslastung beitragen. Durch eine strategische Integration in bestehende Infrastrukturen, wie Autohöfe oder regionale Logistikdrehkreuze, sollen Synergien in der Raumnutzung an zentralen Infrastrukturknoten erreicht werden.

Aktuell plant Mint Hydrogen mehrere Wasserstofftankstellen in Baden-Württemberg. Die Projekte werden teilweise durch das Land Baden-Württemberg und den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert, wobei die Inbetriebnahmen bis 2026 erwartet werden.

Die zentralen Herausforderungen dabei liegen in Regulatorischen Rahmenbedingungen, Wirtschaftlichen Risiken aufgrund der hohen Kosten für grünen Wasserstoff, Flächenverfügbarkeit, langwierigen Genehmigungsprozessen aber auch unterschiedlichen Betankungstechnologien und noch in Entwicklung befindlichen internationalen Standards.

Während der anschließenden Diskussion wurde die Umstellung von Diesel auf batterieelektrische oder wasserstoffbetriebene Fahrzeuge als besondere Herausforderung der Branche benannt. Die Logistikbranche steht vor der Aufgabe, Technologie, Fuhrpark und Infrastruktur in kurzer Zeit nahezu vollständig zu erneuern. Hemmnisse für den Einsatz von Wasserstofffahrzeugen wurden vor allem in der bisher schlechten Verfügbarkeit von Fahrzeugen und Betankungsinfrastruktur gesehen. Auch eine lokale Tankstelle kann den fehlenden Ausbau in der Fläche für den intereuropäischen Fernverkehr nicht ausgleichen. Für den Aufbau der Infrastruktur beginnend mit Fahrten, die planbar im GIP Hochdorf starten und enden und damit zur Überwindung dieses Henne-Ei-Problems kann es aber einen entscheidenden Beitrag leisten. Bei der Einführung von neuer Technologie mit neuen Anforderungen an Betrieb und Wartung ist außerdem ein Probetrieb mit einzelnen Fahrzeugen sinnvoll. So können risikoarm Erfahrungen gesammelt werden, ohne bestehende Lieferverträge und daraus resultierende Vertragsstrafen zu riskieren. Ein Vorschlag bestand darin, dass sich mehrere Spediteure mit der Anschaffung jeweils einzelner Fahrzeuge gleichen Modells zusammenschließen können. So wird das Risiko gestreut und gleichzeitig der Aufwand für den Aufbau von KnowHow in Wartung und Betrieb gebündelt.

Bezüglich der batterieelektrischen Alternativen wurden Themen wie die Stromversorgung für BEV-Ladestrukturen sowie die notwendige Anpassung der Betriebsabläufe intensiv diskutiert. Die Teilnehmer betonten, dass auch der Platzbedarf für Ladeinfrastrukturen der BEV eine Rolle spiele, wenn Platz für zusätzliche Ladeplätze benötigt wird. Der zusätzliche Platzbedarf entsteht daraus, dass ein Ladeplatz nicht gleichzeitig als Parkplatz dienen kann, weil das Fahrzeug zur Einhaltung der Pausenzeiten von Fahrern zu lange am Ladeplatz stehen müsste. Dies verschärft die bereits sehr angespannte Platzdebatte. Auch die Netzkapazität spielt eine entscheidende Rolle, insbesondere im GIP Hochdorf, wo bereits Betriebe für die Installation zusätzlicher Lasten auf eine Erweiterung der Netzleistung innerhalb der nächsten Jahre angewiesen sind.

Die Herkunft des Wasserstoffs war ein weiterer Schwerpunkt. Produzierende Unternehmen sind durch gesetzliche Vorgaben wie die CSAD-Richtlinie verpflichtet, CO<sub>2</sub>-Neutralität in Ihrer gesamten Produktion (Scope 1-3) anzustreben. Da dies auch den Warentransport einschließt, werden die ersten Maßnahmen häufig über die Lieferverträge an die Transportunternehmen ausgelagert. Dies stellt hohe Anforderungen an den schnellen Aufbau einer nachhaltigen Infrastruktur und setzt die Branche zusätzlich unter Druck. Für die Herkunft des verwendeten Wasserstoffs wurde ein schrittweiser Ansatz als sinnvoll erachtet: Zunächst sollen verfügbare Kapazitäten verschiedener Quellen genutzt werden, um die Infrastruktur aufzubauen, während die Umstellung auf grünen Wasserstoff anschließend bis 2040 erfolgen muss.

Für die Umsetzung einer Wasserstofftankstelle wurde deutlich, dass eine kritische Mindestmenge an Fahrzeugen für den wirtschaftlichen Betrieb notwendig ist. Einzelne Spediteure signalisierten Bereitschaft für einen Testbetrieb mit wenigen Fahrzeugen. Nach dieser Bewährungsprobe könnte im Rahmen einer anschließenden Skalierung innerhalb von 4-5 Jahren ein relevanter Anteil der Fahrzeugflotte umgestellt werden. Damit wäre zur Erreichung eines wirtschaftlichen Betriebs zumindest in der Hochlaufphase noch zusätzliche Nachfrage aus dem Umland nötig. Eine Option dafür wäre ein direkter Autobahnanschluss des Standorts GIP Hochdorf, was den Standort insgesamt attraktiver machen würde. Ebenso können durch das gezielte Angebot einer 700 bar Zapfstelle auch PKW adressiert werden und gleichzeitig die Flexibilität

erhalten bleiben, wenn sich die 700 bar Technologie zukünftig auch im Schwerlastverkehr durchsetzt.

Die Diskussionen des Workshops verdeutlichten die Notwendigkeit einer strategischen und koordinierten Transformation hin zu nachhaltigen Antriebskonzepten und die bedeutende Rolle von Wasserstoff in der langfristigen Entwicklung des GIP Hochdorf.

Die aktive Teilnahme aller wesentlichen Akteure, wie Speditionen, Netzbetreiber, Wirtschaftsförderung, Tankstellenbetreiber, Stadt Freiburg lässt die Schlussfolgerung zu, dass ausreichend Bereitschaft zur Umsetzung des Vorhabens in allen beteiligten Rollen vorhanden ist.

## 6.2 Zusammenfassung weiterer Gespräche im Rahmen der Machbarkeitsstudie

Weitere Gespräche im Umfeld des Projektes werden im Folgenden zusammengefasst:

**Spedition Karldischinger und Gschwander** sind als „3H2“ Mitglieder an der Thematik generell sehr interessiert. Daher besteht Interesse im Rahmen von Abstimmungsterminen zu einem Erfahrungsaustausch beizutragen. Die Firma Karldischinger hat zwar einen Standort im GIP Hochdorf, betreibt aber keine Fahrzeugflotte vor Ort die einen Bedarf an Wasserstoff hervorrufen könnte. Herr Gschwander äußerte im Gespräch, dass neben dem Erfahrungsaustausch auch die Unterstützung in der Hochlaufphase der Tankstelle durch Anfahren eines einzelnen LKW des Standortes denkbar wäre. Diese Option müsste in den folgenden Planungen nochmals aufgegriffen und konkretisiert werden. Beide Akteure sind durch ihr Engagement in der Thematik als positive Akteure nah am weiteren Prozess zu beteiligen.

Die **badenovaNETZE** erläuterte im Gespräch zur Lage und Entwicklung der verfügbaren Netzkapazitäten im GIP Hochdorf, dass die Leistungsreserve auf Grund gestiegener Anfragen für Ladesäulen und Wärmepumpen aktuell sehr angespannt ist. Die bestehenden Anfragen haben bereits konkrete Ausbaupläne in 2 Etappen initiiert. Zunächst werden in den nächsten 2-3 Jahren ca. 10 MW zusätzliche Kapazität errichtet, die allerdings fast vollständig bereits vergeben sind. Für eine weitere Erweiterung der Leistung ist der Neubau einer Umspannstation im GIP Hochdorf nötig. Im Gespräch wurde betont, dass die zentralen Hemmnisse für solche Vorhaben neben der Finanzierung auch die Verfügbarkeit geeigneter Grundstücke sind, die oft nicht freigegeben werden, wie auch lange Genehmigungsprozesse. In Hochdorf ist allerdings ein Grundstück verfügbar, wodurch eine Ausbauperspektive der elektrischen Anschlussleistung mit 63 MW voraussichtlich für das Jahr 2029/2030 besteht. Mit dieser perspektivischen Erweiterung der Anschlussleistung im Gewerbegebiet kann die Grundlage geschaffen werden, um die zukünftigen Leistungsbedarfe (E-Mobilität, Wärmepumpen, Elektrolyse, etc.) bedienen zu können.

Die **Firma Taifun Tofu** ist ein relevanter Wärmeverbraucher im GIP Hochdorf. Die Wärme wird als Prozessdampf benötigt. Wärmebedarfe niedrigerer Temperaturniveaus werden bereits weitestgehend aus Abwärmepotenzialen gedeckt. Trotzdem existieren noch weitere ungenutzte Potenziale, die in den nächsten Jahren nach und nach erschlossen werden sollen. Generell besteht Interesse, zukünftig überschüssige Abwärmemengen auch abzugeben. Hierzu bestanden bereits Gespräche mit benachbarten Betrieben. Sollte eine Wärmeleitung zur Einbindung der

Abwärme aus der Elektrolyse entstehen, wäre dies eine zusätzliche Option einer sinnvollen Abwärmenutzung.

Im Gespräch mit der **badenovaWÄRMEPLUS** zu den Möglichkeiten der Übernahme von Abwärme aus dem Elektrolyseur ergab sich, dass die nahegelegene Heizzentrale Landwasser aus den 60er Jahren aktuell aus einem Brennstoffmix aus Gas und Biomasse versorgt wird. In den nächsten Jahren werden diese Anlagen bereits saniert und durch die Einbindung von industrieller Abwärme der Cerdia GmbH entlastet. Perspektivisch werden die Feuerungsanlagen auf die Nutzung von grünen Gasen (Biomethan/H<sub>2</sub>) für die Spitzenlastdeckung umgerüstet. Eine Abnahme und Einbindung einer weiteren erneuerbaren Wärmequelle (Abwärme aus Elektrolyse) wäre an dieser Stelle denkbar.

Zur Einordnung des Vorhabens in die regionalen Bemühungen und Möglichkeiten einer Förderung fanden Abstimmungen mit Herrn Sommerhalter von der **ITG** statt, der für die Trinationale Wasserstoffinitiative „3H2“ aktiv ist und für Projekte im Rahmen des hydrogen Valley Südbaden bereits bewilligte Fördermittel in Höhe von 6,2 Mio € verwaltet und die Beantragung weiterer EU-Mittel vorbereitet. Ziel der Initiative ist, der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur als Rückgrat der wirtschaftlichen Strukturen in der grenzüberschreitenden Region Südbaden. Daraus ist unter anderem die Planung des RHYn-Interco-Projektes entstanden, was eine frühe Leitungsgebundene Wasserstoffversorgung in der Region ermöglicht. Die verfügbaren Fördermittel können für die Unterstützung von Investitionen in strukturelevante Wasserstoffinfrastrukturelemente eingesetzt werden. Dabei ist eine Förderquote von 45 % möglich. Die Verwendung kann ohne hohen formalen Aufwand geschehen, da die Mittel bereits bewilligt sind und durch die ITG verwaltet werden können. Als Idee stand bei dem Treffen im Raum, dass die Projektskizze der Wasserstofftankstelle im GIP Hochdorf für die Beantragung eines weiteren Förderprogramms in Höhe von 20 Mio € für die Region Südbaden in der Beantragung mit genutzt werden kann.

Möglichkeiten in der regionalen Strombeschaffung wurden mit der **Ökostrom Stromerzeugung Freiburg GmbH** besprochen. Das Unternehmen betreibt seit 40 Jahren Anlagen für Erzeugung von regenerativem Strom. Derzeit werden durch das Unternehmen 40 Windkraftanlagen und 140 PV-Anlagen in der Region betrieben. Bei allen Anlagen sind Finanzierungsmodelle mit Beteiligung der Bürger und Unternehmen umgesetzt, um die regionale Wertschöpfung und Akzeptanz zu fördern. Generell wurde die Versorgung der Elektrolyse-Anlage über lokal erzeugte Windenergie als realistisch beschrieben. Aus anderen Projekten der Versorgung von Industriekunden wurde berichtet, dass aus Windkraft erzeugte Strommengen in der Direktversorgung einen langfristigen Strompreis von 11-12 ct/kWh für den Kunden gewährleisten. Da die Anlage ohne Netzeinspeisung betrieben wird, indem Überschüsse vor allem am Wochenende durch einen Elektrolyseur aufgenommen werden, ist ein Betrieb auch in einem windschwachen Gebiet in der Rheinebene darstellbar.

Von der Freiburger **Stadtbau GmbH** wird die PV-Anlage auf dem Dach des zentralen Kunstdepots südlich der Parkplatzfläche betrieben. Die Anlage wird seit 12/2011 als volleinspeisende Anlage betrieben. Ab 2032 entfällt daher die bisherige Einspeisevergütung nach EEG, weshalb neue Vertriebswege zu finden sind. Nach der Aussage des Stadtbauamts bestehen bisher noch keine Pläne über die Vermarktung ab 2032. Eine Vermarktung der Energiemengen als PPA ist prinzipiell denkbar und die Unterstützung des Projektes in direkter Nachbarschaft auf diese Weise auch möglich. Allerdings werden die Erträge dieser Anlagengröße in einem Ausschreibungsverfahren vergeben werden müssen, weshalb eine rechtzeitige Bewerbung um diese Kapazitäten zu empfehlen ist.

## 7 Fazit

Die vorliegende Machbarkeitsstudie zeigt, dass der Standort im GIP Hochdorf geeignet ist, die Pläne einer Wasserstofftankstelle für den Schwerlastverkehr mit lokaler Wasserstofferzeugung weiterzuentwickeln. Die Bedarfsanalyse der ansässigen Unternehmen hat einen ausreichenden Bedarf ergeben und die lokalen Akteure haben Interesse bekundet diese Projektidee konstruktiv weiter begleiten zu wollen.

Die Planungen umfassen den Bau einer Tankstelle für bis zu 38 LKW-Betankungen pro Tag sowie die Errichtung eines 5-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs zur lokalen Produktion von grünem Wasserstoff. Ergänzend dazu soll eine Trailerstation und eine Anbindung an das regionale Wasserstoffnetz realisiert werden, das ab 2029 verfügbar sein soll. Diese Kombination ermöglicht eine flexible und zukunftsorientierte Versorgung mit grünem Wasserstoff.

Zusätzliche Standortvorteile ergeben sich durch die Möglichkeit zur Anbindung an leistungsstarke Netzinfrastrukturen. Ein Wärmenetz in erreichbarer Nähe kann anfallende Abwärme aufnehmen, der Anschluss an das Wasserstoffnetz kann zur Belieferung wie auch Aufnahme von Wasserstoff dienen. Die Netzanschlussleistung des Stromnetzes wird in den kommenden Jahren deutlich verstärkt, was die Produktionskapazität der Elektrolyseanlage skalierbar macht und damit zusätzlich zum Bedarf im GIP Hochdorf weitere Mengen an Wasserstoff für die Nutzung in der Region bereitgestellt werden könnte. Damit kann sich der GIP Hochdorf zu einer entscheidenden Drehscheibe für grünen Wasserstoff in der Region entwickeln.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt, dass niedrige Strompreise, eine hohe Auslastung des Elektrolyseurs und die Verfügbarkeit von Fördermitteln entscheidend für den Erfolg des Projekts sind. Durch den modularen Aufbau können Kapazitäten schrittweise erweitert werden, um den zukünftigen Bedarf zu decken.

Das Vorhaben hat die Chance den Wirtschaftsstandort im GIP Hochdorf zu stärken. Die Wasserstoffproduktion vor Ort erhöht die lokale Wertschöpfung und kann perspektivisch mit dem grünen Wasserstoff die Versorgung mit erneuerbaren Kraftstoffen unterstützen. Damit kann ein Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und -anforderungen der ansässigen Unternehmen, der Stadt Freiburg und für Akteure darüber hinaus geleistet werden.

## Literaturverzeichnis

- Energieatlas LUBW: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.). (o.J.). *Solarpotenzial auf Dachflächen*.  
<https://www.energieatlas-bw.de/sonne/dachflaechen/solarpotenzial-auf-dachflaechen>
- NOW 2023: NOW GmbH: Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßen-Güterverkehr. 2023.  
<https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/03/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Techn.-im-schweren-Strassengueterverkehr-BARRIEREFREI.pdf>
- BNA 2024 Bundesnetzagentur 2024: Wasserstoff-Kernnetz. Veröffentlichung der Karte zum genehmigten Wasserstoffkernnetz vom 22.10.2024  
<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html>(Abgerufen am 25.11.2024)
- badenovaNETZE badenovaNETZE: RHYn Interco: Wasserstoff für Baden-Württemberg. <https://badenovanetze.de/rhyn-interco/> (Abgerufen am 25.09.2024)
- badenovaWÄRMEPLUS badenovaWÄRMEPLUS: Wärmeverbund Freiburg-West. <https://www.badenovawaermeplus.de/waermeversorgung/waermeverbund-freiburg-west/> (Abgerufen am 25.09.2024)
- Streck 2024 Penner, G.: Bedarfsstruktur Streck Transport GmbH. persönliche Mitteilung am 30.09.2024
- FfE 2023: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.. (2023). *Wie ist grüner Wasserstoff laut dem Delegated Act der EU definiert?*. <https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/wie-ist-gruener-wasserstoff-laut-dem-delegated-act-der-eu-definiert/>
- EEX 2024 European Energy Exchange GmbH: EEX HYDRIX. <https://www.eex-transparency.com/de/wasserstoff/deutschland> (Abgerufen am 20.11.2024)
- H2.live 2024 H2 Mobility Deutschland GmbH: Wasserstofftankstellen in Deutschland und Europa. <https://h2.live/> (Abgerufen am 20.11.2024)

## Anhang

## Randbedingungen der Wirtschaftlichkeitsrechnung

Tabelle 7: Annahmen der Kosten und Preise für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

	Preisannahme
Stromverbrauch Elektrolyseur	7 ct/kWh
Stromverbrauch Nebenanlagen	22 ct/kWh
Frischwasser	2,13 €/m <sup>3</sup>
Abwasser	1,49 €/m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> -Import aus Netz ( <i>EEX 2024</i> )	8,30 €/kg
Wärmeverkaufspreis	5 ct/kWh (Übergabe bei 50 °C)
Sauerstoff Abgabepreis	Kein Verkauf
Geländepacht	3 % des Bodenrichtwertes/Jahr
Personalkosten	110.000 €/Jahr
Versicherungs- und Verwaltungskosten	100.000 €/Jahr

Tabelle 8: Investitionskostenansatz der Hauptkomponenten

Komponente	Dimensionierung	Spezifische Kosten	Absolute Kosten
Elektrolyseur	5 MW <sub>el</sub>	1.200 €/kW <sub>el</sub>	5.000.000 €
ND-Speicher	500 kg	761 €/kg	380.556 €
Trafo	2 Stück	250.000 €/Stück	500.000 €
Baumaßnahmen	2.500 m <sup>2</sup>	100 €/m <sup>2</sup>	250.000 €
Tankstelle für 40 LKW	1	4.800.000 €	4.800.000 €
Zusätzliche Infrastruktur zur Trailerbetankung	1	1.390.000 €	1.390.000 €
Wärmetrasse	1.500 m	1.300 €/m	1.989.000 €
H <sub>2</sub> -Trasse	800 m	1.500 €/m	1.224.000 €

## Teilnehmerliste des Workshops

Teilnehmer beim Workshop am 16.10.2024:

- Streck Transportgesellschaft mbH
- Götz Transport GmbH
- Fachspedition Karldischinger GmbH
- DHL (online)
- Stadt Freiburg, Umweltschutzamt
- EGS-plan
- ITG
- Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald
- Mint Hydrogen Germany GmbH
- E-mobil bw (online)
- badenovaNETZE