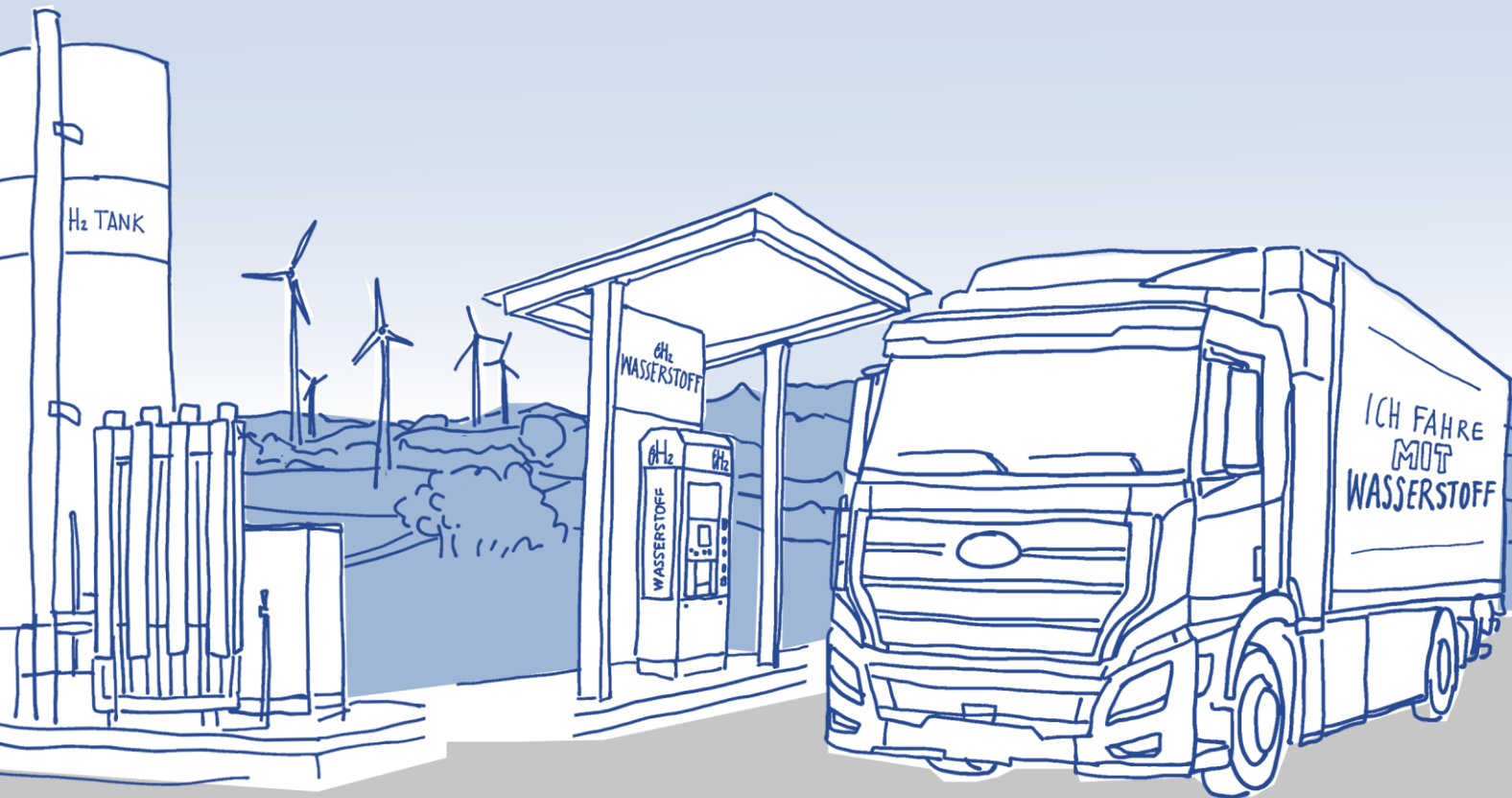




HYWHEELS

Wasserstoffbasierter Wirtschaftsverkehr in Osthessen
zur Einsparung von Emissionen in der Logistik und im
Straßenverkehr

Impressum

Erstellt im Auftrag von

Magistrat der Stadt Fulda
Stadtplanungsamt
Schlossstraße 1
36037 Fulda



Erstellt durch

Teil 1: H₂-Erzeugung / H₂-Infrastruktur:



Teil 2: H₂-Nutzung / Fahrplan:



Autoren

Infraserv GmbH & Co. Höchst KG

ABO Wind AG

ITM Power GmbH

Linde GmbH

EMCEL GmbH

H2 Energy AG

Hochschule Fulda

Hochschule RheinMain

MP Consulting Logistics and Operations

Sphaera Solutions GmbH

Dr. Sirko Ogriseck, Johanna Lesk, Tyrone Pfeifer

Tobias Aich, Dr. Thomas Nietsch, Gesa Mosch,
Susanne Wolf

Calum McConnell

Florian Knab, Thomas Gaksch,
Thomas Kurt Schäfer

Momoko Kristuf, Lena Maier

Viktor Carp, Urs Cabalzar

Prof. Dr. Boris Zimmermann

Prof. Dr. Manfred Loidold

Manfred Patzelt

Arved Schuster, Michael Faltenbacher

Datum: 30.09.2021

In der folgenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich das generische Maskulinum verwendet, Personen aller Geschlechteridentitäten sind hierbei gleichermaßen mitgemeint.

Die Entwicklung der Region Osthessen als Wasserstoffregion wird im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP2) mit insgesamt 300.000 Euro durch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur gefördert. Die Förderrichtlinie wird von der NOW GmbH koordiniert und durch den Projektträger Jülich (PtJ) umgesetzt.



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
1.1.	Grußwort der Stadt Fulda	2
1.2.	Projekt HYWHEELS	4
2.	Konzept auf einen Blick	7
2.1.	Ziel des Projekts	7
2.2.	Umsetzung und Zeitplan	7
3.	Region und die Rahmenbedingungen	11
3.1.	H ₂ -Erzeugung in Osthessen	11
3.2.	H ₂ -Infrastruktur in Osthessen	25
3.3.	H ₂ -Nutzung im Verkehrssektor	47
4.	Fahrplan zur Umsetzung	67
4.1.	Erläuterung des idealen Fahrplans zur Umsetzung	67
4.2.	Handlungsempfehlungen zur Umsetzung	73
5.	Die Vision	75
5.1.	Erst 1.000, was danach?	75
5.2.	Emissionsfreier Verkehr für ein klimafreundliches Europa	75
A.1.	Abkürzungsverzeichnis	77
A.2.	Abbildungsverzeichnis	79
A.3.	Tabellenverzeichnis	83
A.4.	Literaturverzeichnis	86
A.5.	Anlage H ₂ -Erzeugung und Infrastruktur	89
A.6.	Anhang H ₂ -Nutzung – Methodik und Rahmenbedingungen	106

1. Einleitung

1.1. Grußwort der Stadt Fulda

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Mitstreiterinnen und Mitstreiter,



vielfältig, leistungsfähig, ressourcenschonend, grün und nachhaltig – so soll die Zukunft der Mobilität in der Region Fulda und in der Bundesrepublik Deutschland aussehen.

Welche Möglichkeiten haben wir, nutzen wir alle Innovationen, wer sind die Akteure und welche Technologie hilft uns bei der Erreichung unserer gesteckten Ziele?

Neben dem Potenzial der Elektrifizierung des Individualverkehrs sehen wir in der Wasser-stoff- und Brennstoffzellen-Technologie gerade für den Bereich der Logistik und des Schwerlastverkehrs erhebliche Chancen hin zu einer klimaneutralen Transport- und Mobilitätsform.

Im Hinblick auf technische Innovationen, gesteckte Klimaschutzziele und der zentralen Lage der Region Fulda – unter anderem als „Logistiknotenpunkt“ – wurde die Stadt Fulda 2019 im Rahmen des HyLand-Förderprogramms des Bundesverkehrsministeriums mit einer Machbarkeitsstudie im Sinne des HYWHEELS Projektes betraut.

Durch Unterstützung und Begleitung, etwa der hessischen Landesenergie Agentur - LEA, der Nationalen Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – NOW, sowie weiteren regionalen wie überregionalen Partnern konnte das beauftragte Dienstleistungskonsortium eine Machbarkeitsstudie erstellen, die die Pfade hin zu einer wasserstoffbetriebenen Mobilitätsform im ost-hessischen Raum fest definiert.

Drei zentrale Fragen haben die Arbeit in der Workshop- und Projektphase bestimmt:

Welche Wasserstoffinfrastruktur benötigt unsere Region, wie kann „grüner Wasserstoff“ vor Ort erstellt werden und wer sind die ersten „first user“ in der Anwendung der neuen Antriebstechnologie in der Region?

Mit der Unterstützung zahlreicher Expertinnen und Experten wurden hierzu zentrale Handlungsfelder identifiziert und Projektideen für eine bessere und nachhaltige wasserstoffbasierte Mobilität in der Region aufgezeigt. Die Bürgerinnen und Bürger der Region, Systemanbieter von H₂-Hydrogen Stations, Hersteller von Zug- und Transportfahrzeugen, Speditionen und Logistiker, Energieversorger und weitere haben sich im Rahmen mehrerer Online-Dialoge und Workshops beteiligt und ihre Ideen in den Prozess eingebracht.

Es gilt nun die richtigen und nachhaltigen Schritte hin zu einer wasserstoffbetriebenen Schwerlastmobilität in Osthessen zu gehen und sowohl Akteure auf der Angebots- wie Nachfrageseite der entsprechenden Technologie für die Region zu begeistern. Nur gemeinsam können wir die Chancen der neuen, zukunftsfähigen Mobilität von morgen nutzen.

Deshalb werden wir die Projektstudie mit all ihren erhobenen Daten, Fakten, Analysen und Machbarkeitspfaden u.a. im Internet unter <https://www.fulda.de/unsere-stadt/klima-natur-umwelt/klimaschutz/hywheels.html> sowie weiteren Medien und Portalen Interessierten zur Verfügung stellen.

„Wenn Du schnell gehen willst, dann gehe alleine. Wenn Du weit gehen willst, dann gehe in Gemeinschaft“. Im Sinne dieses afrikanischen Sprichwortes danke ich allen Mitstreiterinnen und Mitstreitern für die konstruktive Arbeit und hege die Hoffnung, dass viele innovations-getriebene Akteure zeitnah das Konzept vom der theoretischen in die praktische, nutzbare Umsetzungsphase des wasserstoffbetriebenen Verkehrs überführen.

Ihr



Daniel Schreiner
Stadtbaurat der Stadt Fulda

1.2. Projekt HYWHEELS

1.2.1. Hintergründe zum Projekt

Im Rahmen des Wettbewerbes „HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur haben sich 2019 über 40 Akteure zusammengeschlossen und ein Grobkonzept in der Kategorie HyExperts eingereicht. Inhalt des Grobkonzepts ist der Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft in Osthessen mit dem Ziel der Einführung von 1.000 Brennstoffzellen (BZ)-Fahrzeugen. Aus dem Grobkonzept ist das Projekt HYWHEELS – wasserstoffbasierter (Hy) Wirtschaftsverkehr in OstHessen zur Einsparung von Emissionen in der Logistik und im Straßenverkehr – entstanden.

Das Grobkonzept wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Weiterentwicklung auserwählt und erhielt eine Förderung von 300.000 € für die Erstellung dieses Feinkonzepts.



Abbildung 1.2-1 : Siegerehrung des Projekts HYWHEELS in der Kategorie HyExperts 2019

Das Feinkonzept wurde von der Stadt Fulda beauftragt und von Ende 2020 bis Mitte 2021 ausgearbeitet. Insgesamt haben über 120 Akteure die Entwicklung des Feinkonzepts unterstützt und sowohl ihr Interesse als auch inhaltliche Schwerpunkte aktiv eingebracht.

Das Konzept zeigt, wie in den nächsten Jahren großskalig BZ-Fahrzeuge im Wirtschaftsverkehr, insbesondere BZ-Lastkraftwagen (Lkw), eingeführt und eine grüne Wasserstoffinfrastruktur in Osthessen aufgebaut werden kann. Bei seiner Entwicklung wurde besonderer

Wert daraufgelegt, dass das Konzept als Blaupause für andere Regionen und Unternehmen in Deutschland, die ebenfalls BZ-Antriebe im Schwerlasttransport einsetzen möchten, dienen kann.

1.2.2. Motivation – Warum existiert das Projekt HYWHEELS?

Das Projekt HYWHEELS soll Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor reduzieren und neue regionale Wertschöpfungsketten generieren. Alleinstellungsmerkmale regionaler Unternehmen sollen geschaffen und weiter gestärkt werden (siehe Abbildung 1.2-3).

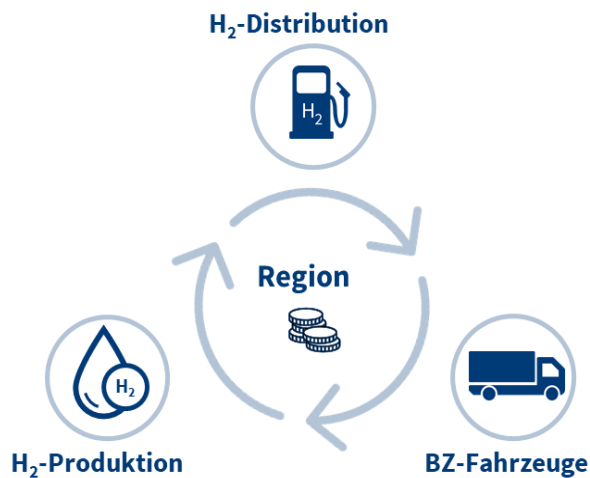


Abbildung 1.2-3: Schema regionale Wertschöpfung

Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor

Seit Jahren wachsen die Verkehrsemissionen trotz immer effizienter werdender konventioneller Fahrzeuge. Nahezu ein Drittel der Treibhausgasemissionen im Verkehr werden durch den Schwerlasttransport verursacht. Um die von der Europäischen Union (EU) angestrebten Ziele der Kohlenstoffdioxid (CO₂)-Emissionsreduktionen für Lkw und Busse um 15 % bis 2025 und um 30 % bis 2030 erreichen zu können, ist ein zeitnaher Einsatz emissionsfreier Antriebskonzepte erforderlich (Europäisches Parlament, 2019). Daher strebt die Bundesregierung an, bis 2030 ein Drittel der Fahrleistung im Schwerlastverkehr elektrisch oder mit strombasierten Kraftstoffen zu realisieren (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2019). Durch die Einführung von BZ-Fahrzeugen und den Aufbau der zugehörigen Wasserstoffinfrastruktur in Osthessen sollen die Verkehrsemissionen nachhaltig reduziert werden. Neben den Treibhausgasemissionen wird auch die lokale Immissionsbelastung durch Abgase und Lärm gesenkt und die Region attraktiver und lebenswerter für ihre Einwohner gestaltet.

Regionale Wertschöpfung und Alleinstellungsmerkmale für regionale Unternehmen

Der Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur ermöglicht regionale Wertschöpfungsketten, weil Wasserstoff vor Ort erzeugt, verteilt und genutzt wird. Wird der Kraftstoff lokal produziert und verbraucht, verbleiben Mobilitätsausgaben in der Region und stärken die lokale Konjunktur.

Durch die Einführung von Nullemissions-Fahrzeugen können regionale Verkehrs- und Transportunternehmen nicht nur ihr Image verbessern, sondern darüber hinaus grüne Transportdienstleistungen als Alleinstellungsmerkmal anbieten. So kann möglichen zukünftigen Einschränkungen oder steigenden Betriebskosten, unter anderem hervorgerufen durch bspw. Durchfahrtsverbote, CO₂-Abgaben, Strafen und steigende Dieselskosten bereits frühzeitig entgegengewirkt werden.

1.2.3. Akteure und Projektpartner

Die im Folgenden aufgeführten Akteure haben die Erstellung des Feinkonzepts unterstützt und ihr Interesse an dem Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und der Nutzung von BZ-Fahrzeugen bekundet. Die genannten Akteure haben alle an einer im Rahmen des Feinkonzepts durchgeführten Online-Umfrage teilgenommen. Ein steigendes Interesse der Akteure am Projekt HYWHEELS wird durch die Anzahl der Teilnehmenden an den Workshops verdeutlicht, die im Verlauf des Projektes von der Kickoff-Veranstaltung mit ca. 80 Akteuren auf über 125 Akteure im Abschluss-Workshop angestiegen ist.

A. & B. Wächter KG | Alternoil GmbH | andres logistics GmbH | antonius : gemeinsam wachsen gGmbH | Betzenröder Windenergie GbR | Bruno Reimann GmbH & Co. KG | Clean Logistics GmbH | Contrafor GmbH | Diedrich Witte & Sohn Nf. GmbH & Co. KG | Dr. Kramer Consulting | EBB Technik GmbH | Ebert GmbH Güternah- und Fernverkehr | EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG | Edgar Graß Spedition-GmbH & Co. KG | Erlenmayer Spedition GmbH | e-troFit GmbH | Everfuel A/S | Frank Reinefeld GmbH | Franz Fischer Spedition GmbH | Frey Spedition GmbH | Fritz Hamann Sped.Ges.mBH & Co. KG | Fronius Deutschland GmbH | Fulda kulinarisch / Rhön kulinarisch | Gebr. Sauels GmbH & Co. KG | Grimmener SpeziTrans & Service GmbH | Grinix GmbH | Gruber GmbH & Co. KG | HA Hessen Agentur GmbH | Hans-Gerd Grüßing Spedition GmbH | HOYER Mineralöl-Logistik GmbH | Ihssen GmbH & Co. KG | Johannes Jäger GmbH & Co. KG | KAMMERDIENER PEEGUT Holding GmbH | Karl Schmidt Spedition GmbH & Co. KG | Kauffeldt Transport & Logistik GmbH | Keller & Keller Spedition GmbH & Co. KG | KLVrent GmbH & Co. KG | Kottmeyer GmbH & CO. KG | Kraftverkehr Emsland GmbH | Kunzmann Fulda GmbH | Landkreis Fulda | Leopold Michel GmbH | Leubecher Energieservice GmbH & Co. KG | Lhyfe GmbH | Manfred Jungels GmbH | MARSCHALL GmbH & Co. KG | Meier Logistik GmbH | Meyer logistics GmbH | MEYER-JUMBO Logistics GmbH & Co. KG | MLD GmbH & Co. KG | Modschiedler GmbH | MOLTHAHN TRANSPORTE GmbH | Norbert Redemann KG Spedition | PHL Logistik GmbH | Plagazi AB | Progroup AG | Quentin Transporte & Baustoffe GmbH | Regio.Mobil Deutschland GmbH | Region Fulda Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH | Reichenberg Transporte GmbH | Resato International B.V | Roth Holding GmbH & Co. KG | Rothermel Spedition | Rudolph Logistik Gruppe | S. Gruber GmbH & Co. Ges. für Transporte und Lagerei KG | Schuldes Spedition GmbH | Sentona GmbH & Co. KG | sera Hydrogen GmbH | sim cargo GmbH | Sostmeier GmbH & Co. KG | Spedition Heidelmann GmbH | Spedition Huckschlag GmbH | Spedition Jakob Weets E.K. | Spedition Kellershohn GmbH & Co. KG | Spedition Pohl GmbH & Co. KG | Stadt Brake (Unterweser) | Stadt Fulda | SVG Schleswig-Holstein eG | tegut Logistik GmbH & Co. KG | Termintransport Service GmbH | Tolle & Waitz Transporte GbR | TOYOTA TSUSHO NEXTY ELECTRONICS EUROPE GmbH | Transgourmet Deutschland GmbH & Co. OHG | VOGT Logistik GmbH & Co. KG | W. Ahlers Spedition GmbH | W. Schultz u. Sohn GmbH | Wandt Spedition Transportberatung GmbH | Wäscherei Diener GmbH & Co. KG | WEDLICH. Logistik - Transport - Umzug GmbH | Wehrmann Transport GmbH | Zufall logistics group

2. Konzept auf einen Blick

2.1. Ziel des Projekts

Das Projekt HYWHEELS strebt die großskalige Einführung von mindestens 1.000 BZ-Fahrzeugen (Schwerpunkt BZ-Lkw) im Wirtschaftsverkehr Osthessens an. Die Fahrzeuge sollen zeitnah in Betrieb genommen und auf regionalen, hessischen und nationalen Routen eingesetzt werden. Durch eine gebündelte Beschaffung von BZ-Fahrzeugen und einen zeitgleich durchgeführten flächendeckenden Aufbau von Tankstellen soll eine wirtschaftliche Infrastruktur entstehen, die von osthessischen, nationalen und internationalen Transport- und Logistikunternehmen genutzt werden kann. Dadurch soll das Henne-Ei-Problem der Wasserstoffwirtschaft im Verkehrssektor endgültig ausgehebelt werden.¹ Insbesondere BZ-Lkw sollen auf dem Markt eingeführt und einer breiten Masse an Transport- und Logistikunternehmen zugänglich gemacht werden. Die im Rahmen des Projektes angestrebten Kennzahlen sind in Abbildung 2.1-1 dargestellt.

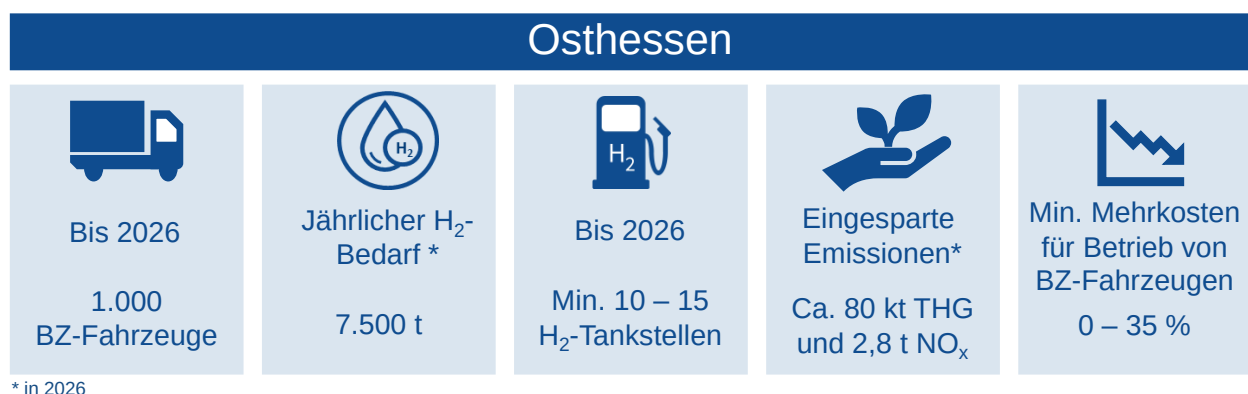


Abbildung 2.1-1: Angestrebte Kennzahlen im Projekt HYWHEELS

2.2. Umsetzung und Zeitplan

Um das Henne-Ei-Problem der Wasserstoffwirtschaft auszuhebeln, sind die Interessen von Fahrzeugnutzern und Infrastrukturanbietern zu bündeln. Für die Umsetzungsphase von HYWHEELS wurde daher der Dialog mit den Akteuren gesucht, in dessen Verlauf wichtige Erkenntnisse gewonnen und Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Projektumsetzung identifiziert werden konnten.

¹ Zum einen entscheiden sich Unternehmen gegen die Nutzung von BZ-Fahrzeugen, weil keine Betankungsinfrastruktur vorhanden ist. Auf der anderen Seite werden keine Wasserstofftankstellen für die Betankung der BZ-Fahrzeuge errichtet, weil kein Absatzmarkt vorhanden ist. Dieses Phänomen wird häufig als Henne-Ei-Problem bezeichnet.

Rahmenbedingungen für eine wirtschaftliche Umsetzung

Für den Betrieb und die Versorgung von 1.000 BZ-Fahrzeugen wurde im Rahmen des Projekts ermittelt, dass eine Errichtung von mindestens 10 bis 15 Tankstellen an verschiedenen Standorten notwendig ist. Damit diese Tankstellen aufgebaut werden können, wurden Richtgrößen für einen wirtschaftlichen Tankstellenbetrieb erarbeitet. Die Werte sind auf jede Region in Deutschland übertragbar:

- › Für den wirtschaftlichen Betrieb von Wasserstofftankstellen ist ein Umsatz von mind. 450 bis 500 kg Wasserstoff pro Tag notwendig. Dies entspricht einer Versorgung von ca. 15 schweren Nutzfahrzeugen (SNF) pro Tag oder etwa 120 bis 130 Personenkraftwagen (Pkw), die täglich volltanken.

Die notwendigen Fahrzeugzahlen pro Fahrzeugkategorie für einen Umsatz von bis zu 500 kg zeigen, dass sich für eine hohe Wasserstoffabnahme besonders SNF eignen:

- › Busse und Abfallsammelfahrzeuge (ASF) können heutzutage bereits einzeln und in kleineren Stückzahlen erworben werden.
- › Lkw können ab Anfang 2022 in Deutschland in Serie erworben werden. Hier sollte zunächst die Herstellung von ca. 30 Fahrzeugen in Auftrag gegeben werden, damit Hersteller die Fahrzeuge möglichst kostengünstig anbieten können. Nach Abstimmung mit einer Vielzahl von Logistikunternehmen können solche Stückzahlen am besten durch eine gemeinschaftliche Bestellung erreicht werden.

Drei Phasen für die Umsetzung

Aufbauend auf den gezeigten Rahmenbedingungen wurde der folgende Fahrplan für die Einführung der 1.000 Fahrzeuge erstellt:

Phase 1: Das Projekt HYWHEELS befindet sich seit Anfang 2021 in einer bereits angelaufenen zweijährigen Startphase, in der die ersten BZ-Fahrzeuge getestet und eingeführt werden sollen. Erste Vorbereitungen für die Beschaffung von BZ-Fahrzeugen laufen bereits parallel zur Erstellung dieses Feinkonzeptes. Parallel werden erste Tankstellen aufgebaut und weitere Tankstellenstandorte für einen nationalen Einsatz von BZ-Fahrzeugen geplant.

Erste Gespräche für die Umsetzungsphase des Projektes werden bereits geführt. Hierbei werden verschiedene Optionen diskutiert, die eine Einführung von BZ-Lkw aktiv vorantreiben. Neben einer regional verankerten, dauerhaften Anlaufstelle für weitere Projektinteressierte wird im Rahmen des Projektes ein „Tag des BZ-Lkw“ geplant, der Logistikunternehmen und Akteuren aus der Region eine Testfahrt von aktuell verfügbaren BZ-Lkw ermöglichen soll.

Im Rahmen von HYWHEELS wurden außerdem über 50 Logistikunternehmen identifiziert, die eine Erprobung/Beschaffung von BZ-Lkw anstreben, sobald diese auf dem Markt verfügbar sind. Aktuell

werden in Zusammenarbeit mit der LandesEnergieAgentur Hessen Gespräche mit Herstellern organisiert, um erste Fahrzeuge in der Region auf die Straße zu bringen.

Abbildung 2.2-1 zeigt die Standorte der Logistikunternehmen, die an einer kurzfristigen Erprobung/Beschaffung eines BZ-Lkw interessiert sind sowie Tankstellen, die im Rahmen von Phase 1 bis Ende 2022 voraussichtlich zur Betankung verfügbar sind (gelb und grün).² Das kurzfristige Ziel besteht darin, BZ-Lkw zeitnah dort einzusetzen, wo es heute bereits ein verfügbares Tankstellennetz gibt. Perspektivisch ist eine proaktive Erweiterung des Tankstellennetzes erforderlich, um auch weitere Routen erschließen zu können. Aus Sicht der Logistikunternehmen wurden weitere wichtige Standorte identifiziert (blau), mit deren Planung kurzfristig begonnen werden sollte. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Feinkonzepts Standorte in Osthessen identifiziert, die einen wesentlichen Bestandteil des Aufbaus der Wasserstoffinfrastruktur in Osthessen darstellen (siehe Tabelle 2.2-1).

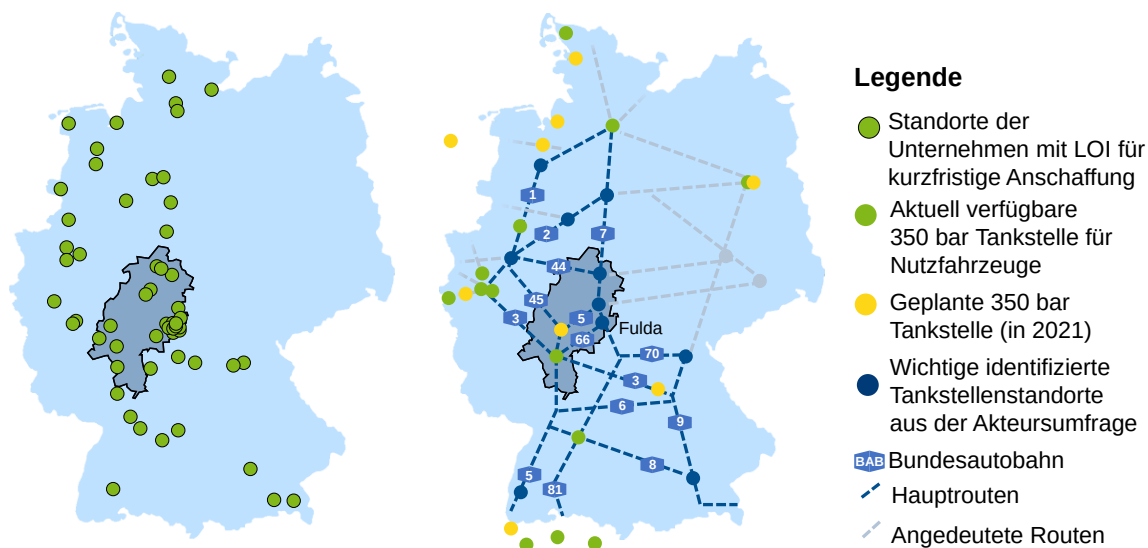


Abbildung 2.2-1: Kurzfristig an BZ-Lkw interessierte Unternehmen sowie die kurzfristig (innerhalb von Phase 1) vorhandene Wasserstofftankstellen (350 bar)

² Diese Tankstellen sind aktuell bereits verfügbar, bzw. befinden sich in der Genehmigungs-/Bauphase. Betreiber dieser Tankstellen sind bspw. die H2 MOBILITY oder die eFarming GmbH & Co. KG.

Tabelle 2.2-1 Standorte für Wasserstofftankstellen in Osthessen. Quelle: Infraseriv

	Ort	Bezeichnung	Beschreibung des Standortes
Standort 1	Flieden	Fa. Sostmeier	Fläche im Gewerbegebiet Flieden, Firmengelände
Standort 2	Flieden	Tankstelle RHV	Fläche im Gewerbegebiet Flieden, Grundstück neben vorhandener RHV Tankstelle
Standort 3	Eichenzell	An L3307	Unbebaute Fläche, Gemeinde Eichenzell
Standort 4	Eichenzell	Euro Rastpark	Fläche neben vorhandener Total Tankstelle
Standort 5	Eichenzell	Eichenzell-Welkers Industriegebiet	Fläche nördlich von Tankpool24
Standort 6	Michelsrombach	A7 Abfahrt Hünfeld/Schlitz	Gewerbegebiet bei AS
Standort 7	Schlüchtern	A66 Abfahrt Schlüchtern Nord	Rasthof an A66
Standort 8	Fulda	A7 Abfahrt Fulda Nord	Autohof Fulda-Nord; neu zu erschließende Fläche, Aral Tankstelle

Phase 2: Anlauf im Wirtschaftsverkehr (2023 – 2024)

Durch den koordinierten Aufbau neuer Tankstellen vergrößert sich das mögliche Einsatzgebiet der BZ-Lkw, weitere Routen können erschlossen werden. Die zu Beginn entstandenen Cluster vergrößern sich und können verbunden werden. Die ersten BZ-Fahrzeuge werden im Wirtschaftsverkehr eingesetzt und die ersten nationalen Routen im Fernverkehr sind befahrbar.

Phase 3: Hochlauf (2025 – 2026)

Die Tankstelleninfrastruktur ist flächendeckend in Hessen, Nordwest- und Süddeutschland nutzbar, so dass die meisten Routen befahren werden können. Es werden laut dem im Feinkonzept erarbeiteten Fahrplan insgesamt ca. 1.000 BZ-Fahrzeuge eingesetzt. Das Ziel des Einsatzes von 1.000 BZ-Fahrzeugen bis 2026 ist ambitioniert, in seiner Umsetzung jedoch realistisch und insbesondere im Hinblick auf die Verschärfung der Klimaziele notwendig anzustreben.

3. Region und die Rahmenbedingungen

3.1. H₂-Erzeugung in Osthessen

Erneuerbare Energien (EE) bieten den Vorteil, dass sie weltweit in nahezu unbegrenztem Umfang zur Verfügung stehen und bei der Stromproduktion keine klimaschädlichen Emissionen ausstoßen. Weiterhin sind die Stromgestehungskosten der EE in den letzten Jahren kontinuierlich gesunken, so dass sie inzwischen auch in Deutschland die preiswerteste Art der Stromerzeugung darstellen (siehe Abbildung 3.1-1).

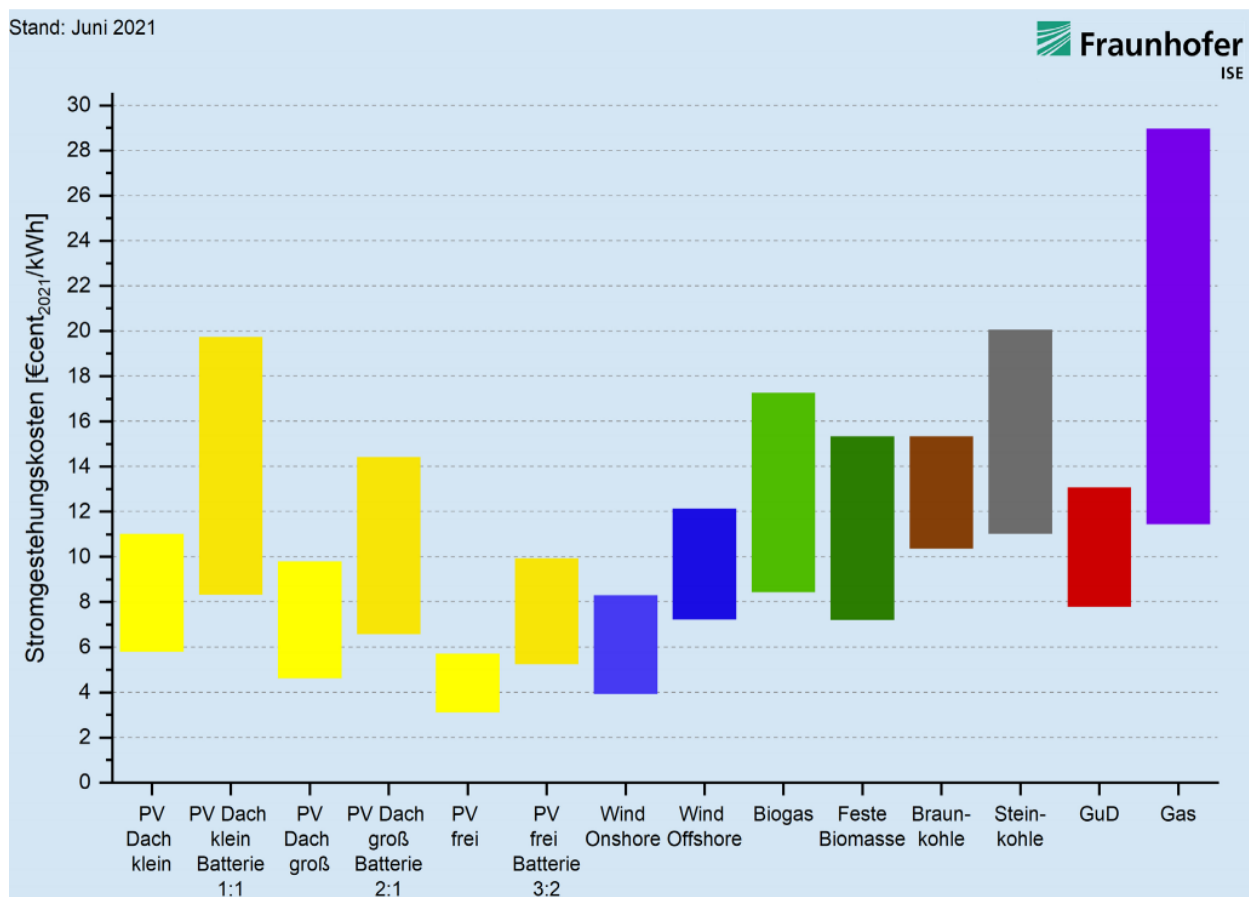


Abbildung 3.1-1: Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger in Deutschland; Studie des Fraunhofer ISE (Fraunhofer ISE, 2021)

Somit bilden EE nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch die geeignetste Grundlage zum Betrieb von Elektrolyseuren zur Wasserstofferzeugung. Eine Herausforderung stellt allerdings die Volatilität, also die Schwankung der Strombereitstellung, dar. Aufgrund saisonaler Effekte der Windgeschwindigkeit findet ein großer Teil der Strombereitstellung aus Windenergieanlagen (WEA) in den Herbst- und Wintermonaten statt (siehe Abbildung 3.1-2), während Photovoltaikanlagen (PV) in den Sommermonaten die höchsten Betriebsstunden erreichen (siehe Abbildung 3.1-3). Durch

die Kombination von WEA und PV-Freiflächenanlagen kann eine gewisse Glättung der Strombereitstellung im Jahresverlauf erreicht werden (siehe Abbildung 3.1-4). Was wiederum zu höheren Volllaststunden (VLS) der Elektrolyse (bei reinem Strombezug aus EE) oder zu einem höheren Grünstromanteil der Elektrolyse (bei zusätzlichem Netzbezug) führt.

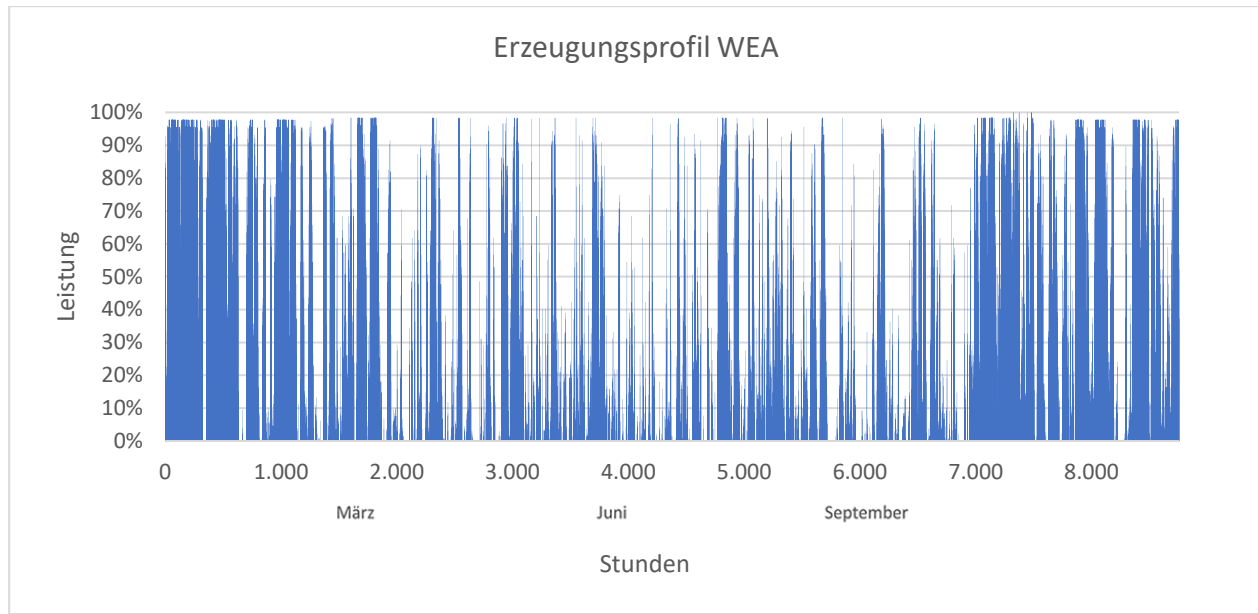


Abbildung 3.1-2: Erzeugungsprofil einer Windenergieanlage über ein beispielhaftes Jahr (eigene Darstellung)

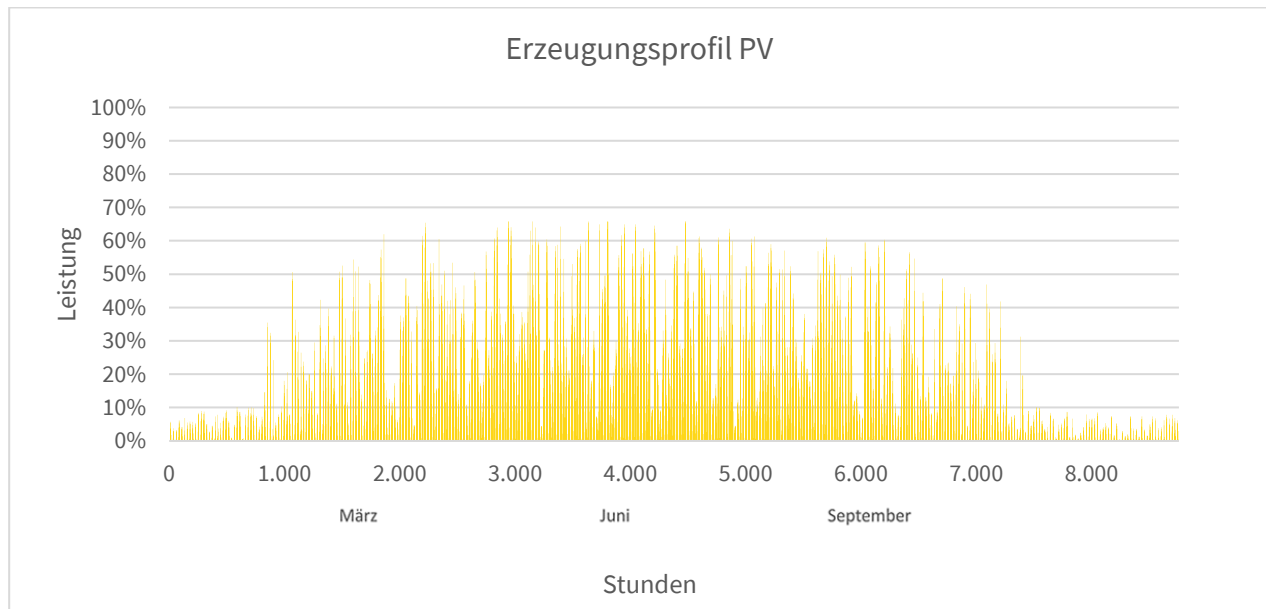


Abbildung 3.1-3: Erzeugungsprofil einer PV-Freiflächenanlage über ein beispielhaftes Jahr (eigene Darstellung)

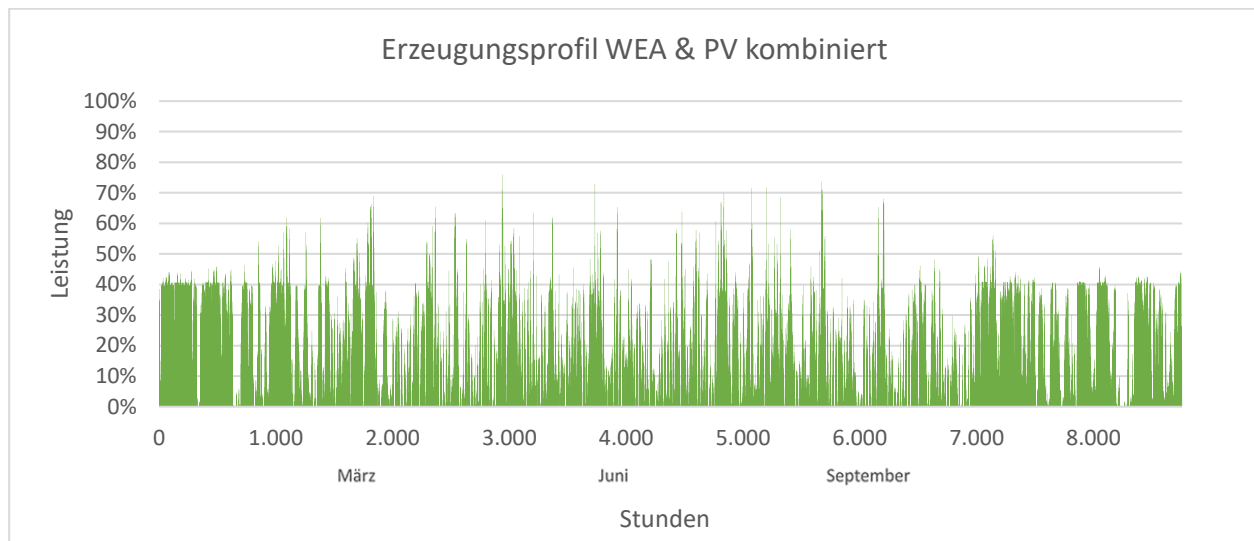


Abbildung 3.1-4: Kombiniertes Erzeugungsprofil einer WEA und einer PV-Anlage gleicher Leistung (in Bezug auf die Leistung der WEA) (eigene Darstellung)

Volllaststunden sind eine rechnerische Größe in der Anlagentechnik und bilden ein Maß für den Nutzungsgrad einer Anlage. Dabei wird die gesamte erzeugte oder genutzte Energie einer Anlage durch deren Nennleistung geteilt und gibt somit die theoretisch notwendigen Betriebsstunden der Anlage bei Nennleistung wieder, die benötigt werden, um diese Energie zu erzeugen / zu verbrauchen. Somit kann mit Hilfe der Volllaststundenzahl auch der Teillastbetrieb der Anlage abgebildet werden, was eine bessere Vergleichbarkeit der Anlagennutzung mit vergleichbaren Anlagen ermöglicht.

Die Tabelle 3.1-1 zeigt beispielhaft die Volllaststunden für einen Elektrolyseur (ELY) mit einer elektrischen Leistung von 2 MW in Abhängigkeit der Art der Strombereitstellung. Ein 2 MW ELY kann im Betriebsbereich von 25 bis 100% gefahren werden, was einer elektrischen Leistung von 0,5 bis 2 MW entspricht. Das bedeutet, der ELY startet erst, wenn die 0,5 MW (25 %) zur Verfügung stehen und läuft bis 2 MW Leistungsbereitstellung (100 %). Die erforderliche Leistung für die Elektrolyse, die aus den WEA und PV-Anlagen bezogen wird, steht aufgrund der Volatilität und Energieintensität nicht kontinuierlich zur Verfügung. Daher müssen die EE-Anlagen mit ihrer installierten elektrischen Leistung größer ausgeführt werden, um eine hohe Volllaststundenzahl der Elektrolyse zu erreichen. Um wie oben erwähnt die Anlagennutzung der Elektrolyse zwischen einer vorgeschalteten WEA oder PV-Anlage zu vergleichen, wurden die jeweiligen Volllaststunden auf Basis der Erzeugungsprofile in Abbildung 3.1-2 und in Abbildung 3.1-3 berechnet. Das Ergebnis kann der Tabelle 3.1-1 entnommen werden. Eine Kombination von WEA und PV-Anlagen bewirkt eine bestmögliche Anzahl an Volllaststunden für die Auslastung eines ELY. Die Verdopplung der Anlagenleistung der Energiebereitstellung führt allerdings nicht zu einer deutlichen Steigerung der Volllaststunden. So bewirkt z.B. die Erhöhung der elektrisch installierten PV-Leistung von 5 auf 10 MW peak nur einen Anstieg von etwa 40 % von 1.800 auf 2.500 Volllaststunden. Bleibt die PV-Leistung bei 5 MW und wird eine zusätzliche WEA von 5,6 MW installiert, so können die Volllaststunden von

1.800 auf 5.500 Stunden fast verdreifacht werden. Dies ist auf die oben beschriebenen saisonalen Unterschiede der Stromerzeugung der zwei Technologien zurückzuführen und verdeutlicht, warum eine Kombination für den wirtschaftlichen Betrieb eines ELY sinnvoll ist.

Tabelle 3.1-1: Volllaststunden eines 2 MW Elektrolyseurs in Abhängigkeit der Art der Energiebereitstellung

Energiebereitstellung	VLS 2 MW ELY
WEA (5,6 MW)	4.200
PV (5 MW)	1.800
Kombiniert WEA (5,6 MW) + PV (5 MW)	5.500
WEA (11,2 MW)	4.900
PV (10 MW)	2.500
Kombiniert WEA (11,2 MW) + PV (10 MW)	6.300

Der Einfluss der installierten Leistung erneuerbarer Energien für den beispielhaft betrachteten Elektrolyseur mit einer Leistung von 2 MW kann Abbildung 3.1-5 und Abbildung 3.1-6 entnommen werden.

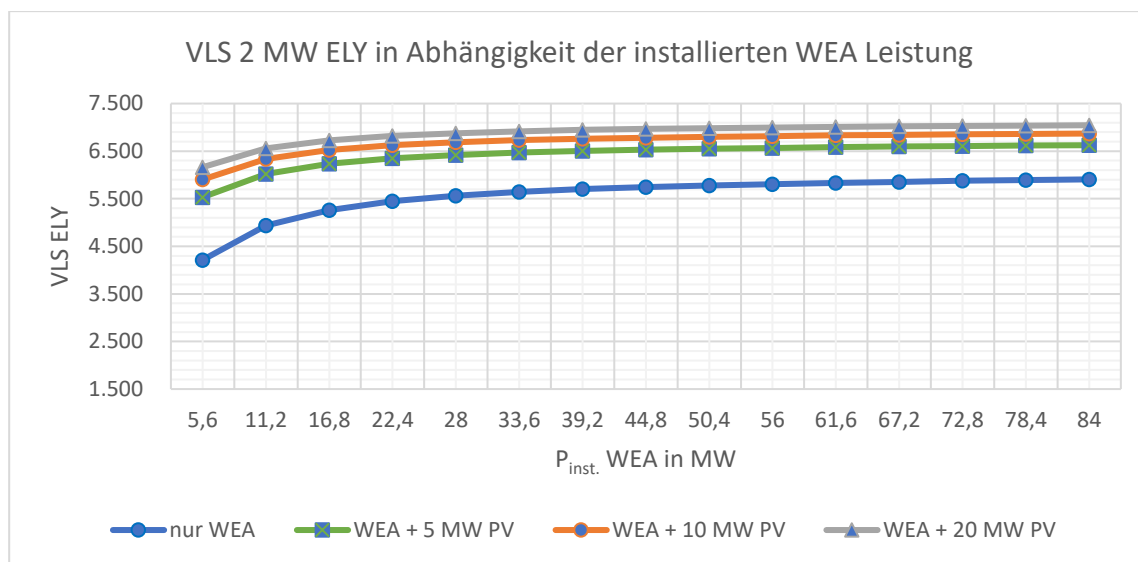


Abbildung 3.1-5: Volllaststunden (VLS) eines Elektrolyseurs (ELY) mit 2 MW Leistung in Abhängigkeit der installierten Leistung von Windenergieanlagen sowie in Kombination mit PV-Anlagen

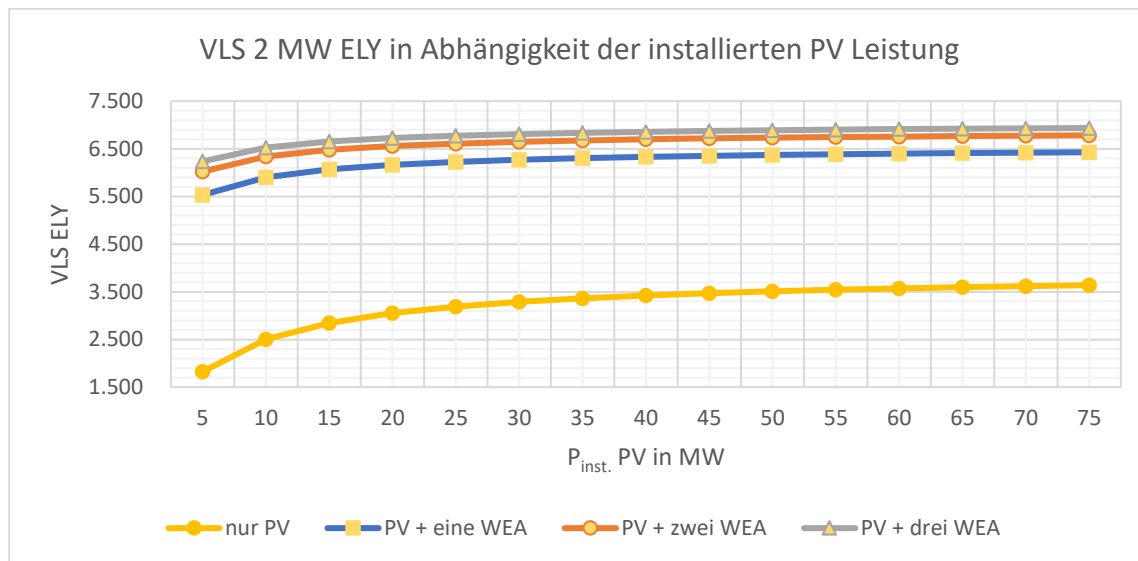


Abbildung 3.1-6: Volllaststunden (VLS) eines Elektrolyseurs (ELY) mit 2 MW Leistung in Abhängigkeit der installierten Leistung von PV-Anlagen sowie in Kombination mit Windenergieanlagen mit jeweils 5,6 MW

3.1.1. Bestandsanalyse

Im Rahmen des Feinkonzepts soll die Möglichkeit der grünen Wasserstoffherzeugung beispielhaft mittels Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyse (PEM) untersucht und dargestellt werden. Dafür ist die Bereitstellung grünen Stroms aus erneuerbaren Energien essenziell. In einem ersten Schritt wird deshalb der aktuelle Ausbaustand der EE dargestellt und durch Abgleich mit dem (berechneten) Stromverbrauch der Region in Relation gestellt. Weiterhin wird das Potenzial solcher Anlagen untersucht, die nach 20 Betriebsjahren nicht weiter nach dem EEG gefördert werden, aber evtl. weiterbetrieben werden können. Da die Betreiber dieser Anlagen neue Vermarktungskonzepte für den von den Anlagen erzeugten Strom benötigen, können Elektrolyseure für diesen Strom als langfristiger Abnehmer dienen. Die Bestandsanalyse mit relevanten Informationen zu den EE-Anlagen (Standort, Inbetriebnahmedatum, elektrische Leistung etc.) beruht auf Daten des Marktstammdatenregisters (MaStR) der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen [BNetzA], 2021) und wird für alle relevanten erneuerbaren Energien (Windenergie, PV, Biomasse & Wasserkraft) durchgeführt. **Untersucht werden Landkreis Fulda, Kreis Hersfeld-Rotenburg, Vogelsbergkreis und Main-Kinzig-Kreis**, die zusammen die Region Osthessen bilden. Die wichtigsten Kennzahlen können der Tabelle 3.1-2 entnommen werden. Eine detaillierte Auflistung befindet sich in Anhang A.5.1. Dem Anhang A.5.2 kann die räumliche Verortung der erneuerbaren Erzeugungsanlagen in der Region entnommen werden.

Tabelle 3.1-2: Ausbaustand der erneuerbaren Energien in Ostthessen auf Basis des Marktstammdatenregisters

	Anzahl EE Anlagen	Leistung [MW]	Installierte Leistung [MW] je 100.000 Einwohner
Landkreis Fulda	10.581	240,3	108
Vogelsbergkreis	4.830	565,8	536
Kreis Hersfeld-Rotenburg	5.549	255,4	211
Main-Kinzig-Kreis	9.844	435,3	103
Region Ostthessen	30.804	1.105,3	127

Insgesamt sind im Landkreis Fulda erneuerbare Energien mit einer elektrischen Leistung von etwa 240 MW installiert, in der Region Ostthessen etwa 1.105 MW.

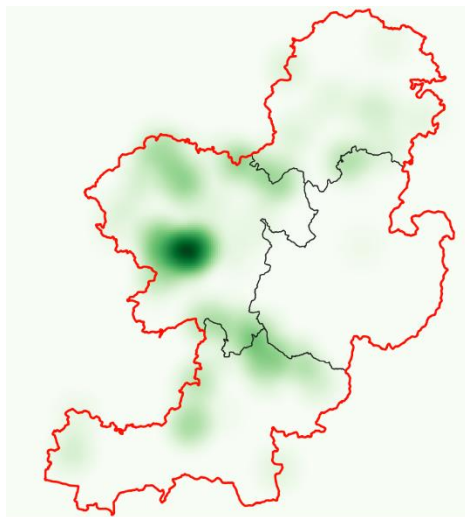


Abbildung 3.1-7: Ausbau der Windkraft in Ostthessen als Heatmap (eigene Darstellung)

Wie aus Abbildung 3.1-7 hervorgeht, konzentriert sich die installierte Leistung der bestehenden Windenergieanlagen aktuell vor allem auf den Vogelsbergkreis sowie auf den Main-Kinzig-Kreis. Der Landkreis Fulda weist mit 22 WEA und einer installierten elektrischen Leistung von 57 MW die geringste Anzahl an WEA auf.

Aus der Datenbank der Bestandsanlagen wurden mit Hilfe historischer Wetterdaten und üblichen Verlustfaktoren (Vereisungen, Abschaltungen etc.) Erzeugungsgänge der Anlagen berechnet und daraus der Stromertrag aus erneuerbaren Energien pro Jahr abgeleitet. Weiterhin wurden aus den bekannten Stromverbräuchen der Landkreise Lastgänge des Stromverbrauchs abgeleitet (siehe Tabelle 3.1-3).

Tabelle 3.1-3: Anteil der EE am Gesamtstromverbrauch im Landkreis Fulda und in der Region Osthessen (eigene Berechnungen)

	P_{el} [GWh/a]	Anteil am Stromertrag aus EE [%]	Anteil am gesamten Strom- verbrauch [%]
LK Fulda			
WEA	144	37	12
PV	165	42	14
Biomasse	71	18	6
WKA	12	3	1
Σ EE	392	100	33
Region Osthessen			
WEA	1.681	65	36
PV	514	20	11
Biomasse	316	12	7
WKA	71	3	2
Σ EE	2.581	100	56

Aus den Daten aus der Tabelle 3.1-3 wird deutlich, dass sich der Landkreis Fulda bzw. die Region Osthessen aktuell nur zu einem Teil bilanziell selbst mit Strom aus erneuerbaren Energien versorgen kann. Im Landkreis Fulda decken die erneuerbaren Energien den Strombedarf zu 33% ab. In der gesamten Region Osthessen sind es 56%. Rund 2/3 bzw. die Hälfte des benötigten Stroms müssten demnach durch konventionelle Stromproduktion innerhalb und außerhalb der Region zugeführt werden. Sollen Elektrolyseanlagen errichtet werden, müssen im gleichen Zug auch erneuerbare Erzeugungskapazitäten geschaffen werden. Weiterhin ist nicht zu erwarten, dass Anlagenbetreiber, die aktuell ihren Strom über das EEG zu attraktiven Preisen vermarkten, aus diesem Vermarktungskonzept aussteigen werden, um den Strom zu einem deutlich niedrigeren Preis an den Betreiber eines Elektrolyseurs zu verkaufen. Dementsprechend können von den Bestandsanlagen zunächst nur solche Anlagen in Betracht gezogen werden, die nach 20 Betriebsjahren keine weitere EEG-Vergütung erhalten, aber weiterbetrieben werden können (Post-EEG WEA). Aus der Abbildung 3.1-8 wird deutlich, dass Post-EEG WEA in den nächsten Jahren ein signifikantes Potenzial bieten werden, um sie als Quelle für Elektrolyseure zu nutzen.

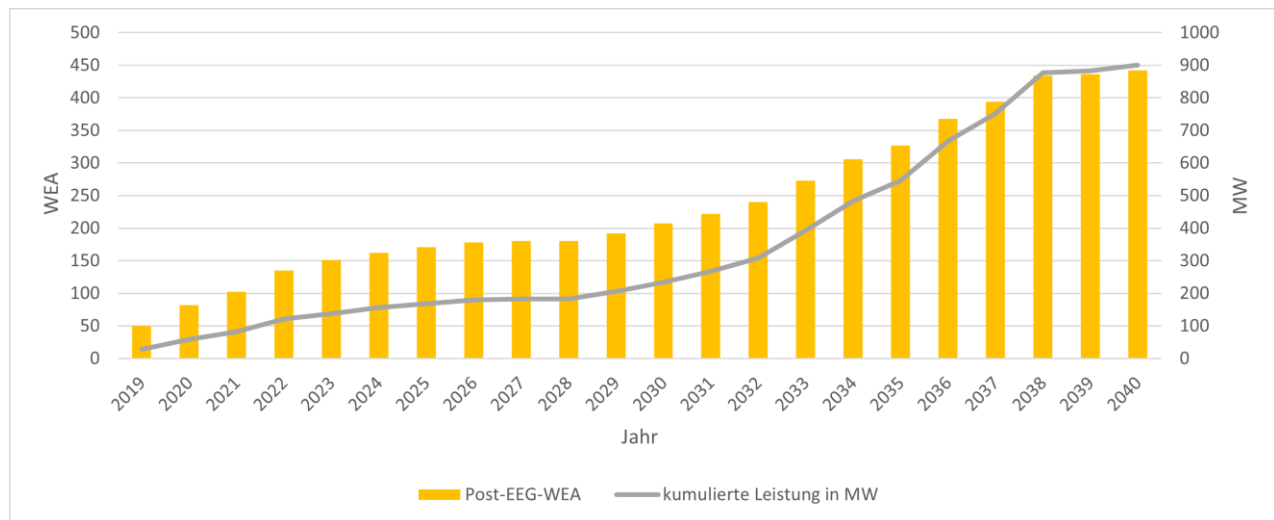


Abbildung 3.1-8: Windenergieanlagen in der Region Osthessen, die aus der EEG-Vergütung fallen

Dies betrifft in den nächsten Jahren (bis Ende 2026) in der Region Osthessen etwa 180 WEA mit einer kumulierten elektrischen Gesamtleistung von 180 MW. In den darauffolgenden Jahren wird dieses Potenzial stagnieren, da in den Jahren 2007-2010 nur wenige WEA in Betrieb genommen wurden. Weiterhin ist zu erwarten, dass einzelne Anlagen aufgrund steigender Instandhaltungskosten abgebaut und nicht weiterbetrieben werden. Daher bieten die Bestandsanlagen nur kurzfristig eine Möglichkeit der Deckung des Strombedarfs der Elektrolyseure. Für ein langfristiges Geschäftsmodell und zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit muss zwangsläufig ein Zubau an EE erfolgen.

3.1.2. Potenzialanalyse

Im Rahmen der Potenzialanalyse wurden ausschließlich Potenziale für WEA und Freiflächen-PV-Anlagen (>5 ha) untersucht. Die anderen erneuerbaren Energieträger (Biomasse bzw. Biogas & Wasserkraft) wurden nicht betrachtet. Bei Wasserkraftanlagen ist dies auf das sehr geringe Potenzial zurückzuführen. So haben Wasserkraftanlagen einen Anteil von nur 3 % an der EE-Erzeugung in der Region Osthessen. Den aus Biomasse gewonnenen Energieträger Biogas (Methan) direkt zu verstromen ist effizienter als ihn über Dampfreformierung³ in Wasserstoff umzuwandeln. Weiterhin stellen mit Biogas betriebene Blockheizkraftwerke (BHKW) aktuell die einzige verfügbare erneuerbare Energie dar, die im Rahmen der installierten Leistung grundlastfähig ist und auch während der sogenannten „Dunkelflaute“ (wenig bis keine Strombereitstellung aus Wind- und PV-Anlagen) erneuerbaren Strom liefern kann. Diese Kraftwerksleistung zur Wasserstoffproduktion zu verwenden, wäre nicht zielführend.

³ dabei wird unter Dampf- und Wärmezufuhr ein Synthesegas bestehend aus H₂ und CO₂ hergestellt und zu H₂ aufbereitet

Windenergie

Aufgrund der hohen planungsrechtlichen Anforderungen an den Bau neuer WEA konzentrierte sich die Windkraft-Potenzialanalyse auf bestehende Vorranggebiete (VRG) für Windenergienutzung. Hierbei sind die Regionalpläne der Regierungspräsidien Kassel (LK Fulda & Hersfeld-Rotenburg), Gießen (Vogelsbergkreis) und Darmstadt (Main-Kinzig-Kreis) zu beachten. Als Potenzial werden daher unbebaute VRG für Windenergieanlagen betrachtet. Bereits bebaute VRG werden hingegen selbst dann nicht weiter betrachtet, wenn theoretisch noch Fläche zum Bau weiterer WEA zur Verfügung stünde, da davon auszugehen ist, dass im Rahmen der Planung der dort errichteten WEA nicht überwindbare Restriktionen identifiziert wurden. Dies bedarf im Einzelfall einer erneuten Prüfung. Insgesamt sind in der Region Osthessen 163 VRG mit einer Gesamtfläche von ca. 120 km² ausgewiesen. Das entspricht ca. 2,2 % der Gesamtfläche der Region und somit dem Ziel der hessischen Landesregierung, 2 % der Landesfläche zur Nutzung der Windenergie zur Verfügung zu stellen. Die Tabelle 3.1-4 zeigt die Anzahl aller ausgewiesenen VRG in der Gebietskörperschaft und deren Fläche. So sind von 23 VRG-Flächen im LK Fulda noch 19 Flächen ohne eine WEA. Im Landkreis Fulda steht noch ein Potenzial von 1.916 ha VRG-Flächen zur Verfügung.

Tabelle 3.1-4: Windvorrangflächen in Osthessen

	Anzahl VRG insg.	Fläche [ha]	Unbebaute VRG	Unbebaute Fläche [ha]	Unbebaute Fläche [%]
Landkreis Fulda	23	2.479	19	1.916	77 %
Vogelsbergkreis	46	2.835	15	420	15 %
Kreis Hersfeld-Rotenburg	41	2.960	24	1.323	45 %
Main-Kinzig-Kreis	51	3.718	37	2.147	58 %
Region Osthessen	163	11.991	95	5.806	48 %

In einem weiteren Schritt werden die unbebauten VRG mit der jeweils möglichen Anzahl WEA für Anlagen der neusten Generation mit ca. 5,6 MW elektrische Leistung beispielhaft beplant. Daraus ergibt sich ein Potenzial von bis zu 210 WEA mit einer elektrischen Gesamtleistung von rund 1,2 GW. Mit Hilfe berechneter Windprofile wird unter Berücksichtigung typischer Verlustfaktoren (Abschaltzeiten, Vereisung, allgemeine Nichtverfügbarkeit der Anlagen etc.) ein zu erwartender Ertrag der Windenergieanlagen berechnet. Dieser beträgt ca. 3.300 GWh pro Jahr (entspricht ca. 2.800 Volllaststunden). Mit diesem Ertrag könnten in etwa 70 % des heutigen Stromverbrauchs der Region mit ca. 4.606 GWh gedeckt werden.

Tabelle 3.1-5: Potenzial Windenergie in Osthessen (eigene Berechnung)

	Anzahl mögliche WEA	Potenzielle Leistung WEA [MW]	Potenzieller Energieertrag [GWh/a]
Landkreis Fulda	75	420	1.185
Vogelsbergkreis	17	95	269
Kreis Hersfeld-Rotenburg	48	269	758
Main-Kinzig-Kreis	70	392	1.106
Region Osthessen	210	1.176	3.318

Die o.g. genannte Beplanung der bisher unbebauten VRG würde einerseits zu einer deutlichen Steigerung der stromseitigen Eigenversorgungsquote der Region führen. Weiterhin würden die WEA in der Region deutlich gleichmäßiger verteilt. Diese gleichmäßigere Verteilung kann Abbildung 3.1-9 entnommen werden. Hier sind der aktuelle Zubau (grün), das Potential (gelb) sowie die resultierende Anzahl an WEA (blau) als Heatmap dargestellt. Zur besseren Unterscheidbarkeit wurden verschiedene Farbskalen gewählt; die Konzentration wird durch die Farbsättigung dargestellt.

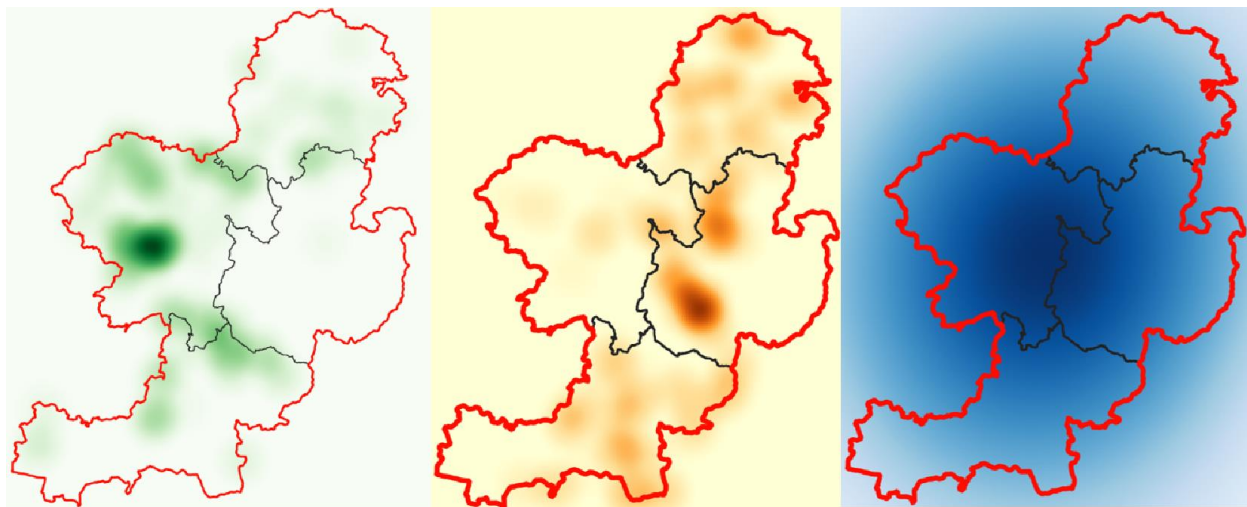


Abbildung 3.1-9: WEA in der Region Osthessen: Bestand (li.), Potential (Mitte) und Summe aus Bestand & Potential (re.)

Somit ergeben sich in vielen Gemeinden potenzielle Standorte für Elektrolyseure zur regionalen Wasserstofferzeugung und Wertschöpfung durch Strom- und Wasserstoffverkauf.

Photovoltaik

Die Planung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen ist, im Gegensatz zu WEA, weniger auf die jeweiligen Regionalpläne festgelegt. Da die Erteilung des Planungs-/Baurechts im Einzelfall von der

jeweiligen Gemeinde am geplanten Standort abhängig ist, kann eine Aussage über die Anlagengröße erst im Rahmen des weiteren Planungsprozesses getätigt werden. Die nachfolgenden Werte sind deshalb als rein technisches Potenzial (unter Beachtung planungsrechtlich harter Ausschlusskriterien) zu betrachten.

Mit einer GIS-Analyse (Geoinformationssystem) wurde das PV-Potenzial identifiziert (siehe Abbildung 3.1-10), bei der aus dem Untersuchungsgebiet (Region Osthessen, 1) die harten Ausschlusskriterien für PV-Freiflächenanlagen ausgeschnitten wurden (2). Die Ausschlusskriterien sind u.a. Bebauung, Verkehrswege, konkurrierende Landnutzung, natur- und umweltschutzrechtlich festgelegte Flächen sowie das Geländeprofil. Die resultierenden Differenzflächen (3) stellen somit das theoretische Potenzial für die Nutzung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen dar. Dabei wurden nur Gebiete mit einer zusammenhängenden Grundfläche >5 ha berücksichtigt, um eine Zerstückelung der Landschaft mit kleinen PV-Anlagen zu verhindern.

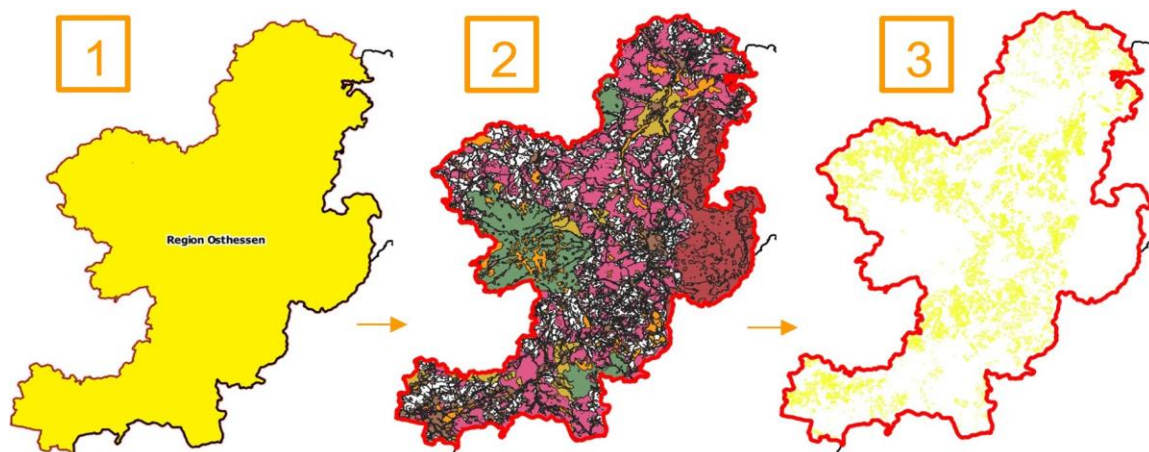


Abbildung 3.1-10: PV-Analyse Region Osthessen: Untersuchungsgebiet (li.), Ausschlussflächen (Mitte) und theoretisches Potenzial (re)

Als Ergebnis ergeben sich Flächen, die keine harten Restriktionen aufweisen, allerdings durch Vorgaben aus dem Regionalplan deutlich verkleinert werden können. Im weiteren Vorgehen bei der Untersuchung der in Kapitel 3.2.1 identifizierten Tankstellenstandorte wurden die Potenzialflächen in der Umgebung der Standorte auf ihre Eignung detailliert geprüft.

SuedLink Trasse

Das Projekt SuedLink ist ein Netzausbau der Übertragungsnetzbetreiber TenneT und TransnetBW. Hier soll mit zwei erdverlegten, parallel verlaufenden Gleichstrom-Übertragungsleitungen Strom von der Nordseeküste nach Süddeutschland transportiert werden. Auch wenn die Trasse in der Nähe der Region um Fulda geplant wird, ist eine Anbindung zur Auskopplung von grünem Strom nicht möglich, da dazu Konverter-Stationen erforderlich sind, die im aktuellen Netzentwicklungsplan und im Planfeststellungsverfahren nicht enthalten sind.

3.1.3. Wirtschaftlichkeit

Anforderungsprofil

Windenergieanlagen stellen nach § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB grundsätzlich privilegierte Vorhaben im Außenbereich dar. Das heißt, dass die Anlagen zu genehmigen sind, wenn ihnen keine öffentlich-rechtlichen Belange (z.B. schädliche Umwelteinwirkungen, Naturschutz etc.) entgegenstehen. Zur Steuerung des WEA-Ausbaus steht es Trägern der Regionalplanung (in Hessen sind dies die Regierungspräsidien) gemäß Raumordnungsgesetz frei, Teilregionalpläne zu verabschieden, in denen Vorranggebiete (VRG) zur Nutzung der Windenergie ausgewiesen werden. Außerhalb der VRG ist die Planung und Errichtung von WEA entsprechend ausgeschlossen.

Wenn WEA in VRG gebaut werden dürfen, bedürfen sie ab einer Gesamthöhe >50 m einer Genehmigung gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) (ergibt sich aus § 1 der 4. BImSchV i.V.m. Nr. 1.6 des 1. Anhang 4. BImSchV). Ein Genehmigungsverfahren nach BImSchG dauert durchschnittlich etwa 1-1,5 Jahre; die Projektdauer eines Windenergieprojekts von Projektbeginn bis Inbetriebnahme beträgt im Schnitt 4-5 Jahre.

Zum Bau einer Windenergieanlage werden ca. 0,7 ha Fläche benötigt, wovon lediglich 0,2-0,4 ha dauerhaft freigehalten werden muss. Die restliche Fläche wird renaturiert bzw. aufgeforstet oder kann landwirtschaftlich genutzt werden. Weiterer Flächenbedarf kann beim Bau der Zuwegung entstehen; dieser ist aber projektspezifisch und ist vor allem vom Zustand der bereits bestehenden Wegeinfrastruktur abhängig. Somit wird nur ein sehr kleiner Teil der Vorranggebiete tatsächlich bebaut bzw. gerodet; der Rest der Flächen verbleibt im natürlichen Ausgangszustand.

Photovoltaik-Freiflächenanlagen stellen im Gegensatz zu Windenergieanlagen keine privilegierte Nutzung im Außenbereich gem. § 35 BauGB dar. Daher muss zur Planung und Errichtung in jedem Fall ein vorhabenbezogener Bebauungsplan durch die jeweilige Gemeinde aufgestellt oder geändert werden. Eine Genehmigungspflicht gem. BImSchG besteht bei Freiflächen PV-Anlagen nicht, lediglich eine Baugenehmigung gem. BauGB ist zu beantragen. Freiflächen PV-Anlagen haben einen spezifischen Flächenbedarf von ca. 1,1 ha pro MW installierte Leistung. Das heißt, dass z.B. für eine 5 MW PV-Anlage etwa eine 5,5 ha große Fläche benötigt wird.

Ist das Ende der Betriebszeit einer Windenergie- bzw. PV-Anlage erreicht, ist der Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, die Anlagen zurückzubauen und Flächenversiegelungen zu beseitigen. Um den Rückbau sicherzustellen, wird in der Regel eine Rückbaubürgschaft abgeschlossen.

Bürgerbeteiligung und regionale Wertschöpfung

Nicht nur Unternehmer können von regionaler Energiegewinnung profitieren. Mittlerweile gibt es die verschiedensten Bürgerbeteiligungsmodelle. Diese Zusammenarbeit mit Kommunen und Bürgern verbessert nicht nur die regionale Finanzlage, sondern auch die Lebensqualität vor Ort.

- › **Viele profitieren**

Saubere Energie, Steuereinnahmen, Pachten für Grundstücke und Wege, Aufträge für lokale Unternehmen sowie Beteiligungsangebote: Erneuerbare Energien erhöhen dauerhaft die regionale Wertschöpfung.

- › **Pachteinnahmen und Verträge**

Grundstückseigentümer sind prozentual an den Einnahmen aus der Stromproduktion beteiligt. Es ist branchenüblich, eine Mindestpacht für z.B. Windkraftanlagen, die rund 25 Jahre lang Strom produzieren, zu vereinbaren. Bei einer größeren Anzahl von Flächenbesitzern gibt es sogenannte Poolmodelle, um die Pachteinnahmen gerecht unter den Eigentümern aufzuteilen.

- › **Lokale Partner**

Der lokale Partner kann ein stabiles, regionales Netzwerk bieten und ist in der Bevölkerung vor Ort bekannt und akzeptiert. Bürgerbeteiligungsmodelle werden oft mit lokalen Partnern wie Stadtwerken und Genossenschaften gemeinsam umgesetzt. Somit profitieren auch Kommunen von einer solchen Partnerschaft.

- › **Planung und Realisierung**

Ein Projektleiter ist Ansprechpartner für alle Belange und betreut alles vom Pachtvertrag bis zur Inbetriebnahme einer Anlage. Transparenz ist in allen Planungsphasen wichtig, so werden die Bürger umfassend informiert. Sorgfältige Planung und unabhängige Gutachten garantieren die Einhaltung aller gesetzlichen Vorgaben. Landschaftsbildanalyse und Umweltverträglichkeitsprüfungen tragen dazu bei, die Eingriffe so gering wie möglich zu halten. Ausgleichsmaßnahmen werden auf die Bedürfnisse und Gegebenheiten vor Ort abgestimmt.

- › **Aufträge für lokale Unternehmen**

Um die regionale Wertschöpfung und den Arbeitsmarkt zu stärken, können Aufträge nach Möglichkeit an Unternehmen vor Ort gegeben werden. Vor allem die spätere Wartung der Anlagen kann von Servicetechnikern vor Ort erledigt werden.

- › **Bürgerbeteiligungen**

Um sich als Bürger bei einem Erneuerbaren Energien Projekt finanziell zu beteiligen, gibt es mittlerweile die verschiedensten Beteiligungsmodelle. Die Bürger können über Aktien, Sparbriefe oder Genossenschaften beim Bau neuer örtlicher EE direkt an der Finanzierung mitwirken und so von einer festverzinsten Geldanlage profitieren.

3.1.4. Handlungsempfehlungen

Zur Produktion grünen Wasserstoffs werden in jedem Fall erneuerbare Energien benötigt. Da das Potenzial bei Wasserkraft zu gering und bei Biomasse bzw. Biogas nicht effizient genug ist, ist der Ausbau der EE über WEA und PV-Freiflächen entscheidend. Wie in den vorangehenden Kapiteln beschrieben, sind in der Region Osthessen noch nicht genügend Erzeugungskapazitäten installiert, um die Region stromseitig mit grüner Energie zu versorgen (auch nicht bilanziell). Vor dem Hintergrund der Sektorenkopplung und dem Ziel, den kompletten Energiebedarf zu dekarbonisieren, müssen erneuerbare Energien in einem bedeutenden Umfang installiert werden. Dies ist auch in der Region Osthessen notwendig, wenn Lkw mit vor Ort erzeugtem grünem Wasserstoff versorgt werden sollen. Einen tatsächlichen positiven Einfluss auf den CO₂-Ausstoß wird es nur geben, wenn nur grüner Strom für die Versorgung der Elektrolyseure genutzt wird, der neu installiert wurde, oder in anderen Bereichen nicht gebraucht wird.

3.1.5. Herausforderungen für die Umsetzung

Wird erneuerbarer Strom entweder per Direktleitung an den Elektrolyseur geliefert oder per Power-Purchase-Agreement (PPA) an den Elektrolyseur verkauft, greift das Direktvermarktungsverbot gem. § 56 EEG 2021. Dieses regelt, dass Strom aus erneuerbaren Energien nicht mehrfach verkauft werden darf. Wird Strom über eine Form der Direktvermarktung verkauft (geförderte Direktvermarktung, Direktvermarktung zur Verringerung der EEG-Umlage oder sonstige Direktvermarktung; siehe § 33b EEG 2021), so darf der Anlagenbetreiber diesen Strom nur über eine der drei Formen der Direktvermarktung verkaufen; eine Kombination der Vermarktungsoptionen ist verboten. Wird gegen § 56 Abs. 1-3 verstoßen, sinkt der Anspruch auf eine Förderung für den Monat des Verstoßes sowie die darauffolgenden 6 Monate auf 0. Eine ähnliche Regelung wird in § 27a EEG 2021 definiert. Hierbei handelt es sich um das Verbot der Eigenversorgung mit erneuerbarem Strom aus Anlagen, die über die geförderte Direktvermarktung vermarktet werden.

Für die Versorgung des Elektrolyseurs mit erneuerbarem Strom via Direktleitung bedeutet dies, dass unabhängig des Betreibermodells für Elektrolyseur und EE keine Förderung für den erneuerbaren Strom in Anspruch genommen werden kann, da ansonsten eine Direktversorgung des Elektrolyseurs nicht gestattet ist. Dies hat zur Folge, dass alle EE, die im Rahmen dieses Projekts untersucht werden, direkt und ohne Förderung über PPAs vermarktet werden müssen.

3.2. H₂-Infrastruktur in Osthessen

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit dem Bau bzw. Betrieb von Wasserstofftankstellen sowie der Verteilung von Wasserstoff. Es soll einen Einblick in den heutigen Stand der Technik geben, über die Anforderungen an und die Kosten für den Bau und Betrieb einer Wasserstofftankstelle informieren sowie unterschiedliche Geschäfts- und Betreibermodelle vorstellen. In diesem Kapitel wird ferner auf das Funktionsprinzip sowie die Technologie von Wasserstofftankstellen eingegangen. Potenzielle Standorte für Wasserstofftankstellen im Landkreis Fulda und darüber hinaus werden analysiert und anhand von Lkw-Verkehrsaufkommen und Betankungsprofilen werden für diese geeignete Tankstellenkonzepte abgeleitet.

3.2.1. Bestands- und Potenzialanalyse Osthessen

Hessen verfügt derzeit über neun öffentliche Wasserstofftankstellen. Davon befinden sich fünf im Großraum Frankfurt. Eine weitere Tankstelle in Kirchheim befindet sich in Realisierung. Seit 2020 gibt es eine Wasserstofftankstelle in Wiesbaden für Busse, welche sich auf dem Betriebsgelände des Mobilitätsdienstleisters ESWE Verkehr befindet und grünen Wasserstoff aus dem Energiepark Mainz bezieht (ESWE Verkehr, 2020). Im Großraum Fulda gibt es bisher keine öffentliche Wasserstofftankstelle. Einen Überblick über verfügbare Tankstellen in Hessen gibt Tabelle A.5.3-1 im Anhang A.5.3.

Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Abfallsammelfahrzeuge werden heute in der Regel bei 700 bar befüllt, alle anderen Fahrzeugklassen überwiegend bei 350 bar (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.1). Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei höherem Druck mehr Wasserstoff bei gleichem Tankvolumen gespeichert werden kann. Aus diesem Grund werden Pkw und leichte Nutzfahrzeuge, welche über wenig Nutzfläche verfügen, bevorzugt mit einem 700 bar Tank ausgestattet. Jedoch sind die Kosten für Verdichtung und Speicherung bei 700 bar höher als bei 350 bar, weshalb bei großen Nutzfahrzeugen wie beispielsweise Bussen und Lkw bevorzugt die 350 bar Technologie zum Einsatz kommt. Große Nutzfahrzeuge verfügen über mehr Nutzfläche, auf welcher zusätzliche H₂-Speichertanks für eine höhere Reichweite installiert werden können. Ein Standard lässt sich vor allem bei H₂BZ-Lkw, welche auf Langstrecken eingesetzt werden sollen, noch nicht absehen. Die 350 bar Technologie bietet auf diesem Gebiet nur begrenztes Einsatzpotenzial, weshalb derzeit weitere Betankungsansätze wie z.B. 500 bar GH₂⁴, 700 bar GH₂, Flüssigwasserstoff oder Kryo-druckwasserstoff, untersucht werden.

An den meisten der bereits in Hessen bestehenden Tankstellen können derzeit Pkw und leichte Nutzfahrzeuge bei 700 bar betankt werden. Nur an wenigen ist eine Betankung von schweren Nutzfahrzeugen bei 350 bar möglich.

⁴ GH₂ = gasförmiger Wasserstoff

Auswahl Tankstellenstandorte

Ausgehend von der in Kapitel 1.2.3 genannten Umfrage ergaben sich vier Orte im Landkreis Fulda und ein Standort im Main-Kinzig-Kreis, an welchen besagte Akteure und Interessierte eine H₂-Tankstelle als notwendig erachten. Alle Standorte befinden sich an wichtigen Verkehrsknotenpunkten oder stellen Standorte für Logistik- und Speditionsgewerbe dar (siehe Abbildung 3.2-1). An diesen fünf Orten wurden durch Vor-Ort-Begehungen und Gespräche mit ansässigen Unternehmen acht konkrete Flächen ermittelt, an welchen eine Wasserstofftankstelle errichtet werden kann. Eine Übersicht liefert Tabelle 3.2-1 und Abbildung 3.2-1. Die genauen Flächen können dem Anhang A.5.4 entnommen werden. In Abbildung 3.2-1 sind ferner die Zählstellen⁵ dargestellt, welchen das Lkw-Aufkommen im Landkreis Fulda für den Zeitraum 2017 bzw. soweit verfügbar 2018 und 2019 entnommen wurde. Hiermit wurden Bewegungsprofile erstellt, um damit auf ein mögliches Tankverhalten der Lkw zu schließen (siehe hierzu Abschnitt „Verkehrsaufkommen“).

Tabelle 3.2-1: Potenzielle Standorte für H₂-Tankstellen

	Ort	Bezeichnung
1	Flieden	Fa. Sostmeier
2	Flieden	Tankstelle RHV
3	Eichenzell	An L3307
4	Eichenzell	Euro Rastpark
5	Eichenzell	Eichenzell-Welkers Industriegebiet
6	Michelsrombach	A7 Abfahrt Hünfeld Schlitz
7	Schlüchtern	A66 Abfahrt Schlüchtern Nord
8	Fulda	A7 Abfahrt Fulda Nord



Abbildung 3.2-1: Potenzielle Standorte für H₂-Tankstellen und Zählstellen

Die ermittelten Flächen wurden entsprechend der Kriterien in Abbildung 3.2-2 untersucht und nach ihrer Eignung priorisiert. Nicht zu jedem Kriterium war eine ausreichende Datengrundlage vorhanden. Als besonders relevant wurden die Kriterien 1 bis 9 eingestuft. Die Standorte in Flieden, Eichenzell und Fulda Nord haben sich nach der Bewertung als besonders vielversprechend herausgestellt. Die Eigentumsverhältnisse müssen bei einer geplanten Realisierung entsprechend geprüft werden.

⁵ permanente, automatische Zählstelle aller Fahrzeuge auf Deutschlands Autobahnen und außerörtlichen Bundesstraßen gemäß Bundesanstalt für Straßenwesen, <https://bit.ly/3CRWhLC>

	Standort 1 Fliesen Fa. Sostmeier	Standort 2 Fliesen Tankstelle RHV	Standort 3 Eichenzell an L3307	Standort 4 Eichenzell Euro Rastpark	Standort 5 Eichenzell Eichenzell- Welkers Industrie- gebiet	Standort 6 Michels- rombach A7 Abfahrt Hünfeld Schlitz	Standort 7 Schlächtern A66 Abfahrt Schlächtern Nord	Standort 8 Fulda A7 Abfahrt Fulda Nord
Platzverhältnisse								
Erweiterungsmöglichkeiten								
An- / Abfahrtmöglichkeiten								
Verkehrsanbindung								
Erwartete Auslastung								
Auslastung durch weitere Nutzer								
Elektrische Anschlussleistung							keine Daten vorhanden	
Bautechnische Restriktionen							keine Daten vorhanden	keine Daten vorhanden
Anbindung zu H2-Erzeugung / H2-Versorgung								
Verfügbarkeit Wasser / Abwasser			keine Daten vorhanden			keine Daten vorhanden		
Lokale Nutzungsmöglichkeit von Nebenprodukten der Elektrolyse								

geeignet
bedingt
geeignet
nicht
geeignet

Abbildung 3.2-2: Bewertungsmatrix Auswahl Tankstellenstandorte

Potenzial erneuerbare Energien an den Tankstellenstandorten

Im Umkreis der potenziellen Tankstellenstandorte wurden die Flächen für WEA und PV-Anlagen identifiziert, um damit eine lokale Wasserstoffproduktion mit Elektrolyse und möglichst hoher Stromerzeugung zu ermöglichen. Die Flächen sind in Anlage A.5.5 und die potenzielle Energieerzeugung in Tabelle 3.2-2 zu erkennen. Damit können täglich theoretisch rund 1.500 Lkw⁶ mit lokal erzeugtem Wasserstoff versorgt werden.

Tabelle 3.2-2: Potenzial erneuerbare Energien im Umkreis der potenziellen Tankstellenstandorte (eigene Berechnung)

	Flieden	Eichenzell	Michelsrombach	Schlüchtern	Fulda Nord	Summe
Wind [MWh/a]	290.000	246.000	190.000	0	134.000	860.000
PV [MWh/a]	15.000	46.000	15.000	21.000	6.000	103.000
Summe [MWh/a]	305.000	292.000	205.000	21.000	140.000	963.000

Verkehrsaufkommen

Um die Nachfrage in Bezug auf Wasserstoff und somit die Größe potenzieller Tankstellen zu bestimmen, wurde mit den Verkehrsdaten der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für den Zeitraum 2017 bzw. soweit verfügbar 2018 und 2019 das automatisch gezählte Lkw-Aufkommen an den in Abbildung 3.2-1 abgebildeten Zählstellen analysiert. Die Standorte der Zählstellen befinden sich umliegend zu den im vorherigen Kapitel ermittelten potenziellen Wasserstoff-Tankstellenstandorten.

Aus den Verkehrsdaten Fulda Süd und Eichenzell sowie Flieden und Rückers wurde aufgrund der räumlichen Nähe der Standorte jeweils der Mittelwert gebildet. Abbildung 3.2-3 zeigt den stündlichen Mittelwert des Lkw-Aufkommens, aufgegliedert nach Messstunde / Uhrzeit pro Standort für das Jahr 2018.

⁶ Annahme: Wirkungsgrad Elektrolyse 65 %, 32 kg pro Betankungsvorgang

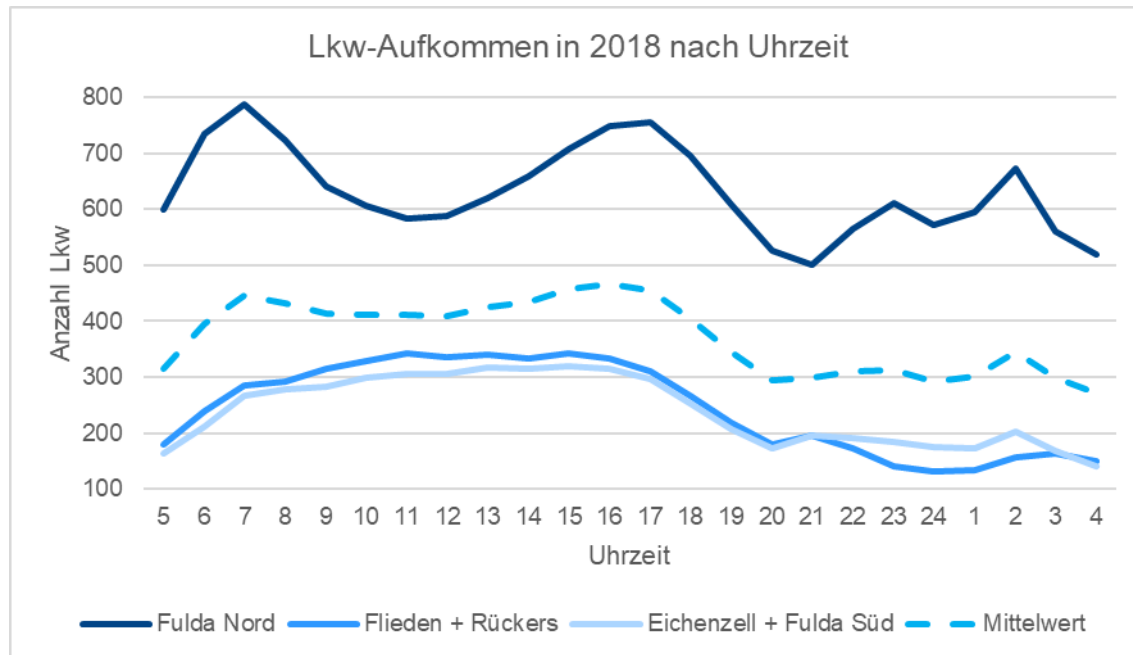


Abbildung 3.2-3: Lkw-Aufkommen nach Uhrzeit im Jahr 2018 an den Zählstellen 6879, 6715, 6877, 6680 und 6614 (Bundesanstalt für Straßenwesen)

Aus der Auswertung wird deutlich, dass sich das Profil in Fulda Nord erheblich von denen der anderen Standorte unterscheidet. Es weist im Gesamten ein höheres Verkehrsaufkommen auf, welches sich über den Tag außerdem anders verteilt als an den weiteren Standorten. Bei diesen ähneln sich sowohl die Anzahl der täglichen Lkw als auch die Verteilung der Lkw über den Tag. Über den Tag verteilt, also zwischen 07:00 und 17:00 Uhr, herrscht ein konstant hohes Verkehrsaufkommen, welches über Nacht abflaut.

Das Verkehrsaufkommen bei Fulda Nord ist um 7 Uhr und zwischen 15 und 18 Uhr am stärksten und steigt zwischen 23 und 2 Uhr erneut an. Mögliche Gründe für das Verkehrsprofil in Fulda Nord wären zum einen ein klassischer Speditionsverkehr, bei welchem die Fahrzeuge die Logistikstandorte für ihre täglichen Routen morgens verlassen und abends an diese zurückkehren und zum anderen ein nächtlicher Begegnungsverkehr, bei welchem sich zwei Lkw an einem bestimmten Punkt auf einer Strecke treffen, ihre Ladeeinheiten austauschen und wieder in die Richtung zurückfahren, aus der sie gekommen sind.

Betankungsprofil

Um einen Überblick über die notwendige zeitliche Verfügbarkeit von Wasserstoff an den Tankstellen zu erhalten, wurde mittels einer Abfrage bei lokalen Logistikern bzw. Spediteuren ein Betankungsprofil erarbeitet (siehe Abbildung 3.2-4), das sich durch Hauptbetankungszeiten in den Morgen- und Nachmittags- bzw. Abendstunden auszeichnet, während tagsüber und auch nachts wenig bis gar nicht getankt wird.

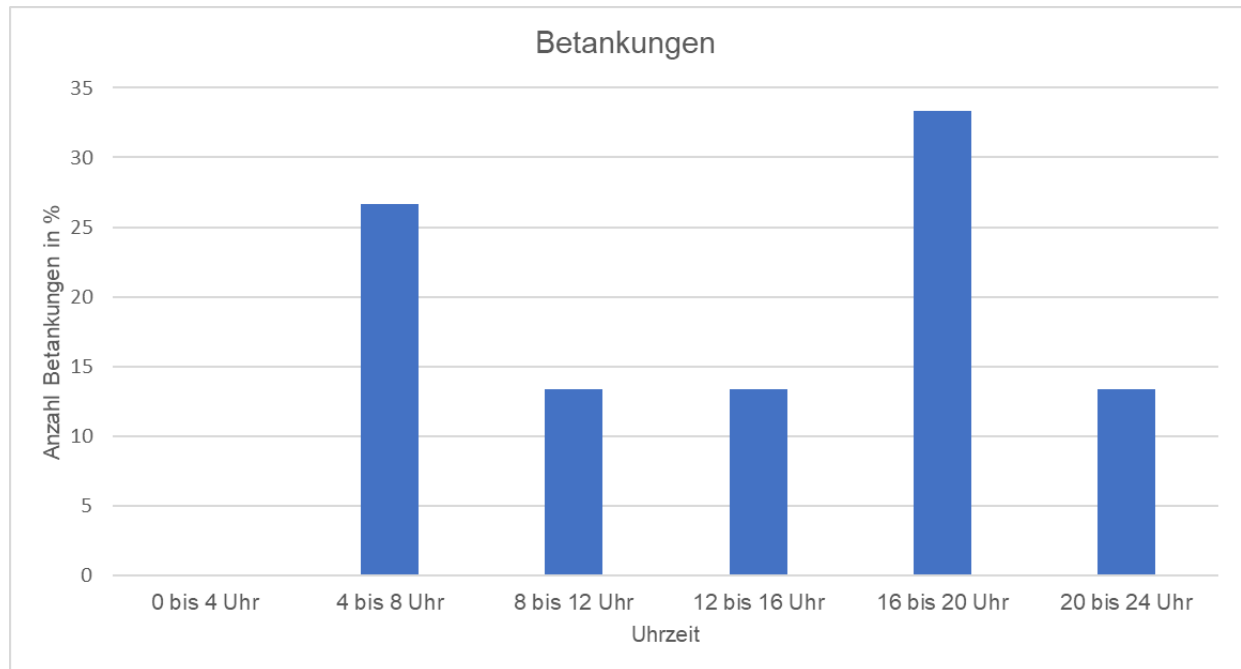


Abbildung 3.2-4: Betankungsprofil Logistiker / Spediteure Region Fulda

Wertet man das Lkw-Aufkommen im Großraum Fulda nach Wochentag und Uhrzeit aus, ist zu erkennen, dass unter der Woche die Zeit zwischen 6 und 19 Uhr die Hauptverkehrszeit für Lkw darstellt (siehe Abbildung 3.2-5). Zwischen 20 und 5 Uhr sinkt das Lkw-Aufkommen, bleibt jedoch auf einem hohen Niveau. An den Wochenenden ist das Lkw-Aufkommen deutlich geringer als unter der Woche. Dieses flaut in den frühen Samstagmorgenstunden ab, erreicht gegen 0 Uhr am Sonntag seinen Tiefpunkt und steigt erst sonntags gegen 23 Uhr wieder stark an. Dies ist auf das Lkw-Fahrverbot zurückzuführen.

Aus dem Lkw-Aufkommen lässt sich ableiten, dass ein Großteil der Betankungen nachmittags an Werktagen stattfinden wird. Ein Aufschwung ist in den Morgenstunden zu erkennen. Dieser erreicht nahezu bei allen Werktagen (außer samstags) am späten Nachmittag seinen Höchstpunkt und flacht abends ab, bevor morgens ein erneuter Anstieg stattfindet.

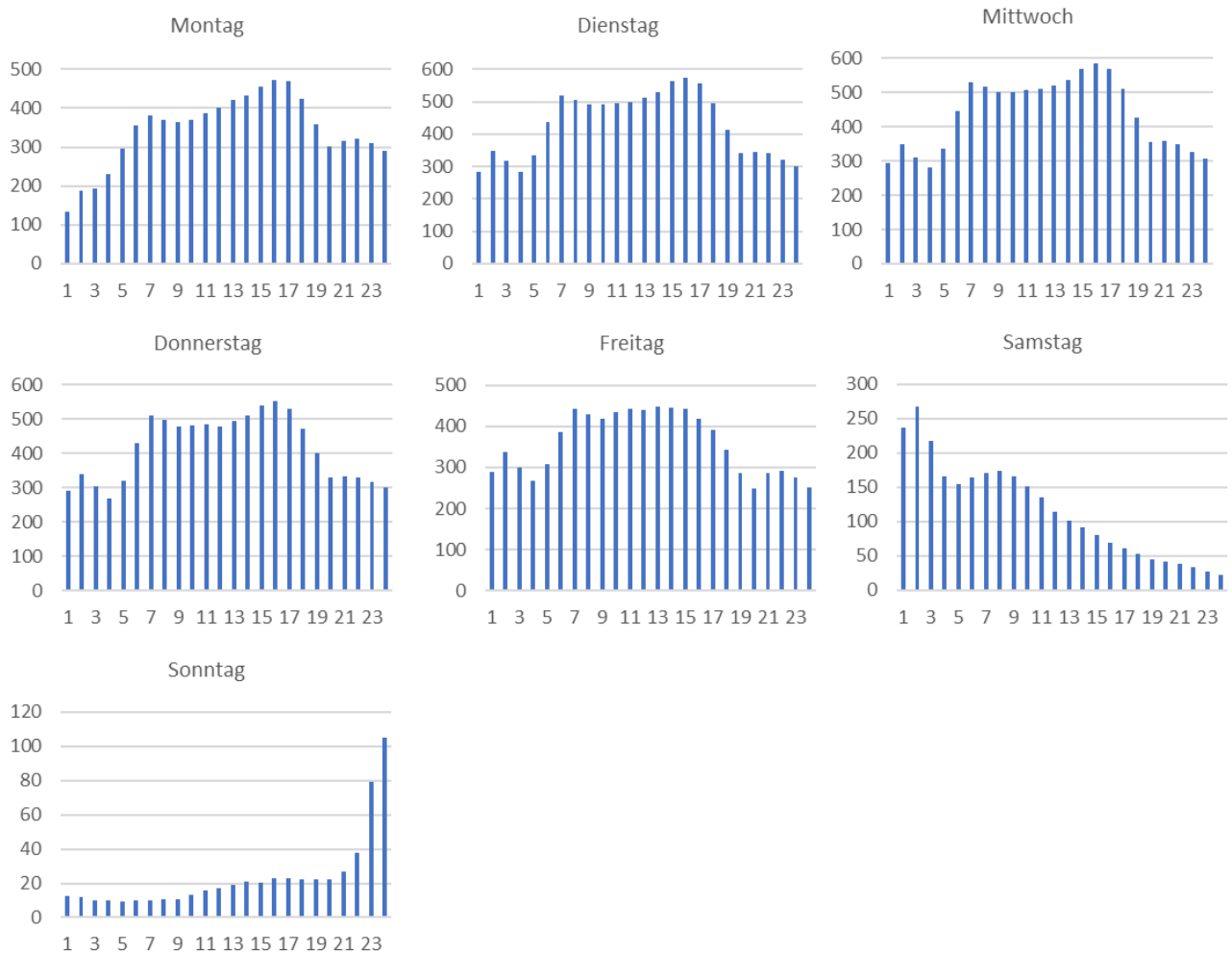


Abbildung 3.2-5: Lkw-Aufkommen nach Tag und Uhrzeit im Zeitraum 2017 bis 2019 an den Zählstellen 6879, 6715, 6877, 6680 und 6614 (Bundesanstalt für Straßenwesen)

3.2.2. Wasserstofftankstelle

Eine Wasserstofftankstelle besteht in der Regel aus einem oder mehreren Verdichtern, Speichern mit unterschiedlichen Druckstufen, einer Kälteanlage und einer Zapfsäule, wie in Abbildung 3.2-6 schematisch dargestellt. Je nach Größe und Auslegung der Tankstelle wird der Wasserstoff mit Trailern bzw. per Leitung angeliefert oder ist in eine Elektrolyseanlage integriert.

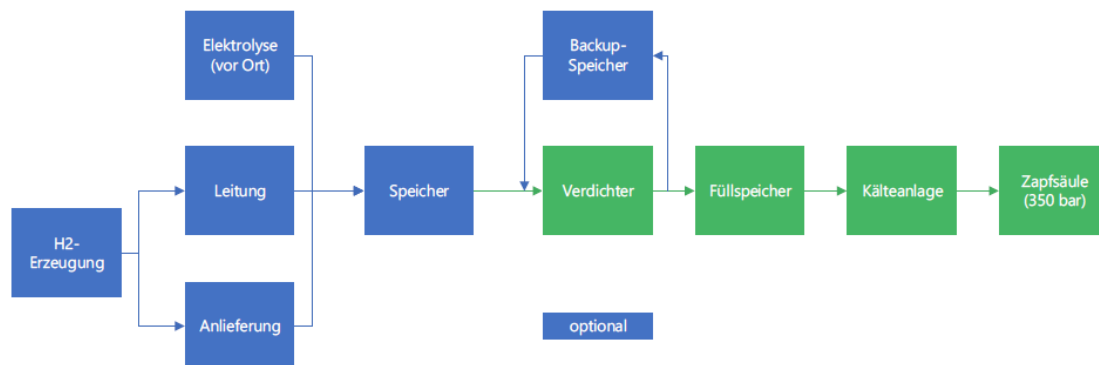


Abbildung 3.2-6: Schematischer Aufbau einer Wasserstofftankstelle

Liegt der Wasserstoff gasförmig vor, wird dieser verdichtet und in einem Füllspeicher zwischengespeichert bis eine Betankung erfolgt. Auch flüssiger Wasserstoff wird nach der Entnahme aus einem Speicher mittels einer Krypumppe verdichtet und in einen Hochdruckspeicher gepumpt, wo er bis zur Betankung gasförmig gelagert wird. Einen Überblick über unterschiedliche Kompressor- und Speichertechnologien, welche derzeit bei der H₂-Verdichtung und -Speicherung zum Einsatz kommen, können dem Anhang A.5.6 entnommen werden.

Auslegung Tankstellenvarianten

Ausgehend von den Betankungsprofilen und dem Lkw-Verkehrsaufkommen rund um die potenziellen H₂-Tankstellenstandorte wurden Auslegungsvarianten für eine H₂-Tankstelle erstellt. Einfluss auf die Auslegung haben beispielsweise die Anzahl der Betankungen pro Tag, das Zeitfenster für die Betankung, die Druckstufe und die Betankungszeit der Fahrzeuge sowie die Verfügbarkeit und Speicherung des Wasserstoffs.

Um einem stufenweisen Hochlauf der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge gerecht zu werden, wurden vier Auslegungsvarianten Größe S, M, L und XL bestimmt. Die Einstufung orientiert sich dabei an einem täglichen Wasserstoffbedarf an der Tankstelle (siehe Tabelle 3.2-3.)

Tabelle 3.2-3: Größe Wasserstofftankstellenvarianten

	S	M	L	XL
Tägliche Betankungsmenge	500 kg/d	1.500 kg/d	2.500 kg/d	3.500 kg/d

Die Betankung wurde dabei mit einem Fahrzeugfülldruck in Höhe von 350 bar festgelegt, da dies mit dem Xcient Fuel Cell von Hyundai und dem Brennstoffzellen-Lkw von Hyzon Motors die bisher einzig verfügbare Tank-Technologie bei Lkw am Markt darstellt.

Bei dieser Studie wurde exemplarisch für alle Elektrolysesysteme ein PEM-Elektrolysesystem⁷ der Firma ITM Power GmbH herangezogen. Es handelt sich um ein in sich geschlossenes System, das in einem modifizierten ISO-Container untergebracht und nach dem Baukastenprinzip aufgebaut ist. Das System enthält mehrere in Reihe geschaltete PEM-Einzelzellen, sogenannte Stacks, sowie alle erforderlichen Nebenanlagen, wie Wasseraufbereitung, Wasserstoffaufbereitung, thermische Steuerung, Umrichter, Systemsteuerung und Sicherheitssysteme. Der Container ist für den Einsatz im Freien geeignet und beinhaltet einen Schaltraum, einen Gaserzeugungsraum (bestehend aus separater Prozesskammer und Stackkammer) und einen Gasaufbereitungsraum. Weiterhin gibt es ein Verteilerrohrsystem, das Wasserstoff zum Druckspeicher bzw. zum Kompressor leitet. Die Stack-Module werden in Reihen von 3 Stacks gebaut, welche wiederum ein Modul für eine elektrische Eingangsleistung von etwa 2 MW bilden.

Der erzeugte Wasserstoff wird in einem entsprechenden Behälter mit 30 bar gelagert, während der Sauerstoff in die Atmosphäre abgelassen wird. Die 30 bar Speicherung dient als Zwischenpuffer für das Gas, bevor es zur weiteren Komprimierung geleitet wird. Die beschriebene Containerlösung kommt vor allem bei dezentralen Anlagen zum Einsatz. Durch diese lässt sich die vor-Ort-Wasserstofferzeugung einfach handhaben, außerdem wird die Aufstellzeit reduziert. Bei Anlagen der Größenordnung $>4.000 \text{ kgH}_2 / \text{d}$ spricht man von kleinen Industrieanlagen, die zukünftig eine zentrale Versorgungsrolle spielen werden. Solche Anlagen werden tendenziell nicht auf der Basis von ISO-Containern konzipiert.

Eine Übersicht über weitere Hersteller von Elektrolyseuren befindet sich in Anhang A.5.7.

Die Betankungsanlage ist im Betrachtungsfall ebenfalls in Containern installiert und besteht aus

- Verdichter
- Hochdruckspeichern in Racks und / oder Containern
- Single / Dual Zapfsäule für 350 bar Lkw

Die in den Verdichtercontainern integrierten Verdichter-Einheiten liefern den für die Betankung benötigten Wasserstoff direkt aus der Wasserstoffversorgung (z.B. Zwischenspeicher der Elektrolyse) in die Hochdruckspeicher der Anlage.

Während eines Betankungsvorgangs wird der komprimierte Wasserstoff aus dem integrierten Hochdruckspeicher entnommen und über die Zapfsäule in das Fahrzeug gefüllt.

Für die Auslegungsfälle wurde ein nicht Hersteller spezifischer Kolbenverdichter mit einer Kapazität von 50 kg/h und der ionische Verdichter von Linde mit einer Kapazität von 28 kg/h betrachtet. Kolbenverdichter arbeiten nach dem Verdrängerprinzip und verfügen über einen Zylinderraum, in welchem das zu verdichtende Medium eingebracht wird und dessen Volumen durch einen Kolben verringert, sprich verdichtet, wird. Durch diese Art der Verdichtung verändert sich neben dem Volumen des Mediums auch gleichzeitig dessen Druck. Kolbenverdichter für Wasserstoff werden trockenlaufend ausgeführt, um Verunreinigungen zu vermeiden. Sie können ein- oder mehrstufig

⁷ Bei der Proton Exchange Membrane (PEM) Elektrolyse wird ein Festpolymer-Elektrolyt – die Protonen-Austausch-Membran – von Wasser umspült. Wird elektrische Spannung an die Membran angelegt, wandern Protonen durch diese hindurch. Folglich entsteht an der Kathode Wasserstoff und an der Anode Sauerstoff.

sein und die Kolben werden meistens hydraulisch angetrieben. Das bei der Kompression erwärmte Gas muss nach der Verdichtung abgekühlt werden. Beim ionischen Verdichter handelt es sich um einen nahezu isotherm arbeitenden Verdrängungskompressor. Für den ionischen Verdichtungsprozess wird anstelle eines beweglichen metallischen Kolbens eine bewegliche Flüssigkeitssäule (ionische Flüssigkeit) zum Verdichten des Gases genutzt. Durch ein hydraulisches System wird die Flüssigkeitssäule in eine zyklische Auf- und Abwärtsbewegung versetzt. Weitere Verdichtertechnologien finden sich im Anhang A.5.6 wieder.

Die bei der Betankungsanlage zum Einsatz kommenden Hochdruckspeicherflaschen mit einem Betriebsdruck von 500 bar werden beispielsweise in einem Gestell installiert und aus energetischen Gründen in eine oder mehrere Sektionen unterteilt. Bei den Sektionen differenziert man z.B. Nieder-, Mittel- und Hochdruckspeicher, wobei alle Speichersektionen auf denselben Speicherdruck vorgespannt sind. Dank dieser Sektion ist es möglich, das Fahrzeug kaskadiert⁸ zu befüllen, um dadurch den Füllgrad des Fahrzeugs optimiert zu erreichen.

Die betrachtete Zapfsäule ist mit einer (Single) oder zwei (Dual) 350 bar Zapfkupplungen ausgeführt. Die Zapfsäule ist zur Kommunikation mit anderen Systemen, z.B. zur Verrechnung und Anmeldung, standardmäßig mit marktüblichen Schnittstellen ausgestattet.

In Tabelle 3.2-4 und Tabelle 3.2-5 sind die wichtigsten in der Studie zugrunde gelegten Parameter aufgeführt.

Eine Übersicht über Hersteller von H₂-Tankstellen findet sich im Anhang A.5.8.

Tabelle 3.2-4: Parameter Anlagentechnik

Anlagenkomponente	Elektrische Leistung [kW]	Druck [bar]	Massenstrom [kg/h]
Elektrolyse (ein Modul)	2.000	Ausgang: 30	36
Kolbenverdichter	124	Saugdruck: 30 Enddruck: 500	50
Ionischer Verdichter	65	Saugdruck: 15 Enddruck: 500	28

⁸ Bei einer kaskadierten Betankung strömt der Wasserstoff zunächst aus einem Niederdruckspeicher in das Fahrzeug über. Anschließend wird das Fahrzeug je nach benötigter Druckstufe aus dem Mitteldruck- oder Hochdruckspeicher weiter befüllt, bis der finale Druck erreicht wird.

Tabelle 3.2-5: Parameter Speicher

Anlagenkomponente	Geometrisches Volumen [m ³]	Druck [bar]	Speichertyp ⁹
ND-Speicher	10	30	Typ I
HD-Speichertubes	1,20	300 – 500	Typ I
10ft HD-Speichercontainer	5,25	20 – 500	Typ IV

Je nach Anzahl der pro Tag zu betankenden H₂BZ-Lkw verfügen die Tankstellenvarianten über unterschiedlich viele Speicher, Verdichter sowie Zapfsäulen. Die vor Ort gespeicherte Menge variiert ebenfalls mit der Anzahl an Lkw, die täglich betankt werden soll. Sie ist außerdem abhängig von der Wasserstoffmenge, welche vor Ort erzeugt und direkt verbraucht werden kann.

Einen Überblick über die Auslegungsvarianten sowie die unterschiedlichen Konfigurationen der Tankstellen bietet Tabelle 3.2-6. Die für die Tankstellen benötigten Flächen variieren nach Anzahl der einzusetzenden Speicher und Verdichteranlagen. Alle unter Punkt 3.2.1 auf Seite 26 genannten Standorte eignen sich in Hinblick auf die Fläche für den Aufbau der vier Auslegungsvarianten. Anhang A.5.10 können mögliche Aufstellungspläne für die Tankstellen entnommen werden. Beispielhaft ist in der Abbildung 3.2-7 die Auslegungsvariante S dargestellt und beschriftet.

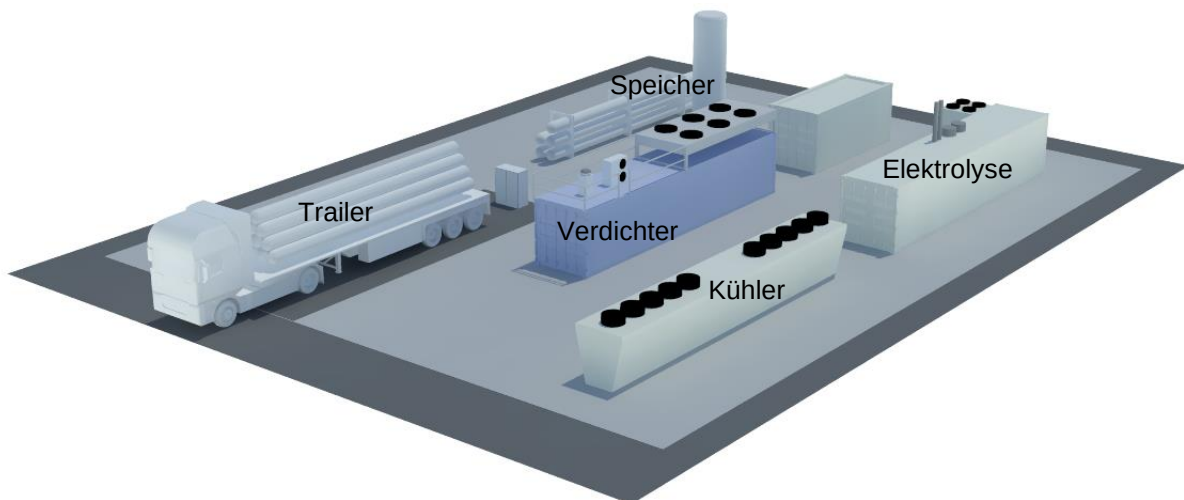


Abbildung 3.2-7: Aufstellungsvariante S

⁹ Eine Übersicht über derzeit verfügbare H₂-Speichertechnologien findet sich in Anhang A.5.9.

Tabelle 3.2-6: Auslegungsvarianten Wasserstofftankstelle

	S_a	S_b	S_c	M_a	M_b	L_a	L_b	XL_a	XL_b
Tägliche Betankungs- menge	500 kg / d			1.500 kg / d		2.500 kg / d		3.500 kg / d	
Anzahl Lkw pro Tag¹⁰	15			46		78		109	
Wasserstoffversorgung	ELY ¹¹ Teillast	ELY Volllast	H ₂ -Anlie- ferung	ELY Teillast	ELY Volllast	ELY Teillast	ELY Volllast	ELY Teillast	ELY Volllast
Leistung Windpark + PV-Anlage	10,6 MW			26,8 MW		42,4 MW		58,0 MW	
Leistung Elektrolyse	2 MW			6 MW	4 MW	10 MW	8 MW	14 MW	10 MW
Anzahl Verdichter inkl. Redundanz	2			3		4	3	4	
Speichermenge	215 kg	226 kg	190 kg	526 kg	570 kg	918 kg	973 kg	1.152 kg	1.339 kg
Anzahl Dispenser	1			1		2		3	
Flächenbedarf	900 m ²			1.200 m ²		1.700 m ²		2.200 m ²	

¹⁰ Angenommen Hyundai Xcient mit 32 kg Tankfüllung¹¹ ELY = Elektrolyse, Teillast = Betrieb ELY in Minimallast während EE-Schwachlastzeiten und höhere Last in EE-Hochlastzeiten, Volllast = Betrieb ELY durchgängig in hoher Last

Externe Bezugsquellen von Wasserstoff

Der Wasserstoff für die Versorgung der BZ-Lkw in Ostthessen soll primär in der Region selbst erzeugt werden. Für den Aufbau und Hochlauf der Fahrzeuge und Tankstellen im Raum Fulda ist es jedoch notwendig, die Verfügbarkeit von Wasserstoff aus anderen Quellen zu klären. Derzeit gibt es in einem 300 km Radius (Fahrstrecke) um Fulda vier alternative Wasserstoffquellen, welche über eine Wasserstoffabfüllung verfügen. Diese befinden sich in Frankfurt am Main im Industriepark Höchst, im Energiepark Mainz, am Chemiestandort Leuna und im Chemiepark Marl. Während in Frankfurt-Höchst der Wasserstoff derzeit als Nebenprodukt einer Chlor-Alkali-Elektrolyse anfällt und eine neue PEM-Elektrolyse aufgebaut wird, wird im Energiepark Mainz mittels Elektrolyse grüner Wasserstoff aus Windenergie erzeugt. In Leuna und Marl wird der Wasserstoff durch Dampfpreformierung erzeugt. In Leuna entsteht durch die ITM Power GmbH und Linde AG ein 24-Megawatt-Elektrolyseur, der im Jahr 2022 in Betrieb gehen soll. Es ist zu erwarten, dass im Laufe der nächsten Jahre weitere Anlagen zur Wasserstoffherzeugung im industriellen Maßstab entstehen, welche ebenfalls über eine Abfüllung verfügen werden.

Transport- und Anlieferungskonzepte von Wasserstoff

Wird Wasserstoff in kleinen dezentralen Anlagen erzeugt z.B. an der Tankstelle selbst, entfällt der Transport. Wird der Wasserstoff an großen zentralen Anlagen erzeugt, muss dieser zum finalen Anwendungsort transportiert werden. Hierfür können Lkw, Züge, Pipelines und auch Schiffe zum Einsatz kommen. Einen Überblick liefert Tabelle 3.2-7.

Tabelle 3.2-7: Transportmöglichkeiten für Wasserstoff

	Beschreibung	Menge	Transportstrecke
Trailer gasförmig	Transport in entsprechend ausgelegten Lkw-Trailern mit Flaschenbündeln bei 200 bis 500 bar. Mengen ab 500 bis 1.100 kg H ₂	500 bis 1.100 kg H ₂ pro Trailer	kurz bis mittel
Trailer flüssig	Transport des H ₂ bei -253°C in sogenannten Kryotanks mit spez. Kälteisolation bis 3.500 kg. Hoher Energiebedarf erforderlich. Boil-off ¹² Verluste möglich.	bis 3.500 kg H ₂ pro Trailer	mittel
Pipeline	Mit hohem baulichem und wartungstechnischem Aufwand verbunden. Beimischung von H ₂ ins Erdgasnetz perspektivisch möglich.	Unbegrenzt	unbegrenzt
Schiff	Transport von flüssigem Wasserstoff in speziellen Containern	Mehrere Tonnen	lang
Zug	Umweltfreundlicher Transport. Technisch und rechtlich möglich. Bis dato fehlen geeignete Transportbehälter	Mehrere Tonnen	lang

¹² Eine Erwärmung des Speichertanks führt dazu, dass der Flüssigwasserstoff im Inneren verdampft, wodurch sogenanntes Boil-off-Gas entsteht. Dieses muss abgelassen werden, um den Druck im Tank aufrechtzuerhalten.

Durch chemische Bindung in flüssigen H₂-Trägern wie LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) wird eine höhere Energiedichte ohne Druck und bei niedrigen Temperaturen erreicht. Hierfür sind zusätzliche Prozessschritte und Energieaufwände erforderlich. Mit einem 40-t-Lkw können ca. 1.800 kg Wasserstoff transportiert werden (Bundesministerium für Bildung und Forschung). Das Verfahren befindet sich noch in der Testphase und wird hier nicht betrachtet, da für eine zeitnahe Umsetzung der Ergebnisse nur aktuell auf dem Markt verfügbare Technologien in der Studie betrachtet wurden.

Transport Trailer / Container

Bei kleinen und mittleren Verbräuchen und kurzen Strecken bis 300 km ist die Anlieferung von Wasserstoff per Lkw sinnvoll. Der Wasserstoff wird dabei entweder flüssig bei einer Temperatur von unter -253°C oder gasförmig bei einem Druck von 200 bar bzw. 300 bar (zukünftig auch 380 oder 500 bar) transportiert. Dabei kommen unterschiedliche Druckbehälter zum Einsatz. Die gespeicherte Menge entspricht abhängig vom Druck ca. 500 bis 1.100 kg Wasserstoff, bei Flüssigwasserstoff bis 3.500 kg.

Ein weiterer Verkehrsträger zum Transport von Wasserstoff sind Schienenfahrzeuge. Der Vorteil liegt darin, dass Wasserstoff per Schiene in deutlich größeren Mengen und umweltfreundlich transportiert werden kann. Technisch und rechtlich ist der Transport von Wasserstoff mit der Bahn bereits möglich, es fehlt jedoch noch an geeigneten Transportbehältern. Regulatorische Mengenbeschränkungen gibt es im Schienentransport grundsätzlich nicht. Jedoch ist die Transportzeit per Schiene länger als per Lkw. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass der Transport im Schienengüterverkehr größtenteils nachts stattfindet, da der Personenverkehr stets Vorrang vor dem Güterverkehr hat (DB Netze et al., 2020).

Zum Industriepark Höchst in Frankfurt am Main sowie zu den Leuna-Werken und zum Chemiepark Marl besteht eine direkte Anbindung an das Schienennetz. Durch eine Kombination aus Zug und Lkw-Trailer könnten größere Mengen Wasserstoff auch von weiter entfernten H₂-Produktionsstandorten klimafreundlich in die Region Fulda transportiert werden.

Transport Pipeline

Eine weitere Möglichkeit des Wasserstofftransports ist per Pipeline. Erste Studien darüber, Wasserstoff im bereits existierenden Gasnetz zu transportieren, laufen, bspw. in Holzwickede in Nordrhein-Westfalen. Dort testet die Firma Westnetz GmbH innerhalb des Forschungsprojekts "H2HoWi" die Umstellung einer bestehenden Erdgasleitung auf reinen Wasserstoff (Neumann, 2020). Der Transport von Wasserstoff per Pipeline wäre vor allem bei einem kontinuierlichen Bedarf von größeren Wassermengen über weite Strecken sinnvoll. Die Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas hat den Plan für ein 5.900 km langes Wasserstoffnetz entworfen. 90 % der vorhandenen Leitungen des bestehenden Erdgasnetzes könnten hierfür genutzt werden. Ein Rechtsrahmen muss jedoch noch geschaffen werden (FNB Gas, 2020). Abbildung 3.2-8 zeigt einen Ausschnitt des deutschen Fernleitungsnetzes (H-Gas). Darauf ist zu erkennen, dass eine

Leitungsanbindung in den Raum Fulda besteht. Inwiefern diese Infrastruktur zukünftig für den Transport von Wasserstoff genutzt werden kann, muss gesondert untersucht werden.

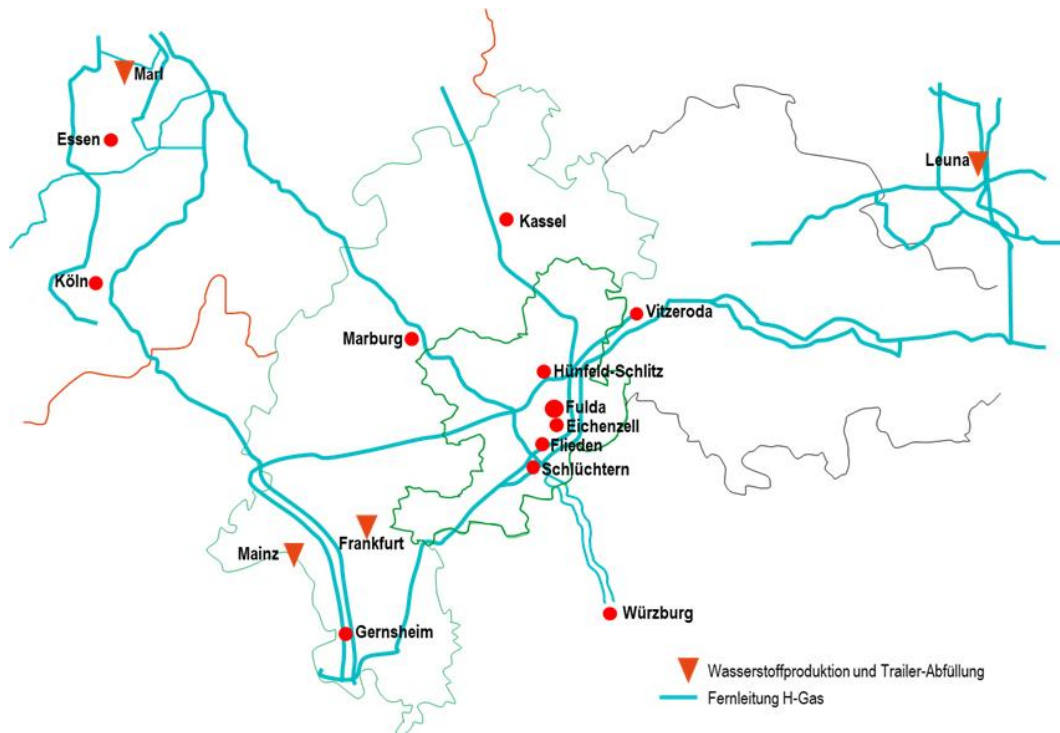


Abbildung 3.2-8: Ausschnitt aus dem deutschen Gasfernleitungsnetz; eigene Abbildung nach (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016)

Kosten gasförmige Wasserstoffbelieferung mit Trailern

Die Kosten für gasförmigen Wasserstoff sind abhängig von unterschiedlichen Faktoren. Einen Einfluss auf den Preis haben die Art der Quelle, die Druckstufe des H₂-Trailers und des an der Tankstelle installierten H₂-Tanks, die Reinheit, die Entfernung zwischen der Wasserstoffabfüllstation und dem Bestimmungsort, die Bedarfsmenge und die ggf. zu mietenden Anlagenkomponenten wie z.B. Wasserstoffspeicher, Traileranschlussschrank.

Wasserstoff, der aus grünen Energiequellen gewonnen wird, hat aktuell einen höheren Preis als der sogenannte graue Wasserstoff, der aus konventionellen Quellen erzeugt wird.

Aktuell kommen beim Transport zwei Druckstufen zum Einsatz – 200 und 300 bar. Je höher die Druckstufe, desto mehr Energie muss für das Verdichten des Wasserstoffs aufgewendet werden aber desto mehr Wasserstoff kann mit einer Transporteinheit („Trailer“) transportiert werden.

In Bezug auf die Reinheit des Wasserstoffs spielt die Anwendung des Wasserstoffs eine Rolle. Beispielsweise erfordert Wasserstoff in der Qualitätsstufe 3.8 (99,98 % H₂) einen geringeren Reinigungsaufwand als in der Qualitätsstufe 5.0 (Reinheit 99,999 %). Welche Wasserstoffqualität zur Versorgung eines Brennstoffzellenfahrzeuges erforderlich ist, legt in der Regel der Hersteller des Fahrzeugs fest.

Auch die tägliche Bedarfsmenge hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wasserstoffkosten. Je weniger Wasserstoff pro angeliefertem Trailer in einen lokalen Speichertank abgegeben werden kann, desto höher fallen die spezifischen Wasserstoffkosten aus. Im Gesamtsystem spielt auch der benötigte Saugdruck des eingesetzten Wasserstoffverdichters eine Rolle, da dieser die Nachfüllgrenze des sich an der Tankstelle installierten Tanks bestimmt.

Es besteht außerdem die Möglichkeit bestimmte Anlagenteile in den Wasserstoffpreis zu integrieren. So können die Kosten für den Traileranschlussschrank oder für einen Niederdruckspeicher zum Umfüllen des Wasserstoffs in den Wasserstoffpreis eingerechnet werden.

Bei einer Anlieferung in die Region Fulda liegt das Spektrum des Wasserstoffpreises – abhängig von den oben genannten Randbedingungen – bei einer Menge von 200 bis 800 kg/d grünem Wasserstoff sowie einem Anlieferdruck von 300 bar zwischen 6 €/kg und 9 €/kg.

3.2.3. Wirtschaftlichkeit

In die H₂-Kostenbetrachtung (ohne Margen und Verzinsung) sind der Investitionsumfang der einzelnen Anlagen, die Kosten für den Betrieb der Anlagen sowie die Erlöse aus dem Stromverkauf eingeflossen. Die genauen Kriterien sind in Tabelle 3.2-8 dargestellt. Die Preise und Kosten entsprechen dem Stand von Juli 2021.

Tabelle 3.2-8: Kriterien zur Wasserstoff-Kostenbetrachtung

Betrachtung	Beschreibung	Voraussetzung
Investitionsumfang	- Windpark, PV-Anlage inkl. Netzanschluss - Elektrolyse - Verkabelung zwischen Windpark / PV-Anlage und Elektrolyse - Speicherung / Trailer-Anlieferung - Tankstelle mit Verdichter, Speicher, Kälteanlage, Dispenser - Verrohrung, Bautechnik, Planung, Genehmigung, Montage, Inbetriebnahme	- Grundstück vorhanden - Erschlossenes und planungsfähiges Tankstellengebiet - Netzanschluss vorhanden
Betriebskosten	- Betrieb - Wartung und Instandhaltung - Wasser - Stromkosten Netzbezug	- Strompreis Netzbezug 19,01 Cent / kWh
Erlöse	- Annahme Marktpreis ohne Kosten für Vermarktung, Bilanzkreismanagement etc. - Kein Verkauf von Wärme oder Sauerstoff	

Der Preis für den angesetzten Strom aus dem Netz setzt sich wie folgt zusammen:

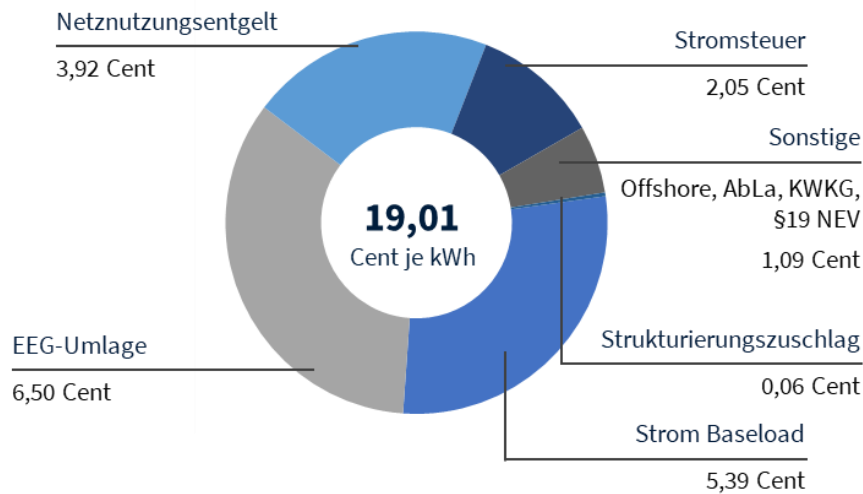


Abbildung 3.2-9: Zusammensetzung Strompreis Netzbezug ohne Mehrwertsteuer (Stand Juli 2021)

Unter Betrachtung der beschriebenen Investitionskriterien ergeben sich die in Abbildung 3.2-10 dargestellten Investitionskosten für die jeweiligen Auslegungsvarianten S bis XL gemäß Tabelle 3.2-6. Bei der Variante S_c, bei welcher der Wasserstoff nicht vor Ort erzeugt, sondern angeliefert wird, fallen die Investitionskosten aufgrund der fehlenden eigenen Erzeugungsanlage mit ca. 3,6 Millionen Euro am geringsten aus. Mit circa 77 Millionen Euro sind die Investitionskosten bei der Auslegungsvariante XL_a am höchsten.

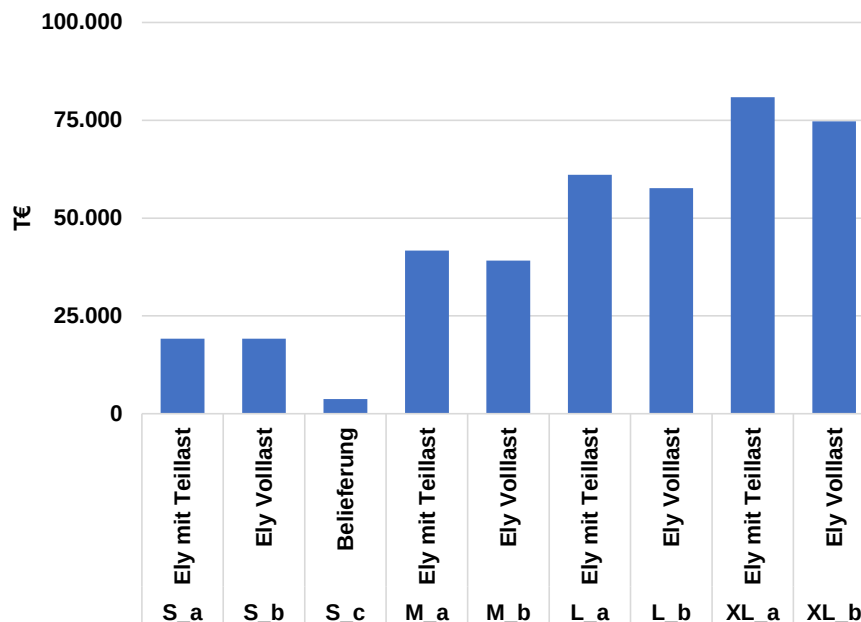


Abbildung 3.2-10: Investitionskosten der Auslegungsvarianten (Tankstelle inklusive Windpark und Photovoltaikanlage) (Stand Juli 2021)

Aus den Erzeugungsprofilen, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurde für jede Auslegungsvariante die Energiemenge bestimmt, die jährlich erzeugt werden kann. Von dieser Energiemenge wurde dann unter Berücksichtigung des Tankprofils, wie in Kapitel 3.2.1 auf Seite 29 dargestellt, der Bedarf zur Wasserstoffherzeugung in der Elektrolyse sowie zur Verdichtung und für die Nebenanlagen bestimmt. Die restliche Energiemenge kann als Überschuss ins Stromnetz eingespeist werden. Es gibt zusätzlich auch eine Energiemenge, die aus dem Netz bezogen werden muss, wenn kein Wind- und Solarstrom zur Verfügung steht. Die Netzbezugsmenge kann auch als Grünstrom von einem Netzbetreiber eingekauft werden. Die in der Studie verwendeten Netzbezugskosten sind in Abbildung 3.2-9 zu sehen. Für die Vergütung des Überschussstromes aus den WEA und der PV-Anlage wurden 5,8 Cent/kWh angesetzt.

Für die Vergleichbarkeit der Auslegungsvarianten wurden die spezifischen Wasserstoffkosten in Euro pro Kilogramm ermittelt (siehe Abbildung 3.2-11). Gegenübergestellt ist in der Abbildung ein Preis von 9,50 €/kg, der aktuell an H2Mobility-Tankstellen aufgerufen wird.

Die Betrachtung der spezifischen Wasserstoffkosten wurde einmal ohne eine Förderung der Investitionskosten und einmal mit einer Förderung von 50 %¹³ der Investitionskosten (Elektrolyseanlage, Tankstellenanlage) berechnet.

Ebenfalls wurde eine Betrachtung ohne EEG-, KWKG-, Offshore-Haftungsumlage durchgeführt. Die Höhe der Abgaben und Umlagen haben erheblichen Einfluss auf die Wasserstoffkosten.

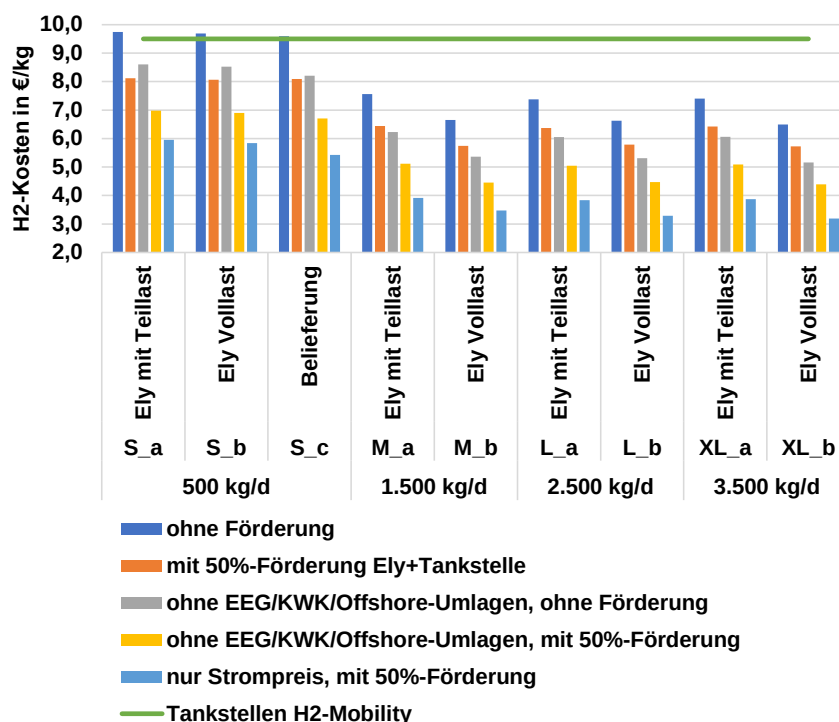


Abbildung 3.2-11 Wasserstoffkosten im Vergleich unter Betrachtung unterschiedlicher Fördermöglichkeiten (Stand Juli 2021)

¹³ Bis zu 50 % übliche Förderquote bei Vorhaben

Betrachtet man ausschließlich die Erzeugungskosten für Wasserstoff aus der Elektrolyse unter Berücksichtigung der reinen Stromgestehungskosten aus den WEA und PV-Anlagen und ohne die Tankstellenkosten für Verdichtung, Speicherung und Vertankung, dann können Erzeugungskosten zwischen 5,80 und 6,70 €/kg für die Auslegungsvarianten M bis XL erzielt werden (siehe Anhang A.5.11).

Vergleicht man die Lkw-Verbrauchskosten für Wasserstoff¹⁴ (292 kWh/100 km) und Diesel¹⁵ (294 kWh/100 km) bezogen auf die Reichweite, so ist zu erkennen, dass mit steigenden Dieselpreisen die Wasserstoffkosten aus den Anlagenvarianten M bis XL gleiche Größenordnungen erreichen (siehe Abbildung 3.2-12).

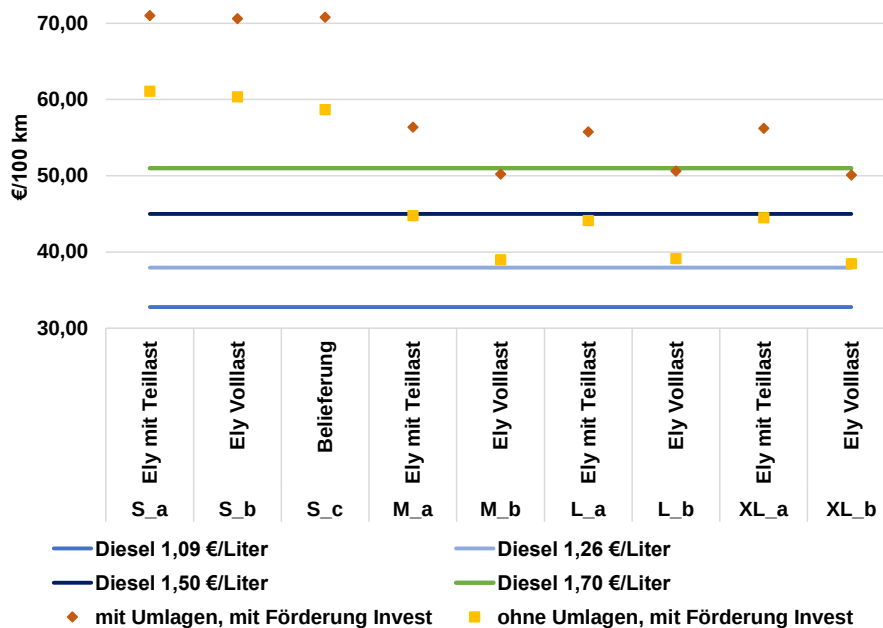


Abbildung 3.2-12 Wasserstoffkosten im Vergleich zu Dieselpreisen (ohne MWSt.) bezogen auf Kilometer (Stand Juli 2021)

700 bar Betankungsmöglichkeit

Die betrachteten Tankstellenkonfigurationen in den Anlagenvarianten sind wie bereits erwähnt alle für die Befüllung von Nutzfahrzeugen oder Busse mit 350 bar ausgelegt. Für Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff 700 bar müssen Rohrleitungen, Speicher, Verdichter etc. auf diese Druckstufe ausgelegt werden. Im Verhältnis zu den erwarteten höheren Betankungsmengen bei 350 bar wäre eine von Beginn an auf 700 bar ausgelegte Tankstelle überdimensioniert. Auch reduzieren sich die potenziellen Anlagenlieferanten und Investitions- sowie Betriebskosten fallen höher aus. Sollte an einem potenziellen Tankstellenstandort der Bedarf für leichte Nutzfahrzeuge 700 bar bestehen, so kann mit einer 700 bar Stand-Alone-Anlage die Tankstelle aufgerüstet werden. Diese Anlage umfasst einen Container, in dem sich der Verdichter, eine Kälteanlage, ein

¹⁴ Heizwert 33,33 kWh/kg, 8,75 kg/100 km

¹⁵ Heizwert 9,8 kWh/Liter, 30 Liter/100 km

1000 bar Speicher und ein Dispenser befinden und hat eine Kapazität von 350 kg in 24 Stunden. Die Kosten einer solchen Anlage können mit etwa 1,3 Millionen Euro abgeschätzt werden.

Genehmigungsverfahren der Wasserstoffinfrastruktur

Für H₂-Tankstellen ohne eigene Wasserstofferzeugung und mit einer Lagerung von weniger als drei Tonnen sind für die Zulassung die Landesbauordnung (LBO) sowie die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) ausschlaggebend. Bei Vor-Ort-Erzeugung von Wasserstoff und / oder einer Lagerung von mehr als drei Tonnen Wasserstoff ist eine Zulassung gemäß dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) nach 4. BImSchV sowie der LBO zu beantragen. Letztere ist mit einem höheren bürokratischen und zeitlichen Aufwand verbunden. Grundsätzlich ist eine spezifische Gefährdungsbeurteilung gemäß BetrSichV durchzuführen, um standortspezifische Randbedingungen berücksichtigen zu können. Die Lagerung an gasförmigem Wasserstoff an einer Wasserstofftankstelle darf maximal 5.000 kg betragen. Darüber hinaus fallen weitere Betreiberpflichten nach 12. BImSchV (Störfall-Verordnung) an. Einen Überblick gibt Abbildung 3.2-13.

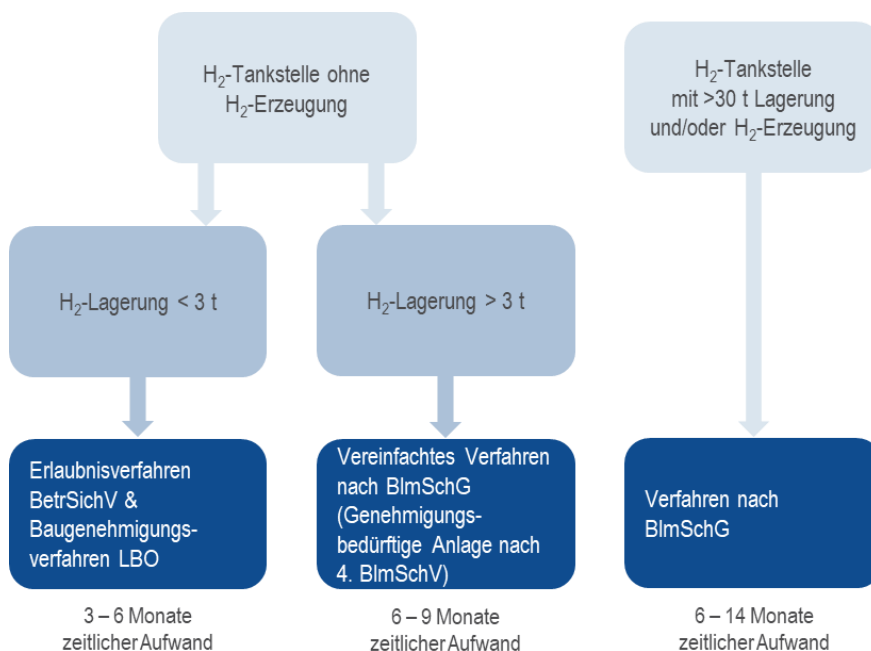


Abbildung 3.2-13: Genehmigungsverfahren der Wasserstoffinfrastruktur

Betreibermodelle Wasserstofftankstellen

Wasserstofftankstellen werden je nach Betreiber auf privaten Flächen installiert, sind öffentlich zugänglich, werden in bestehende Tankstellen integriert oder fungieren als Stand-Alone-Lösung. In Bezug auf Kosten und Eigenaufwand sowie dem Einfluss in der Auslegung bestehen Unterschiede bei den einzelnen Ausführungen (siehe Abbildung 3.2-14). Beim sogenannten **Betreibermodell** stellt der Nutzer, beispielsweise ein Logistiker oder Busunternehmen, in Abstimmung

mit dem Betreiber der Tankstelleninfrastruktur private Flächen für den Aufbau der H₂-Tankstelleninfrastruktur zur Verfügung. Für den Nutzer ergibt sich ein vertraglich festgelegter H₂-Preis. Ferner hat ein Flottenbetreiber die Möglichkeit, eine **H₂-Tankstelle in Eigenregie aufzubauen**. Dies bietet eine erhebliche Gestaltungsfreiheit, ist jedoch mit Planungs- und Kostenaufwand verbunden. Ist dem Flottenbetreiber der Bau in Eigenregie mit zu hohem Aufwand verbunden bzw. weist dieser unzureichende Erfahrung auf, kann dieser ein **Generalunternehmen** mit dem Bau der H₂-Tankstelle betrauen. Dieses kann wesentliche Teile des Genehmigungsprozesses und den Bau der Tankstelle übernehmen. Die Kosten für den Bau und den Betrieb trägt der Flottenbetreiber, in dessen Besitz die Tankstelle nach Fertigstellung übergeht. Bei einer **öffentlich zugänglichen H₂-Tankstelle**, welche unabhängig von einem Flottenbetreiber errichtet wurde, ergeben sich für den Flottenbetreiber analog zu einer normalen Tankstelle keine Investitionskosten und kein Planungsaufwand, jedoch hat dieser bei diesem Modell keinen Einfluss auf die Gestaltung der Tankstelle wie Mengen, Verfügbarkeit oder Druckstufe des bereitgestellten Wasserstoffs. Es wird zu dem vom Tankstellenbetreiber vorgegebenen Preis getankt. Voraussetzung hierfür ist, dass die Tankstelle, insbesondere in Hinblick auf das Druckniveau und die zur Verfügung stehende H₂-Menge, für das Betanken der eigenen Flotte geeignet ist.

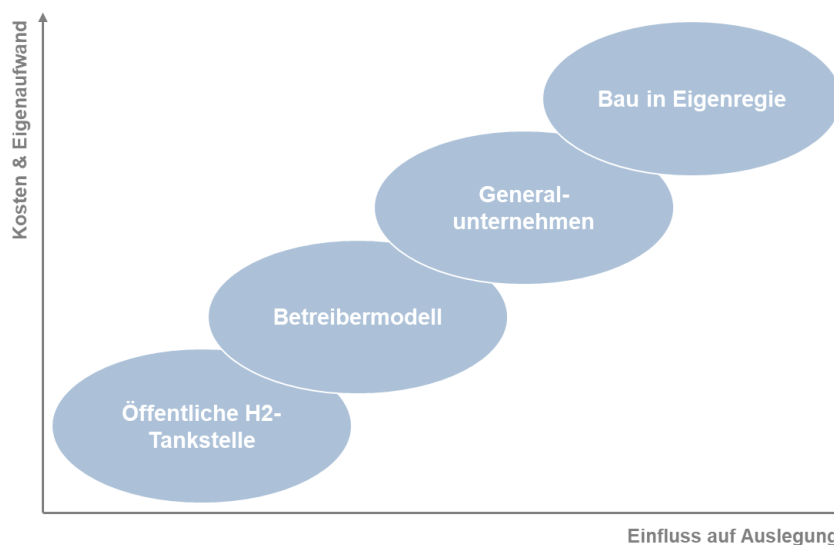


Abbildung 3.2-14: Betreibermodelle für H₂-Tankstellen im Vergleich (eigene Abbildung nach (EMCEL GmbH, 2021))

3.2.4. Handlungsempfehlungen

Für den Aufbau einer großflächigen Wasserstoffinfrastruktur inkl. grüner Wasserstoffherzeugung ergeben sich folgende allgemeine Handlungsempfehlungen:

- › Zusätzlich zum Ausbau von erneuerbaren Energien müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, die es ermöglichen, Strom aus dem Netz zu beziehen, ohne die gesamten Umlagen auf den Strompreis über die Betriebsstunden zu entrichten.

- › Andere erneuerbare Energiequellen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, z.B. Biomasse oder biogene Abfälle, sollten, sobald die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Einstufung von grünem Wasserstoff endgültig feststehen, näher betrachtet werden.
- › Für eine Optimierung zwischen Wasserstofferzeugung aus erneuerbaren Energien und Betankung von Fahrzeugen sind zukünftig weitere Entwicklungen hinsichtlich Digitalisierung und Betankungsprozessen erforderlich.
- › Fahrzeughersteller und Anlagenbauer müssen die Standardisierung schnell vorantreiben und die vorhandenen Technologien weiter im Markt etablieren. Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeuge für 350 bar und die dazugehörige Betankungstechnologie werden seit vielen Jahren weiterentwickelt und müssen nun in großen Stückzahlen verfügbar gemacht werden. Eine Vielzahl von möglichen Wasserstoffbetankungstechnologien, wie z.B. 500 bar GH₂, 700 bar GH₂, Flüssigwasserstoff (liquid hydrogen (LH₂) oder „subcooled“ liquid hydrogen (sLH₂)) oder Kryodruckwasserstoff, die neben der bereits bei Bussen und Lkw erprobten 350 bar Technologie diskutiert werden, erschweren und verzögern sonst nur die Investitionsentscheidungen bei der Infrastruktur.

Als Handlungsempfehlung für den Aufbau der Infrastruktur im Raum Fulda sind folgende Punkte zu nennen:

- › Für den Aufbau einer regionalen, grünen Wasserstofferzeugung aus Elektrolyseanlagen ist der Ausbau der EE-Anlagen im Großraum Fulda essenziell. Hierfür sind die im Anhang A.5.5 aufgeführten Flächen näher zu betrachten.
- › Bürger- und Unternehmensbeteiligungen sind aufzubauen, um die Akzeptanz und die regionale Wertschöpfung auszubauen.
- › Die unter Punkt 3.2.1 auf Seite 26 genannten potenziellen Tankstellen-Standorte sind ausreichend groß und müssen auf ihre Eignung hin weiter untersucht werden.
- › Entsprechend den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.3, Seite 40 bis 44 empfiehlt es sich, mit der Auslegungsvariante M für 1.500 kg Wasserstoff pro Tag zu starten.
- › Der Austausch mit regionalen und überregionalen Tankstellen-Investoren und -Betreibern ist zu intensivieren.
- › Der großflächige Ausbau der Wasserstoff-Tankstellen in der Region Fulda muss mit der Beschaffung der H₂BZ-Lkw Hand in Hand gehen. Durch den Einsatz weiterer H₂BZ-Fahrzeuge, beispielsweise Busse, Abfallsammelfahrzeuge, leichte Nutzfahrzeuge und Pkw, kann der Wasserstoff-Absatz an der Tankstelle weiter gesteigert und diese dadurch wirtschaftlicher betrieben werden. Hier sind Busbetreiber, Gewerbetreibende, Stadtwerke etc. bei der Fahrzeugbeschaffung einzubinden.

3.3. H₂-Nutzung im Verkehrssektor

Dieses Kapitel soll als Handbuch dienen und dabei helfen, einen schnellen Überblick zum heutigen Stand der Technik und zu den Gesamtkosten von BZ-Fahrzeugen zu erhalten. Aufbauend auf den dargestellten Inhalten werden Handlungsempfehlungen für das Projekt HYWHEELS abgeleitet. Das Kapitel hat folgende Inhalte:

1. Darstellung des Funktionsprinzips und der technischen Parameter und Einsatzbereiche von BZ-Fahrzeugen
2. Analyse des Fahrzeugbestandes und Durchgangsverkehrs der Region Osthessen und Ableitung von Potenzialen zur Marktdurchdringung von BZ-Fahrzeugen
3. Darstellung der Anforderungen und Kosten zur Instandhaltung von BZ-Fahrzeugen
4. Darstellung der heute erzielbaren Gesamtkosten von BZ-Fahrzeugen und Beschreibung verschiedener Möglichkeiten für die Beschaffung der BZ-Fahrzeuge sowie der Förderkultisse
5. Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Umsetzung des Projekts HYWHEELS.

3.3.1. Funktionsprinzip und technische Parameter von BZ-Fahrzeugen

BZ-Fahrzeuge werden heutzutage überwiegend mit gasförmigem Wasserstoff betrieben. Abbildung 3.3-1 zeigt schematisch den Aufbau eines BZ-Fahrzeugs. Der Wasserstoff wird unter Druck in Tanks gespeichert.¹⁶ Durch ein Brennstoffzellensystem wird aus dem Wasserstoff elektrische Energie erzeugt¹⁷, die den Elektromotor des Fahrzeugs antreibt. Die Wasserstoffmenge wird über das Volumen und das herrschende Druckniveau der Tanks bestimmt. Das Druckniveau des Wasserstoffes liegt für Pkw bei 700 bar, alle anderen Klassen werden momentan vorwiegend bei 350 bar betankt (siehe Kapitel 3.2.1).¹⁸

Grundsätzlich haben BZ-Fahrzeuge eine höhere Reichweite als batterieelektrische Fahrzeuge. Der Einsatz von BZ-Fahrzeugen bietet sich vor allem dort an, wo rein batterieelektrische Fahrzeuge konventionelle Fahrzeuge hinsichtlich des Betriebs- und Nutzerverhaltens nicht eins zu eins ersetzen können. Das gilt häufig für Verkehre mit hohen Tagesfahrleistungen und/oder bei Fahrzeugen mit einem hohen Gesamtgewicht.¹⁹ Die Tankzeiten sind vergleichbar mit konventionellen Fahrzeugen. Deshalb können konventionell betriebene Fahrzeuge häufig ohne größere Anpassungen von Routen/Umläufen und Nutzerverhalten ersetzt werden.

¹⁶ BZ-Lkw lagern diese zum Beispiel an der Rückseite der Fahrerkabine. Die Energiemenge und somit die mögliche Reichweite eines BZ-Fahrzeuges wird durch die Wasserstoffmenge begrenzt, die über das Volumen und das herrschende Druckniveau der Tanks bestimmt wird.

¹⁷ In der Brennstoffzelle wird durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser elektrische Energie erzeugt. Anstelle von Abgasen wird unschädlicher Wasserdampf ausgestoßen. Die elektrische Energie gelangt über eine Batterie zum Elektromotor, welcher das Fahrzeug antreibt.

¹⁸ Beispielsweise werden ASF je nach Hersteller mit einem Tank mit einem Druckniveau von 350 bar oder 700 bar ausgestattet.

¹⁹ Dies trifft auch auf Fahrzeuge mit Nebenantrieben zu wie bspw. Kräne, Pressanlagen.

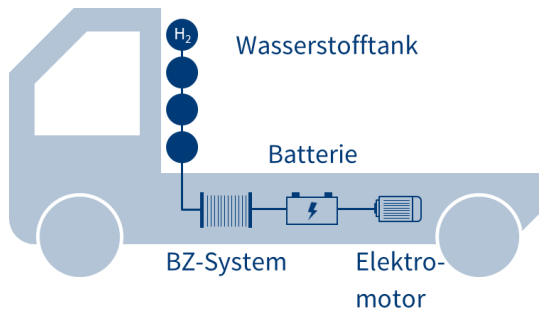


Abbildung 3.3-1: Aufbau eines BZ-Fahrzeuges

Die Technologie wird mittlerweile in verschiedensten Fahrzeugklassen, von Flurförderzeugen (FFZ) über Pkw bis zu SNF, in Serie verbaut. Die wichtigsten technischen Parameter und wichtige Informationen (bspw. Anschaffungskosten) zu den einzelnen Klassen sind in Tabelle 3.3-1 dargestellt.²⁰ Es ist davon auszugehen, dass durch die Möglichkeit der Förderung durch Bund und Länder, wie auch durch die Weiterentwicklung der Technologie die Anschaffungskosten in Zukunft sinken werden. Im Anhang findet sich eine Übersicht zu den aktuellen Herstellern (Kapitel A.6.4).

Tabelle 3.3-1: Technische Parameter von BZ-Fahrzeugen (Navas, 2017) [Herstellerangaben, www.faun.com, 2020; www.still.de, 2020; Hyundai, 2020; Toyota, 2020 <https://www.auto-data.net>, 2021; <https://ecomento.de>, 2021]

Fahrzeugtyp	Pkw	Bus	LNF	Lkw (40 t)	ASF	FFZ
Reichweite [km]	400 – 650	400	400	400 – 1.200	ca. 500 – 600 km ²¹	Ca. 6 h
Druckniveau [bar]	700	350	700	350 ggf. 700 / flüssig	350 / 700	350
Tankvolumen [kg]	4 – 6	35 – 40	4 – 5	> 35	Nach Wunsch	1,5 - 2
Tankzeit [min]	3 – 5	ca. 10	3 – 5	ca. 10	ca. 10	< 3
Verbrauch [kg/100km]	ca. 1	6 – 10	1- 1,8	7 – 9	Abh. von Betriebsweise	0,3 kg/h
Investitionskosten [t€]	64 – 79	550 – 650	50 – 60	350 – 600	700 – 900	30 – 35
Abbildung						

²⁰ Die Anschaffungskosten basieren auf öffentlich bekannten Preisen und Angeboten von Herstellern.

²¹ Dies entspricht in etwa zwei Umläufen mit ca. 10 t Müll.

Kernaussagen für HYWHEELS

BZ-Fahrzeuge zeichnen sich durch eine hohe Reichweite, kurze Betankungsdauern und wesentlich höhere Nutzlasten als batterieelektrische Fahrzeuge aus. Damit eignen sich BZ-Fahrzeuge insbesondere in Segmenten, die durch hohe Fahrleistungen und ein hohes Fahrzeuggewicht charakterisiert sind. Die BZ-Technologie wird in Fahrzeugklassen aller Art verbaut.

3.3.2. Bestands- und Potenzialanalyse von BZ-Fahrzeugen für die Region Osthessen

Die politisch vorgegebene Klimaneutralität bis 2045 erfordert ein Umdenken und eine Transformation von konventionellen Energieträgern zu einer emissionsfreien Mobilität. Jährlich verursachen die in Osthessen gemeldeten knapp 600.000 Fahrzeuge etwa 1,9 Mio. Tonnen CO₂ (siehe Tabelle A.6.1-1).²² Aktuell besteht der Fahrzeugbestand in Osthessen wie auch deutschlandweit vornehmlich aus konventionellen Fahrzeugen. Der Anteil der konventionellen Fahrzeuge mit einem Gewicht von > 12 t ist in Osthessen mit ca. 17 % fast doppelt so hoch wie im restlichen Hessen und ca. 4 % höher als im deutschen Durchschnitt. Entsprechend ist die Region überdurchschnittlich stark von Schwerlastverkehr betroffen. Zusätzlich wurden die Zahlen des Durchgangsverkehrs für die Region Osthessen ermittelt und aufgezeigt.

In Tabelle 3.3-2 wird die Anzahl von Pkw, Bussen, leichten Nutzfahrzeugen (LNF, bis 3,5 t), Lkw und SNF²³ für die Region Osthessen und Deutschland aufgeführt²⁴ und die Potenziale für BZ-Fahrzeuge für die Jahre 2030 und 2050 dargestellt.

Bis 2030 wird für Osthessen über alle Fahrzeugsegmente ein Potenzial von insgesamt 7.500 BZ-Fahrzeugen ermittelt, bis 2050 steigt das Potenzial auf ca. 150.000 BZ-Fahrzeuge. Hierbei handelt es sich laut der Verfasser der Studie um eine konservative Schätzung. Aktuell hat die batterieelektrische Mobilität einen Vorsprung, mit steigender Verfügbarkeit von Fahrzeugen wird die BZ-Technologie insbesondere im Schwerlastverkehr ihre Vorteile hinsichtlich der kurzen Betankungszeit und hohen Reichweiten sowie des besseren Nutzlastverhältnisses ausspielen. Zusätzlich wird ein Potenzial in den Durchgangsverkehren durch Osthessen gesehen. Die Anzahl an BZ-Lkw in Osthessen liegt im Jahr 2030 zwischen 200 und 400 und im Jahr 2050 zwischen 500 und 1.000. Der Potenzialermittlung des Durchgangsverkehrs wird eine Zunahme des Straßengüterverkehrs zugrunde gelegt.²⁵

²² Berechnung auf der Grundlage der Verkehrsdaten des Kraftfahrtbundesamtes.

²³ Die Gewichtsklassen > 3,5 t und die Sattelzugmaschinen (SZM) sind in der Rubrik SNF inbegriffen. Hier sind auch Sonderfahrzeuge wie bspw. ASF mitberücksichtigt.

²⁴ Eine detaillierte Auflösung der Bestandszahlen für die vier Kreise Osthessens wird im Anhang in Abschnitt 5.3 gezeigt. In Abschnitt A.5.2 wird schematisch die Verteilung von Logistikunternehmen mit gemeldeten LNF und SNF in Osthessen gezeigt.

²⁵ Angenommen wird in Anlehnung an verschiedene Studien eine prozentuale Durchdringung von BZ-Fahrzeugen von 30 %. Die obere Spannweite ist eine Expertenabschätzung der H2 Energy für die Durchdringung von BZ-Sattelzugmaschinen, die den Durchgangsverkehr hauptsächlich charakterisieren.

Tabelle 3.3-2: Aktueller Fahrzeugbestand und Potenziale für die Einführung von BZ-Fahrzeugen. (Bründlinger et al., 2018; Kraftfahrt-Bundesamt, 2020)

	Osthessen			Deutschland		
	Aktueller Fahrzeugbestand	Potenzial BZ-Fahrzeuge 2030	Potenzial BZ-Fahrzeuge 2050	Aktueller Fahrzeugbestand	Potenzial BZ-Fahrzeuge 2030	Potenzial BZ-Fahrzeuge 2050
Pkw	550.000	5.600	139.000 ca. 30 %	47.000.000	970.000	12.100.000 ca. 30 %
LNF (bis 3,5 t)	31.000	1.100	8.000 ca. 30 %	3.060.000	107.000	777.000 ca. 30 %
Lkw & SNF (3,5 bis 40 t)	9.280	600	3.440 ca. 30 – 50 %	750.000	50.000	280.000 ca. 30 – 50 %
Busse	790	90	470 ca. 60 %	81.400	8.900	48.000 ca. 60 %
Gesamtanzahl Fahrzeuge	595.000	7.500	150.000	51.600.000	1.140.000	13.200.000
Wasserstoffbedarf gemeldeter Fahrzeuge [t/a]		3.000	25.000	-	310.000	2.200.000
Durchgangsverkehr in Osthessen (Lkw)	1200 ²⁶	200 – 400 ca. 30 – 60 % ²⁷	500 – 1.000 ca. 30 – 60 %			

Neben dem Potenzial zur Umstellung auf BZ-Fahrzeuge wird das angestrebte Ziel von HYHWEELS zur Umstellung von 1.000 BZ-Fahrzeugen bis 2026 betrachtet.

Ermittlung des Wasserstoffbedarfs

Der aus den Fahrzeugzahlen abgeleitete Wasserstoffbedarf bis 2030 wird in Abbildung 3.3-2 veranschaulicht. Es wird ersichtlich, dass insbesondere Pkw und SNF den Wasserstoffbedarf treiben. Busse eignen sich besonders gut für einen regionalen Einstieg in die Technologie. Bei Pkw

²⁶ Ermittlung der Daten anhand von Angaben des Kraftfahrtbundesamtes (*Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge (VD), Verkehrsverflechtungen, Jahr 2019*), die auf Osthessen heruntergebrochen wurden. Angenommen wurde zudem eine Steigerung der Güterverkehrsleistung in Anlehnung an die dena-Leitstudie mit einer Zunahme um rund 0,8 % pro Jahr Bründlinger et al. (2018).

²⁷ Bis 2050 wird davon ausgegangen, dass nur CO₂-freie Lkw in Betrieb sind. Der größte Einflussparameter liegt aus Sicht der Verfasser dieses Feinkonzeptes bei der Weiterentwicklung von Batterien. Falls es in diesem Bereich größere Verbesserungen, vermutlich mit neuen Technologien (z. B. Feststoff), geben sollte, dann wird der H₂-Anteil etwas geringer ausfallen, ohne größere Entwicklungen bei der Batterie eher höher.

ist der hohe Wasserstoffbedarf auf die Anzahl umgestellter Fahrzeuge zurückzuführen, bei SNF wird der Wasserstoffbedarf insbesondere durch hohe Fahrleistungen generiert. Bis 2030 werden in Osthessen insgesamt ca. 3.000 t Wasserstoff abgenommen, 2050 liegt der Wasserstoffbedarf bei ca. 25.000 t Wasserstoff pro Jahr.²⁸ Der Durchgangsverkehr führt in Osthessen zu einem zusätzlichen Wasserstoffbedarf von 800 bis 5.700 t im Jahr 2030 und von 5.000 bis 15.000 t im Jahr 2050.

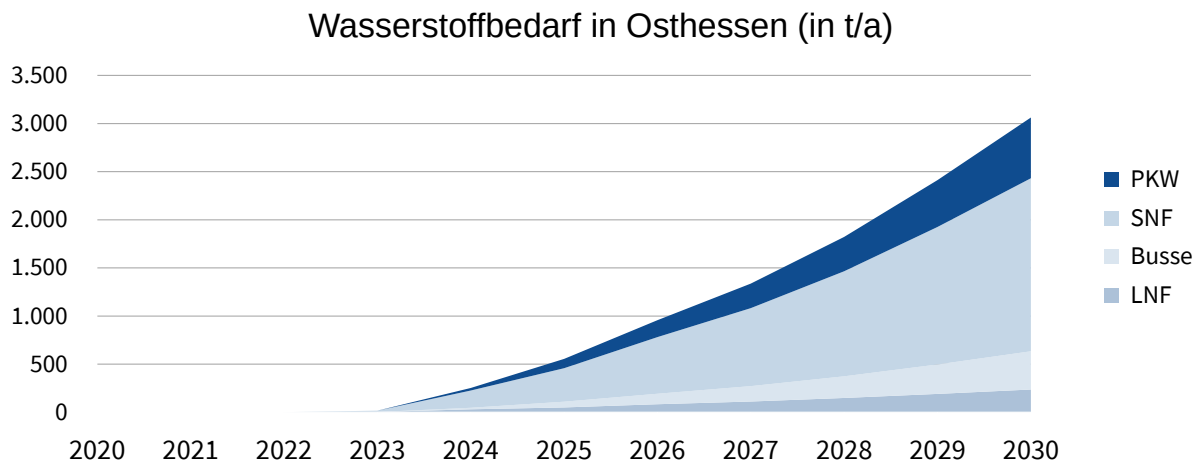


Abbildung 3.3-2: Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr in Osthessen bis 2030

Die Einführung von 800 bis 1.200 BZ-Lkw in Osthessen bis 2026 macht die Bereitstellung von ca. 6.000 bis 9.000 t Wasserstoff erforderlich.

Treibhausgas- und Stickoxid-Einsparungen

Nachfolgend werden die potenziellen Treibhausgas(THG)- und Stickoxid(NO_x)-Einsparungen in Abhängigkeit von Anzahl und Typ vorhandener BZ-Fahrzeuge in der Region Osthessen dargestellt.

Da der Ort des Ausstoßes von Treibhausgasen (gemessen in CO₂-Äquivalenten) für das Klima unerheblich ist, wird die Einsparung an THG durch den Betrieb von BZ-Fahrzeugen gegenüber Dieselfahrzeugen unter Berücksichtigung des Lebenszyklus der Fahrzeuge berechnet. Dies bedeutet, dass neben den direkten Betriebsemissionen (bspw. durch Dieselverbrennung) ebenfalls die Fahrzeugherstellung und -verwertung am Lebensende (EoL – End of Life) sowie die komplette

²⁸ Bei dem dargestellten Potenzial von BZ-Fahrzeugen ist zu berücksichtigen, dass viele Szenarien existieren, die jeweils unterschiedliche Entwicklungen und Rahmenbedingungen für die Umstellung des Verkehrssektors (bspw. politische Vorgaben, Änderung des CO₂-Preises, Kostenentwicklung der Fahrzeuge) annehmen. Als Ergebnis dieser Szenarien werden verschiedene Marktdurchdringungen für BZ-Fahrzeuge, batterieelektrische, LNG(Liquefied Natural Gas)- / CNG(Compressed Natural Gas)- und konventionelle Fahrzeuge ermittelt. Die Marktdurchdringung für die Region Osthessen wurde in Anlehnung an das Szenario „Technologie Mix 95“ der dena-Leitstudie ermittelt, das aus Sicht der Autoren dieses Feinkonzepts einen realistischen und ausgewogenen Technologiemix für das Jahr 2050 voraussagt.

Energieträgerbereitstellung („Well-to-Wheel“ – WtW) berücksichtigt werden (siehe Abbildung A.6.2-1).

Für die Luftqualität bzw. die gesundheitlichen Auswirkungen von Luftschadstoffen auf den Menschen ist dagegen die lokale Schadstoffkonzentration ausschlaggebend, der Ort des Schadstoffausstoßes ist daher maßgeblich. Aus diesem Grund werden für die NO_x-Emissionen nur die lokalen, direkt durch den Betrieb verursachten Emissionen berücksichtigt („Tank-to-Wheel“ – TtW). Die Methodik und die Grundlagendaten für die Ermittlung der THG- und der NO_x-Emissionen können dem Anhang (Kapitel A.6.2) entnommen werden.

THG- und NO_x-Emissionen für 2030 und 2050

In Abbildung 3.3-3 ist die jährliche Einsparung an THG-Emissionen durch BZ-Fahrzeuge in Osthessen für die Jahre 2030 und 2050 abzulesen. Zwischen diesen beiden Jahren wächst die Anzahl der BZ-Fahrzeuge in der Region Osthessen um den Faktor 20, die der Pkw sogar um den Faktor 25 (siehe Abbildung 3.3-3). Dadurch tragen die Pkw im Jahr 2050 mit ihrer hohen Gesamtjahreslaufleistung den mit Abstand größten Teil zur Einsparung der THG-Emissionen bei, auch wenn ihre Einsparung pro Kilometer am geringsten von allen Fahrzeugklassen ist. Die THG-Einsparung über alle Fahrzeugtypen im Jahr 2030 entspricht den jährlichen THG-Emissionen von etwa 6.100 durchschnittlichen deutschen Haushalten, die Einsparung im Jahr 2050 entspricht denen von etwa 68.800 Haushalten (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2020).

Wird beim Durchgangsverkehr von der in Tabelle 3.3-2 aufgeführten Anzahl an BZ-Sattelzugmaschinen (SZM) ausgegangen, so lassen sich zusätzlich global 9 bis 64 kt CO₂-Äq. im Jahr 2030 einsparen (im Jahr 2050: 64 bis 185 kt CO₂-Äq.) und in der Region Osthessen 0,3 bis 2,2 kt NO_x (im Jahr 2050: 2,2 bis 6,3 kt NO_x).

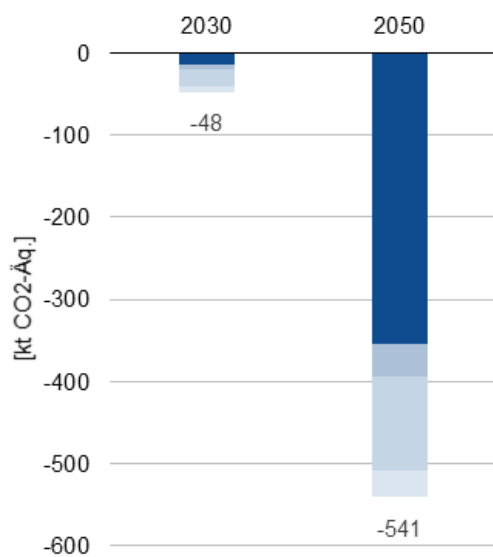


Abbildung 3.3-3 THG-Einsparung der Fahrzeugflotte in den Bezugsjahren 2030 und 2050 (WtW)

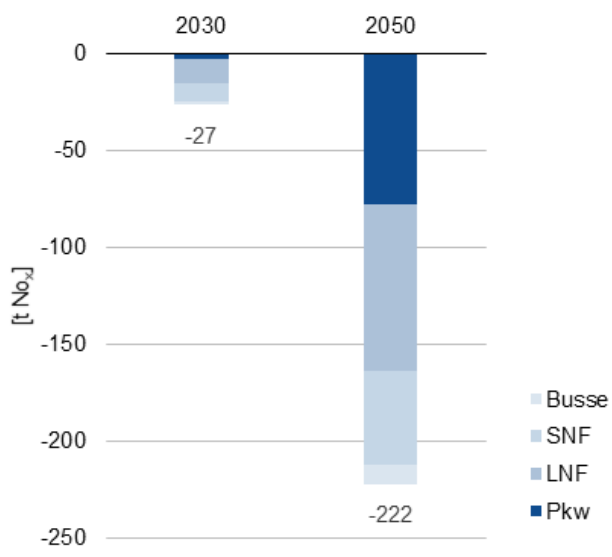


Abbildung 3.3-4 NO_x-Einsparung der Fahrzeugflotte in den Bezugsjahren 2030 und 2050 über die gesamte Jahreslaufleistung (TtW)

Abbildung 3.3-4 zeigt die möglichen Einsparungen von NO_x-Emissionen aller BZ-Fahrzeuge über die jährlich betriebene Laufleistung (TtW). Die leichten Dieselnutzfahrzeuge²⁹ weisen vergleichsweise hohe Stickoxidemissionen auf, weshalb hier zusammen mit den Pkw die größte Einsparung stattfindet. Wird von der beispielhaften Verteilung der Fahrleistung aus Tabelle A.6.2-3 auf die Region Osthessen ausgegangen, so beträgt die gesamte jährliche Einsparung in Osthessen 18 t NO_x (2030) bzw. 149 tNO_x (2050).

Wird das Ziel von 800 bis 1.200 BZ-Fahrzeugen erreicht, werden im Jahr 2026 80 kt THG und 2,8 t NO_x eingespart. Der detaillierte zeitliche Verlauf der Emissionsreduktion entsprechend dem anvisierten Ziel von HYWHEELS kann Kapitel entnommen werden.³⁰

Darüber hinaus gehen die Beteiligten davon aus, dass der Einsatz von lokal emissionsfreien BZ-Fahrzeugen, insbesondere von BZ-Lkw, im Güter- und Personenverkehr zur Akzeptanzsteigerung führt. Neben den THG- und NO_x-Emissionen können Vorteile im Bereich der Lärmemissionen erzielt werden. Dies betrifft insbesondere innerstädtische Verkehre. Im Rahmen der Akteursorumfrage des Projektes HYWHEELS gehen über 70 % der befragten Unternehmen davon aus, dass der Betrieb von BZ-Fahrzeugen zu einer Imageaufbesserung führt.

Kernaussagen für HYWHEELS

Für den Hochlauf der BZ-Fahrzeuge in Osthessen sind aufgrund der hohen Reichweiten, der kurzen Betankungsdauer und der größeren Nutzlast insbesondere SNF und Busse prädestiniert.

²⁹ Angenommen mit Schadstoffklasse Euro-6ab, siehe Tabelle A.6.2-1.

³⁰ Hierbei wird angenommen, dass die Anzahl der BZ-Fahrzeuge ausschließlich durch BZ-Sattelschlepper gedeckt wird.

Zudem generieren diese Fahrzeugsegmente wegen ihrer hohen Laufleistung eine hohe Wasserstoffnachfrage, die die Auslastung der vorgehaltenen Wasserstoffinfrastruktur erhöht. Die Errichtung einer wirtschaftlichen Wasserstoffinfrastruktur ermöglicht langfristig auch BZ-Pkw eine großskalige Umstellung, die den Wasserstoffbedarf und die Reduktion der THG-Emissionen bis 2050 ebenfalls stark erhöht. Darüber hinaus führt der Einsatz von BZ-Fahrzeugen zu einer Akzeptanzsteigerung im Bereich des Güter- und Personenverkehrs und kann zur Imageaufbesserung von Unternehmen beitragen.

3.3.3. Wirtschaftlichkeit von BZ-Fahrzeugen

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von BZ-Fahrzeugen werden zunächst die Rahmenbedingungen und politischen Treiber analysiert. Darauf aufbauend werden die Gesamtkosten von BZ-Fahrzeugen dargestellt.

Rahmenbedingungen und politische Treiber

Die Einführung von 1.000 BZ-Fahrzeugen stellt einen ersten Schritt zu einem emissionsfreien Verkehr und somit zur Erreichung der nationalen und europäischen Klimaziele dar. Die angestrebte Klimaneutralität im Jahr 2045 erfordert große Kraftanstrengungen im Verkehrssektor, in dem die Emissionen seit 1990 auf einem konstanten Niveau verbleiben (Europäische Kommission, 2021b). Auf europäischer und Bundesebene wurden daher regulatorische Rahmenbedingungen festgelegt, die zur Erreichung der Ziele beitragen sollen (siehe Tabelle 3.3-3). Um eine langfristige Planungssicherheit zu gewährleisten, ist es von politischer Seite her notwendig, frühzeitig entsprechende langfristige Anreize zu setzen.

Tabelle 3.3-3: Übersicht relevanter regulatorischer Treiber im Verkehrsbereich

Regulierung	Adressat	Kurzbeschreibung
Clean Vehicles Directive	Fahrzeugbetreiber	Die Richtlinie legt Mindestziele für die Fahrzeugbeschaffung von Pkw, LNF und SNF durch öffentliche Behörden und Unternehmen fest. Die Beschaffungsquote liegt bspw. für Busse ab August 2021 bei 45 % für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, ab 2026 liegt die Beschaffungsquote bei 65 % (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019b).
CO₂-Flottengrenzwerte (Transport Emission Targets EU 2025/2030)	Fahrzeughersteller	Es werden Grenzwerte für CO ₂ -Emissionen für Flotten festgelegt. Diese sehen für Pkw eine Reduktion von 37,5 % bis 2030 vor (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019a). Für Lkw (zunächst nur Schwerlastverkehr) werden Grenzwerte der CO ₂ -Emissionen für Flotten ab 2025 um 15 % Reduktion im Vergleich zur Periode Juli 2019/Juni 2020 (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2019c) festgelegt, ab 2030

		liegt die Reduktion im Vergleich zur Periode Juli 2019/Juni 2020 bei 30 % (Europäische Kommission, 2021a). ³¹
CO₂-Preis		Für die Prognose ein CO ₂ -Preis von 55 €/t CO ₂ angenommen.
Lkw-Maut / Eurovignetten für Lkw	Fahrzeugsbetreiber	Aktuell sind BZ-Lkw von der Maut befreit. Die Maut ist von dem Gesamtgewicht, der Achsenanzahl und der Schadstoff-Klasse eines Lkw abhängig und liegt zwischen 5 und 18,7 ct/km. Ab 2023 soll ein Aufschlag auf die Mautbeträge in Abhängigkeit vom CO ₂ -Ausstoß erfolgen. Bis 2025 sind Null-Emissionsfahrzeuge vollständig von der Abgabe befreit. Danach wird ein reduzierter Beitrag von bis zu 75 % gegenüber dem Höchstsatz erhoben (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020).
Ausweitung EU-Emissionshandels-system (ETS) auf Verkehr		Zurzeit (Q2 2021) wird die Ausweitung des EU-Emissionshandels-systems diskutiert. Ziel ist es, den Verkehr und andere Nicht-ETS-Sektoren ins ETS aufzunehmen. Länder, welche diese Regelung übernehmen, sollen dafür Lockerungen der nationalen CO ₂ -Minderungsziele einführen dürfen. Die genaue Umsetzung dieser Ausweitung ist noch nicht ausgearbeitet, daher ist es nicht möglich, den genauen Einfluss auf die Gesamtkosten von fossil und nicht-fossil betriebenen Lkw einzuschätzen. Grundsätzlich kann aber davon ausgegangen werden, dass es einen Gesamtkostenvorteil für CO ₂ -freie Antriebe geben wird.
Umweltauflagen	Kommunen / Städte	Die mögliche Entstehung / Erweiterung von Umweltzonen und Fahrverbotszonen stellt ebenfalls einen politischen Treiber dar.
Förderungen	Fahrzeugnutzer / Betreiber	Es gibt Förderungen auf Länder-, Bundes- und EU-Ebene zur Förderung von Investitionskosten von BZ-Fahrzeugen. Für 2021 wurde bspw. die neue Förderrichtlinien für Nutzfahrzeuge und Busse eingeführt. Hier werden bis zu 80 % der Investitionsmehrkosten gefördert (Gehling, 2021). Eine ausführliche Darstellung kann dem Anhang entnommen werden (siehe Tabelle A.6.5-1 und Tabelle A.6.5-2).
Treibhausgas-Minderungsquote	Tankstellenbetreiber / Kraftstoffproduzenten	Im Mai 2021 hat sich die Bundesregierung entschieden, die Minderung der Treibhausgasemissionen bis 2030 auf 32 % festzusetzen. Dadurch werden Tankstellenbetreiber als auch Raffinerien dazu angehalten, mehr alternative Kraftstoffe wie Strom an Elektroladestationen oder Wasserstoff zu verkaufen. Werden die Quoten nicht eingehalten, drohen den Betreibern Strafzahlungen pro t CO ₂ (aus dem verkauften Kraftstoff abgeleitet).

³¹ Diese Grenzwerte müssen von den einzelnen Herstellern im Flottendurchschnitt für die pro Jahr neu eingeführten Lkw eingehalten werden. Es wird angenommen, dass die Fahrzeughersteller 50 % der Mehrkosten auf die Fahrzeugkäufer abwälzen werden. Konkret heißt dies für einen 36-t-Lkw

- Mehrkosten Diesel-Lkw ab 2025: ca. 8.000 €
- Mehrkosten Diesel-Lkw ab 2030: ca. 24.000 €

Gesamtkosten von BZ-Fahrzeugen

Eine Umfrage mit über 120 Unternehmen, die im Rahmen von HYWHEELS durchgeführt wurde, zeigt, dass großes Interesse an der Erprobung und Einführung von emissionsfreien BZ-Lkw und anderen Fahrzeugen vorhanden ist. Allerdings herrscht eine große Unsicherheit darüber, welche Gesamtkosten (TCO – Total Cost of Ownership) BZ-Fahrzeuge verursachen und ob diese schon heute wirtschaftlich betrieben werden können. Das folgende Kapitel stellt eine Übersicht über die Gesamtkosten von BZ-Lkw unter Berücksichtigung der aktuell existierenden und noch ausstehenden politischen Anreize bereit. In einer Sensitivitätsanalyse werden die wichtigsten Kostenfaktoren beleuchtet und zukünftige Kostenentwicklungen abgeschätzt. Im Anschluss wird eine Übersicht über die Gesamtkosten anderer Fahrzeugtypen gegeben.

Gesamtkosten von BZ-Lkw



Abbildung 3.3-5: 36t BZ-Gliederzug der Firma Hyundai

Die Gesamtkosten von BZ- und Diesel-Lkw können nur sinnvoll miteinander verglichen werden, wenn die Kernkonfiguration der Fahrzeuge miteinander vergleichbar ist. Daher werden die Gesamtkosten exemplarisch für einen 36 t BZ-Gliederzug, wie er bereits in der Schweiz eingesetzt wird, mit einem ähnlichen Diesel-Lkw verglichen.³²

Abbildung 3.3-6 zeigt die Gesamtkosten eines Diesel-Lkw und eines BZ-Lkw mit und ohne der in Deutschland geplanten Mehrkostenförderung der Investitionskosten von 80 %.³³ Folgende Aussagen lassen sich aus dem Gesamtkostenvergleich ableiten:

- › Bei einer Mehrkostenförderung von 80 % ist aktuell mit Gesamtkosten von 1,3 bis 1,5 €/km, bzw. mit Mehrkosten zwischen 0 und 35 %, zu rechnen.
- › Ohne die Investitionskostenförderung liegen die Gesamtkosten zwischen 1,7 und 1,8 €/km, bzw. die Mehrkosten zwischen 30 und 60 %.

³² Bei einem Kostenvergleich anderer Lkw-Typen, wie bspw. Sattelschlepper, können die Gesamtkosten abweichen. Es empfiehlt sich daher vor der Einführung eine detaillierte Kostenbetrachtung. Während BZ-Fahrzeuge in der Schweiz bereits eingesetzt werden, ist in Deutschland mit einem Verkauf von BZ-Fahrzeugen ab 2022 zu rechnen.

³³ Hierbei wurde ein Dieselpreis von 1 €/l (ohne MwSt.) angenommen. Als Laufleistung werden 100.000 km angenommen. Dieser Wert kann je nach Fahrzeugsegment und Einsatz variieren. Beispielsweise können bei Fernverkehr Lkw-Fahrleistungen von 180.000 km bis 240.000 km pro Jahr erreicht werden. Nahverkehr oder Tourenlieferfahrzeuge können im 2-Schichtbetrieb zwischen 80.000 km und ca. 140.000 km pro Jahr erreichen. Weitere Annahmen sind im Anhang zu finden.

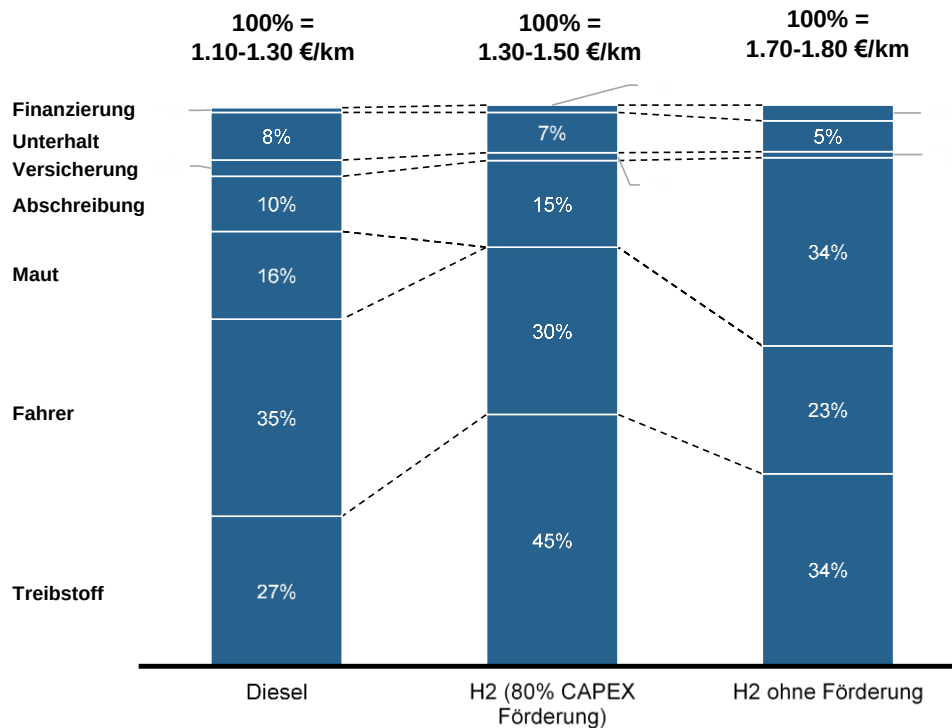


Abbildung 3.3-6: Gesamtkostenvergleich 36 t Hängerzug, bei 100.000 km/a. Quelle: H2 Energy AG

Wie in Abbildung 3.3-6 deutlich wird, sind die Mehrkosten bei den Gesamtkosten hauptsächlich auf die Investitionskosten der Fahrzeuge und den Treibstoffpreis zurückzuführen. Eine Sensitivitätsbetrachtung ermöglicht folgende drei Aussagen:

- › Eine Senkung der Fahrzeuginvestitionskosten durch eine 80%ige Förderung der Mehrkosten ist ein effektives Mittel und damit eine zentrale Stellschraube zur längerfristigen Reduzierung der Wasserstoffgesamtkosten. Mehrkostenförderungen in Höhe von 80 % werden wesentlich dazu beitragen, viele BZ-Lkw auf die Straßen zu bringen. Durch den erwarteten Hochlauf der BZ-Technologie und den Einstieg weiterer Fahrzeughersteller, die die Serienproduktion von BZ-Fahrzeugen angekündigt haben, ist in den kommenden Jahren eine Senkung der Investitionskosten bei BZ-Lkw zu erwarten. Eine detaillierte Analyse der Investitionskosten kann dem Anhang entnommen werden (siehe Kapitel A.6.6).
- › Ab einem Wasserstoffpreis von rund 5 bis 5,5 €/kg und der Mehrkostenförderung von 80 % können BZ-Lkw kostenäquivalent betrieben werden. Für die Gesamtkostenberechnung wurden Wasserstoffpreise in Höhe von 7,98 €/kg (netto) angenommen, wie sie derzeit in Deutschland an öffentlichen Tankstellen angeboten werden (H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG). Bei einer 80%igen Mehrkostenförderung der Investitionskosten (CAPEX) gegenüber einem Diesel-Lkw betragen die Gesamtmehrkosten mit dem heutigen H₂-Preis noch rund 15 %. Perspektivisch wird erwartet, dass die Wasserstoffpreise durch Skaleneffekte und technologische Effizienzgewinne sowie eine etablierte

Distributionsinfrastruktur für Wasserstoff sinken werden. Schon heute gibt es Tankstellenbetreiber, die Preise von 7 €/kg und weniger für grünen Wasserstoff anbieten.³⁴

- › Bei einer Erhöhung des Dieselpreises um 50 % und der Mehrkostenförderung von 80 % können Lkw kostenäquivalent betrieben werden: Der Dieselpreis macht heute ca. 30 % der Gesamtkosten eines Diesel-Lkw aus. Ohne eine Investitionskostenförderung liegen die Gesamtkosten des BZ-Lkw bei einem durchschnittlich 50 % höheren Dieselpreis (ca. 1,5 €/l exkl. MwSt.) ca. 20 % über den Gesamtkosten des Diesel-Lkw, mit einer Mehrkostenförderung des BZ-Fahrzeuges von 80 % wird eine Kostenparität erreicht.
- › Eine CO₂-Steuer erhöht die Gesamtkosten eines Diesel-Lkw. Der CO₂-Preis kann über die THG-Emissionen auch in Treibstoffkosten umgerechnet werden. Beispielsweise entspricht die Erhöhung des Dieselpreises von aktuell ca. 1,2 €/l auf 1,8 €/l einem CO₂-Preis von ca. 200 €/t CO₂. Ohne Mehrkostenförderung wäre ein CO₂-Preis von rund 600 €/t CO₂ notwendig, um eine Gesamtkostenparität zum Dieselfahrzeug zu erreichen.

In Abbildung 3.3-7 ist in einer umfassende Sensitivitätsanalyse abgebildet, wie sich die Gesamtkosten verändern, wenn sich einzelne Kostenparameter verschieben. Die Mehrkostenförderung ist bereits in den CAPEX-Kosten enthalten. Der schwarze Balken markiert die Eingangswerte, die für die Gesamtkostenberechnung angenommen wurden.

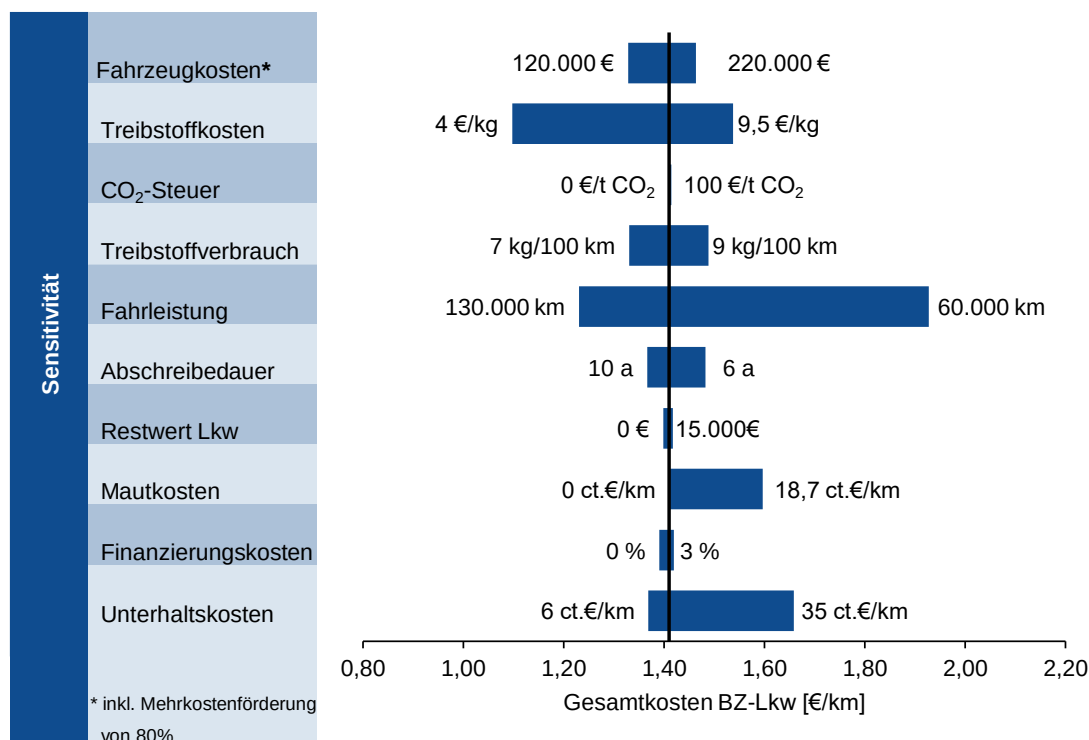
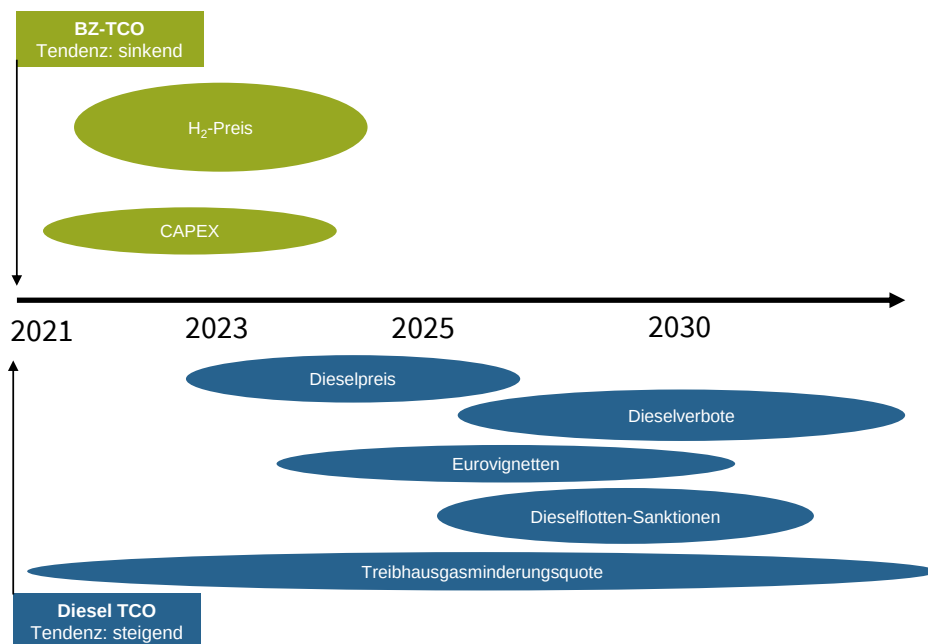


Abbildung 3.3-7: Sensitivität Gesamtkosten-Parameter mit 80 % CAPEX-Mehrkostenförderung [€/km]. Quelle: H2 Energy AG

³⁴ Herstellerwert.

Abbildung 3.3-8 zeigt qualitativ die Parameter auf, die Einfluss auf die Gesamtkostenentwicklung von Diesel- resp. BZ-Lkw haben. Grundsätzlich ist keine konkrete Aussage möglich, ab wann BZ-Lkw kostenäquivalent zu Diesel-Lkw sind, da hierzu eine Vielzahl von Einflussparametern und die unterschiedliche Zusammensetzung der Gesamtkosten bei den Logistikunternehmen zu berücksichtigen wären.

Wichtige Stellschrauben sind ein langfristig steigender Dieselpreis, sinkende Investitionskosten bei BZ-Lkw- und H₂-Preisen sowie langfristig festgelegte Vergütungen für CO₂- und THG-Einsparungen. Wenn Auftraggeber perspektivisch einen CO₂-freien Transport von Logistikleistungen mit in die CO₂-Bilanz aufnehmen können, verringert sich der Kauf von CO₂-Zertifikaten. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fragestellung, ob Unternehmen und Kunden bereit sind, für eine CO₂-freie Lieferung mehr zu bezahlen. Dies ist voraussichtlich von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich, weshalb ein Bonus, welcher zur Deckung potenzieller Mehrkosten verwendet werden könnte, variieren würde.



Anmerkung: Die Breite der einzelnen Blasen korreliert qualitativ mit deren Einflussgröße auf die Gesamtkosten

Abbildung 3.3-8: Relevante Einflussfaktoren im zeitlichen Verlauf für Diesel / H₂-Gesamtkosten

Gesamtkosten von weiteren BZ-Fahrzeugsegmenten

In Abbildung 3.3-9 werden die aktuellen Gesamtmehrkosten für weitere Fahrzeugsegmente inkl. Fahrzeugförderung bezogen auf einen mit Diesel betriebenen Fahrzeugtyp verglichen. Die zugehörige Datengrundlage für die Berechnung kann aus Tabelle 3.3-2 und dem Anhang entnommen werden (siehe Tabelle A.6.2-1 und Kapitel A.6.4). Bei ASF liegen die Gesamtkosten inkl. Förderung der BZ-ASF zwischen 30 und 49 %, bei Bussen liegen die Mehrkosten (inkl. Förderung)

zwischen 13 und 28 %. Bei ASF sind die Mehrkosten im Wesentlichen auf die aktuell hohen Investitionskosten zurückzuführen. Bei kleineren Fahrzeugsegmenten wie bspw. LNF liegen die Mehrkosten mit einer 80%igen Förderung zwischen 2 und 34 %, für Pkw liegen die aktuellen Mehrkosten zwischen 30 und 71 %.

Gesamtmehrkosten von BZ-Fahrzeugen ggn. Dieselfahrzeugen inkl. Förderung

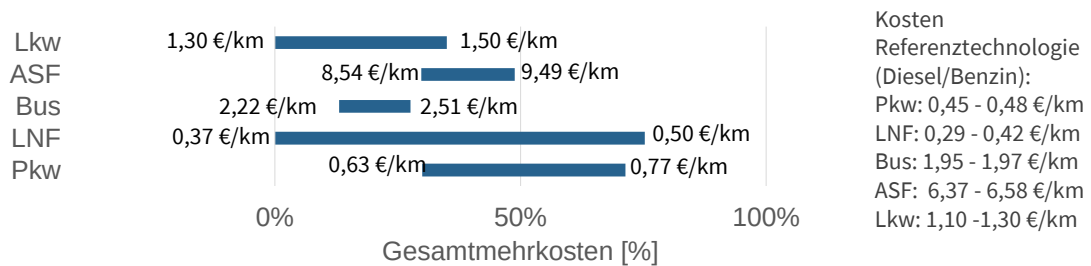


Abbildung 3.3-9: Gesamtmehrkosten (inkl. Förderung) von BZ-Fahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen

Finanzierungsmodelle

Es existieren verschiedene Finanzierungsmodelle für die Beschaffung von Fahrzeugen, die im Folgenden kurz erläutert werden (siehe Tabelle 3.3-4). Im Rahmen der Unternehmensumfrage wurde das Interesse der Logistikunternehmen an den verschiedenen Finanzierungsmodellen abgefragt. Für einen Großteil der Unternehmen kommen grundsätzlich alle Finanzierungsmodelle in Frage.

Tabelle 3.3-4 Mögliche Finanzierungsmodelle zur Beschaffung von BZ-Fahrzeugen

Modell	Kurzbeschreibung
Kauf	Das Logistikunternehmen kauft das Fahrzeug direkt mit Eigen- oder Fremdkapital und betreibt es selbstständig und unabhängig von einer Vermieter-/Leasinggesellschaft. Dadurch genießt es große Freiheiten, trägt aber auch ein höheres Risiko.
Finanzierungsleasing	Eine Eigentümergeellschaft beschafft Fahrzeuge und ermöglicht einer Betreiber-gesellschaft die emissionsfreie Mobilität durch bspw. Vermietung/Leasing der Fahrzeuge. Grundsätzlich muss sich der Betreiber ähnlich wie beim Modell „Kauf“ um den gesamten Betrieb kümmern. Allerdings kann er von günstigen Finanzierungsmöglichkeiten und der Reduzierung des Restwert- und Wiedereinsatzrisikos profitieren.
Pay-Per-Use	Vor der Nutzung der Fahrzeuge wird eine Kilometerpauschale ermittelt, die das Fahrprofil, den Einsatz des Fahrzeugs und die jährliche Laufleistung berücksichtigt. Beahlt wird nur die effektiv genutzte Leistung, wobei eine minimale Fahrleistung pro Jahr definiert wird. Inbegriffen in der Kilometerpauschale sind der vollständige Betrieb des Lkw mit Aufbau inkl. Zulassung, Versicherung und Reifenverschleiß, die Betankung sowie Service und Wartung.

Zum Vergleich der verschiedenen Finanzierungsmodelle für BZ-Lkw wurden diese nach sieben Parametern qualitativ bewertet (siehe Tabelle 3.3-5). Im Rahmen des HYWHEELS-Projekts wird eine Empfehlung für ein Finanzierungsmodell abgegeben. Die Gewichtung der einzelnen Parameter für die Auswahl des Finanzierungsmodells ist jedoch subjektiv und muss von jedem Logistikunternehmen selbst getroffen werden.

Tabelle 3.3-5: Parameter für die qualitative Bewertung von Finanzierungsmodellen

Parameter	Beschreibung der Parameter
CAPEX	Kapital, das notwendig ist, um einen BZ-Lkw zu betreiben
Technologierisiko	Risiko des Logistikunternehmens für den Einsatz der Technologie
Planungssicherheit	Wie genau kennt das Logistikunternehmen die Kosten, welche durch seine Transporte entstehen werden?
Strategische Freiheiten	Freiheiten des Logistikunternehmens, bspw. die Wahl, Service/Wartung selbst zu bestimmen / selbst durchzuführen
Operative Verantwortung	Verantwortung für den operativen Betrieb (geeignete Servicestellen, Auswahl der möglichen Tankstellen, Ersatzfahrzeug bei Ausfall des BZ-Fahrzeuges) liegt auf Seiten des Logistikunternehmens oder wird durch das Finanzierungsmodell übernommen
Kosten der Finanzierung	Höhe der Kosten, die durch eine Fremdfinanzierung zustande kommen
Bilanzrisiken	Möglicherweise zusätzliches Eigenkapital durch das Logistikunternehmen

Für die Fahrzeugbetreiber wird im Rahmen des Feinkonzepts das Pay-Per-Use-Modell empfohlen. Es bietet höchste Planungssicherheit mit sehr geringem Risiko, was für die Einführung einer neuen Technologie große Vorteile bietet. Der Betreiber muss keine größeren Summen für die Anschaffung neuer Fahrzeuge aufbringen und kann risikofrei in die H₂-Technologie eingeführt werden. Gleichzeitig muss er kein zusätzliches Eigenkapital aufbringen, was im Fall der Fremdfinanzierung bei einem Kauf des Fahrzeuges häufig notwendig wird. Weiter kann der Fahrzeughersteller z. B. bei Versicherungsprämien oder Service/Wartung bessere Konditionen aushandeln als einzelne Käufer. Dadurch fallen diese Kosten tendenziell geringer aus. Die Risiken wie Ausfall, Ersatz, Technologieprobleme etc. werden vom Anbieter getragen, was sich aber auf die Kilometerpauschale auswirkt.

Als Nachteil des Pay-Per-Use-Modells ist die Einschränkung der strategischen Freiheiten zu erwähnen, die mit der Abgabe der oben erwähnten Risiken einhergeht. Des Weiteren geht der Resterlös durch den Wiederverkauf des LKW nicht an den Betreiber (dieser Erlös wird normalerweise jedoch im Preis des Pay-Per-Use integriert). Weiterhin kann es je nach Modell zu einer Einschränkung der Tankstellenwahl kommen. Eine allgemeingültige quantitative Aussage bezogen auf die verschiedenen Betreibermodelle ist im Rahmen des Feinkonzeptes nicht möglich.

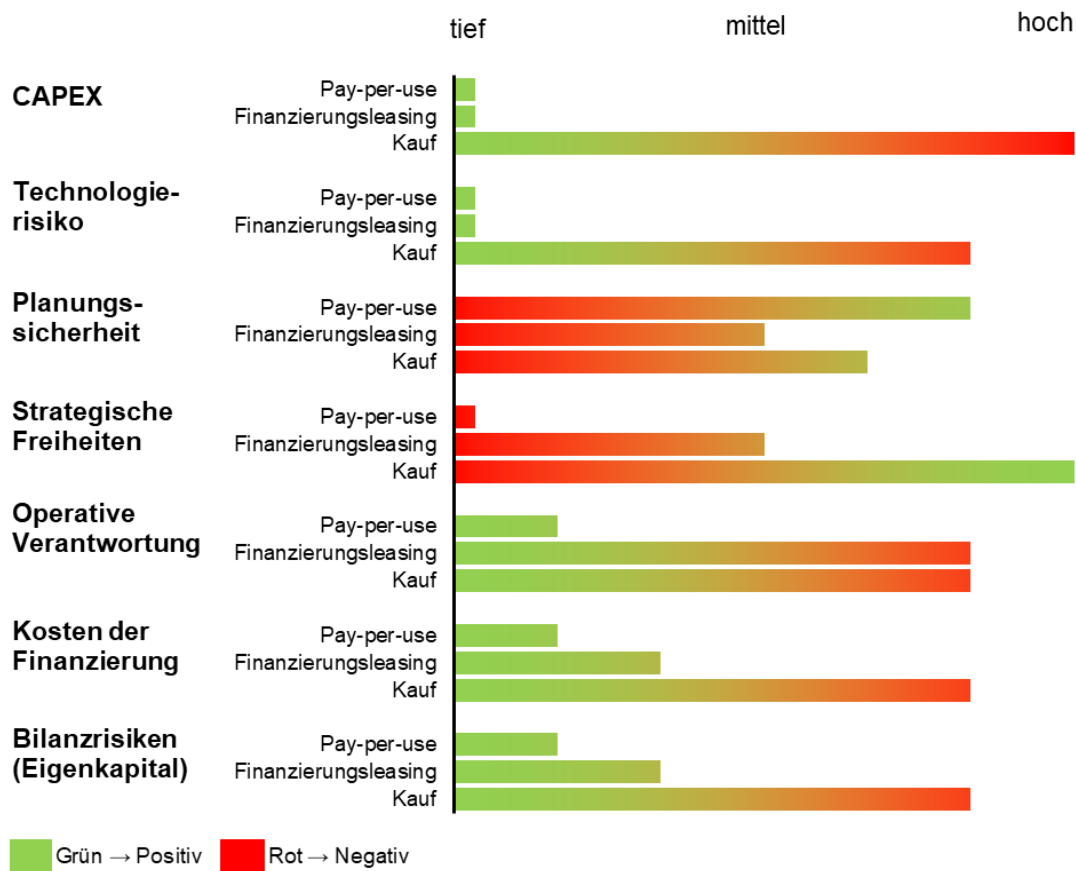


Abbildung 3.3-10 Vergleich verschiedener Finanzierungsmodelle für BZ-Lkw. Quelle: H2 Energy AG

Kernaussagen für HYWHEELS

Förderungen ermöglichen schon heute das Geringhalten der Mehrkosten von BZ-Fahrzeugen, insbesondere bei Lkw zwischen 0 und 35 %. Diese Rahmenbedingungen sollten genutzt werden, um zeitnah Fahrzeuge anschaffen und die Infrastruktur wirtschaftlich betreiben zu können. Perspektivisch werden die Gesamtkosten der Fahrzeuge weiter sinken. Hier sollten auch von Seiten der Politik langfristige Lösungen zur Planungssicherheit geschaffen werden, wie bspw. eine Mauterhöhung für Diesel-Lkw oder den Dieselpreis und den CO₂-Preis europaweit langfristig zu erhöhen.

Busse, ASF und Pkw werden heutzutage bereits einzeln oder in kleinen Stückzahlen angeboten. Lkw können ab Anfang 2022 in Deutschland in Serie erworben werden. Um die Fahrzeuge möglichst kostengünstig von den Herstellern zu erwerben, sollten zunächst mindestens 30 Fahrzeuge beschafft werden. Mit dieser Fahrzeugzahl können zudem zwei Tankstellen (Größe S, siehe Tabelle 3.2-6) wirtschaftlich betrieben werden. Somit empfiehlt sich eine gemeinschaftliche Beschaffung der Fahrzeuge. Wegen des geringeren Risikos bzgl. der Investitionskosten und mit Blick auf die hohe Planungssicherheit wird im Rahmen von HYWHEELS eine Beschaffung im Pay-Per-Use-Modell empfohlen.

3.3.4. Service und Wartung von BZ-Fahrzeugen

Arbeiten an BZ-Fahrzeugen lassen sich grundsätzlich in konventionellen Werkstätten durchführen. Grundvoraussetzung ist, dass das Wasserstoffsystem der Fahrzeuge technisch dicht ist.³⁵ Für die Arbeiten am Wasserstoff- und Hochvolt(HV)-System sind üblicherweise einige einfache Anpassungen notwendig. Im Bereich Service und Wartung von BZ-Fahrzeugen werden gegenüber konventionellen Fahrzeugen Anforderungen an Arbeiten mit Wasserstoff und im Hochvoltbereich betrachtet. Die Anforderungen und Kosten für die Ertüchtigung von Werkstätten und die Schulung von Personal werden beschrieben. Aktuell existieren in der Region Osthessen keine Werkstätten, die bereits für Arbeiten an BZ-Fahrzeugen ertüchtigt wurden.

Arbeiten mit Wasserstoff

Entsprechend den allgemeinen Grundsätzen der Arbeitssicherheit ist vor Einführung neuer Arbeiten eine Gefährdungsbeurteilung der entsprechenden Tätigkeiten durchzuführen. Das gilt auch für Arbeiten mit Wasserstoff und Hochvolt.³⁶ Bei BZ-Fahrzeugen sind die Anforderungen direkt abhängig von den Arbeiten, die am Fahrzeug durchgeführt werden sollen.³⁷ Es werden drei Arten von Arbeiten an BZ-Fahrzeugen unterschieden: Konventionelle Arbeiten; Arbeiten, bei denen geringe Mengen Wasserstoff freigesetzt werden können (typischerweise an Mittel- und Niederdrucksystemen) und Arbeiten, bei denen große Mengen an Wasserstoff freigesetzt werden können (typischerweise bei Hochdrucksystemen).³⁸ In Tabelle 3.3-6 sind die Arbeiten und die dazugehörigen Werkstatteertüchtigungen und Personalschulungen aufgeführt.

³⁵ Fahrzeugzulassungsvoraussetzung ist die technische Dichtheit des Wasserstoffsystems. Je nach Ursache des Werkstattaufenthalts ist die technische Dichtheit des Fahrzeugs vor der Einfahrt in die Halle sicherzustellen. Ist das Fahrzeug (bspw. infolge eines Unfalls) nicht technisch dicht, empfiehlt es sich, das Fahrzeug auf einem zuvor definierten sicheren Abstellplatz abzustellen.

³⁶ Die im Folgenden dargestellten Arbeiten stellen keine Gefährdungsbeurteilung in diesem Sinne dar, sondern erklären nur grundsätzlich die Herangehensweise. Die Darstellung bezieht sich **nur auf Serienfahrzeuge. Für Fahrzeuge vor Standardarbeitsanweisung (Standard Operating Procedure) und sonstige Prototypen gilt dies ausdrücklich nicht.**

³⁷ Grundsätzlich gilt, dass bei allen Arbeiten an BZ-Fahrzeugen die Vorgaben und Anforderungen der Hersteller einzuhalten sind. Die aufgezeigten Anforderungen an Werkstätten und das Personal gelten ausschließlich für technisch dichte Fahrzeuge.

³⁸ Unter konventionelle Arbeiten fallen klassische Arbeiten wie Reifenwechsel, Karosseriearbeiten und Arbeiten an 12/24-Volt-Systemen.

Tabelle 3.3-6: Übersicht zu Ertüchtigungs- und Schulungsmaßnahmen für Arbeiten mit Wasserstoff

Arbeiten	Ertüchtigung der Werkstatt	Schulung / Ausbildung des Personals
Konventionelle Arbeiten	Es sind keine Ertüchtigungen notwendig. Die Werkstatt sollte aber mindestens mit einem dreifachen Luftwechsel ausgestattet sein (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V [DGUV], 2000).	Mitarbeiter müssen entsprechend sensibilisiert und für den sicheren Umgang mit dem Fahrzeug und den wasserstoffführenden Bauteilen eingewiesen werden. Dies erfolgt bspw. durch den Arbeitgeber / Hersteller.
Arbeiten, bei denen geringe Mengen Wasserstoff freigesetzt werden können (beim Öffnen der Leitungen dürfen keine 10 Liter explosionsfähiges Gemisch entstehen können (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAuA], 2020)).	Arbeiten dürfen üblicherweise in Werkstattbereichen durchgeführt werden, die mit einer H₂-Sensorik und einem Potenzialausgleich ausgestattet sind. Die Sensoren sollten direkt über der potenziellen Wasserstoffquelle angebracht werden. Die Anzahl der Sensoren und ihre Sensibilität sind an die Größe der Werkstatt anzupassen. ³⁹	GAP-/GSP-Schulung (Gassystemeinbauprüfung / Gasanlagenprüfungen) für Personal nötig.
Arbeiten, bei denen große Mengen Wasserstoff freigesetzt werden können.	Arbeiten dürfen typischerweise in Werkstattbereichen durchgeführt werden, die mit H₂-Sensorik , Potenzialausgleich und einer Abblasevorrichtung ausgestattet sind.	GAP-/GSP-Schulung für Personal nötig.

Für die Umsetzung der Ertüchtigungsmaßnahmen ist für jede Werkstatt eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen.

Arbeiten mit Hochvolt

Bei Arbeiten mit Hochvolt (HV) ist zwischen Arbeiten an eigensicheren Fahrzeugen (bspw. Pkw) und an nicht eigensicheren Fahrzeugen (typischerweise Nutzfahrzeuge) zu unterscheiden. Bei HV-eigensicheren Fahrzeugen ist durch technische Maßnahmen für den Mitarbeiter ein vollständiger Berührungs- und Lichtbogenschutz gegenüber dem HV-System gewährleistet. Bei nicht eigensicheren Fahrzeugen ist dies zumindest teilweise nicht gewährleistet, so dass Mitarbeiter entsprechend darin geschult werden müssen, an nicht HV-eigensicheren Fahrzeugen selbstständig

³⁹ Bei der Detektion einer erhöhten Wasserstoffkonzentration (empfohlen bei 10 % der unteren Explosionsgrenze (UEG) bei 0,4 Vol-% H₂ in der Luft) werden Alarmierungs- und Lüftungsmaßnahmen eingeleitet. Eine wesentliche Maßnahme ist, dass bei 20 % (spätestens bei 40 %) UEG die Halle / Werkstatt stromlos geschaltet wird, um Zündquellen auszuschließen.

und sicher zu arbeiten. Eine Übersicht zu den notwendigen Qualifikationen kann bspw. der Information 200-005 „Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltssystemen“ der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V. (DGUV) entnommen werden (DGUV, 2010).

Kosten

Die Kosten für die Ertüchtigung einer bestehenden „klassischen“ Werkstatt mit den oben erwähnten Sicherheitsmaßnahmen belaufen sich für eine mittlere Werkstatt (ca. 4 Werkstattplätze) auf **ca. 100.000 €**. Die größten Kosten verursachen dabei vor allem die Änderungen an der Elektroinstallation (Möglichkeit der Stromlosschaltung der Werkstatt) und die mechanische Lüftung.

Die Kosten können stark reduziert werden, wenn die Maßnahmen nicht im Rahmen einer Ertüchtigung, sondern bei einem Neubau realisiert werden. Beispielsweise macht es keinen großen Unterschied aus, ob ein Blitzschutz der Klasse I oder der Klasse II installiert wird. Der Aufwand für die Werkstattertüchtigung lässt sich ggf. mithilfe von Landes- oder Bundesförderprogrammen reduzieren, z. B. im Rahmen einer Förderung zur Fahrzeugbeschaffung. Die Kosten für Mitarbeiterschulungen sind stark abhängig von den durchzuführenden Arbeiten. Sie liegen typischerweise zwischen 100 und 300 € für konventionelle Arbeiten und betragen jeweils bis zu 6.000 € für Arbeiten am Hochvoltssystem oder Arbeiten mit Wasserstoff.

Laut der Akteursumfrage im Rahmen des Projekts HYWHEELS wünschen sich über 90 % der Logistikunternehmen ein externes Service- und Wartungsangebot.

Kernaussagen für HYWHEELS

Grundsätzlich ist es sinnvoll, zentrale Service- und Wartungsstätten zu errichten, die BZ-Fahrzeuge versorgen können. Dadurch lassen sich Kosten und Aufwand für Hersteller und Betreiber minimieren. Für Unternehmen mit einer größeren Stückzahl an BZ-Fahrzeugen kann auch die Ertüchtigung einer eigenen Werkstatt wirtschaftlich sinnvoll sein. Im Rahmen des Projekts haben sich bereits verschiedene Werkstätten und Logistikunternehmen gemeldet, die sich vorstellen können, die Instandhaltung von BZ-Fahrzeugen in zentralen Werkstätten durchzuführen.

3.3.5. Handlungsempfehlungen im Bereich H2-Nutzung

Für die Einführung von BZ-Lkw ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- › Entsprechende Herstellerangebote für erste Tests und Erfahrungen für den Betrieb von BZ-Fahrzeugen sollten genutzt werden, um Erfahrungen zu sammeln.
- › Aktuell existiert eine vielversprechende Förderlandschaft für die Beschaffung erster BZ-Fahrzeuge durch Unternehmen, auf die zugegriffen werden sollte.
- › Schon heute können Fahrzeuge betrieben werden, auf deren Routen 350-bar-Tankstellen vorhanden sind. Eine Übersicht zur aktuellen Tankstelleninfrastruktur ist in Abbildung

4.1-2 dargestellt. In Hessen bieten sich diesbezüglich für 2022 die zwei Standorte Frankfurt/Infraserv und Gießen/Roth Holding an.

- › Parallel sollten sich regionale und überregionale Akteure zusammenschließen, um Fahrzeuge gemeinsam bei den Herstellern zu bestellen. Weiterhin ist es sinnvoll, eine zentrale Service- und Wartungsinfrastruktur zu errichten.

Zeitgleich kann die Einführung von Fahrzeugen und der Aufbau von Infrastruktur aktiv von **Kommunen in Osthessen** und allen anderen Regionen durch folgende Schritte vorangetrieben werden:

- › Bei Ausschreibungen zur Vergabe von ÖPNV- und Abfallsammel-Leistungen sollen nur emissionsfreie Fahrzeuge zugelassen werden. Für Busse könnte die Anforderung auch im Nahverkehrsplan verankert werden.
- › Die regionalen Akteure sollten bei der Netzwerkbildung zur Beschaffung von Fahrzeugen unterstützt werden.
- › Kommunen sollten bei der Errichtung von Tankstellen unterstützen, indem sie Flächen bereitstellen und das Genehmigungsverfahren beschleunigen. Gegebenenfalls sind auch Bau und Betrieb von Tankstellen durch kommunale Unternehmen sinnvoll.
- › Kommunen und kommunale Unternehmen sollten BZ-Fahrzeuge in ihren Fuhrpark aufnehmen, sofern dies betrieblich sinnvoll ist. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge mit hohen Laufleistungen oder hohen Nutzlastanforderungen (bspw. schwere Nutzfahrzeuge, Flottenfahrzeuge).

4. Fahrplan zur Umsetzung

Im Feinkonzept werden die Themen hinsichtlich des Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur und der Beschaffung von BZ-Fahrzeugen insbesondere im Logistikbereich umfassend erläutert. Grundlage sind detaillierte Gespräche mit Logistik in der Region und die breit angelegte Umfrage zur Ermittlung der Bedürfnisse der Logistikunternehmen. Insgesamt haben über 120 Unternehmen teilgenommen und ihr Interesse am Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur und der Einführung von BZ-Fahrzeugen bekräftigt. Nach der Auswertung der Umfrageergebnisse wurden intensive Gespräche mit Herstellern von BZ-Fahrzeugen geführt. Hierbei wurden die Rahmenparameter der heutigen und perspektivisch verfügbaren Fahrzeuge thematisiert, wie bspw. Fahrzeugart und -eigenschaften, Finanzierungsmodelle sowie Service und Wartung.

4.1. Erläuterung des idealen Fahrplans zur Umsetzung

Kernergebnisse für eine wirtschaftliche Umsetzung

Die Analyse im Rahmen von HYWHEELS hat ergeben, dass für die Einführung von 1.000 Fahrzeugen eine Errichtung von mindestens 10 bis 15 Tankstellen an verschiedenen Standorten notwendig ist. Damit der Aufbau dieser Tankstellen vorangetrieben werden kann, wurden Richtgrößen erarbeitet, die den wirtschaftlichen Betrieb einer Wasserstofftankstelle gewährleisten. Die Werte können auf jede Region Deutschlands bezogen werden:

- › Es ist ein Umsatz von mind. 450 bis 500 kg Wasserstoff pro Tag notwendig. Dies entspricht einer Versorgung von ca. 15 SNF pro Tag oder einer Betankung von etwa 120 bis 130 Pkw.

SNF eignen sich wegen hoher Fahrleistungen besonders für den Einsatz der BZ-Technologie und sind bereits in Serie verfügbar:

- › Busse und ASF können heutzutage bereits einzeln und in kleineren Stückzahlen erworben werden.
- › Lkw können ab Anfang 2022 in Deutschland in Serie erworben werden.⁴⁰

Kernergebnisse aus der Umfrage

Im Rahmen der Akteursumfrage haben insgesamt ca. 100 Logistikunternehmen Interesse an der Beschaffung von Lkw geäußert (siehe Abbildung 4.1-1). Weiter signalisieren über 90 % der Logistikunternehmen in der Umfrage Interesse an einer gemeinschaftlichen Bestellung. Verschiedenen Herstellern zufolge sollten zunächst ca. 30 Fahrzeugen beauftragt werden, damit sie die Fahrzeuge möglichst kostengünstig anbieten können.

⁴⁰ Quelle: Mark Freymueller, CEO der Hyundai Hydrogen Mobility AG.

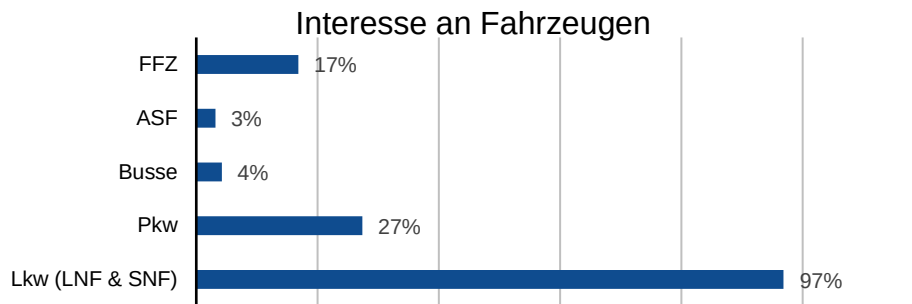


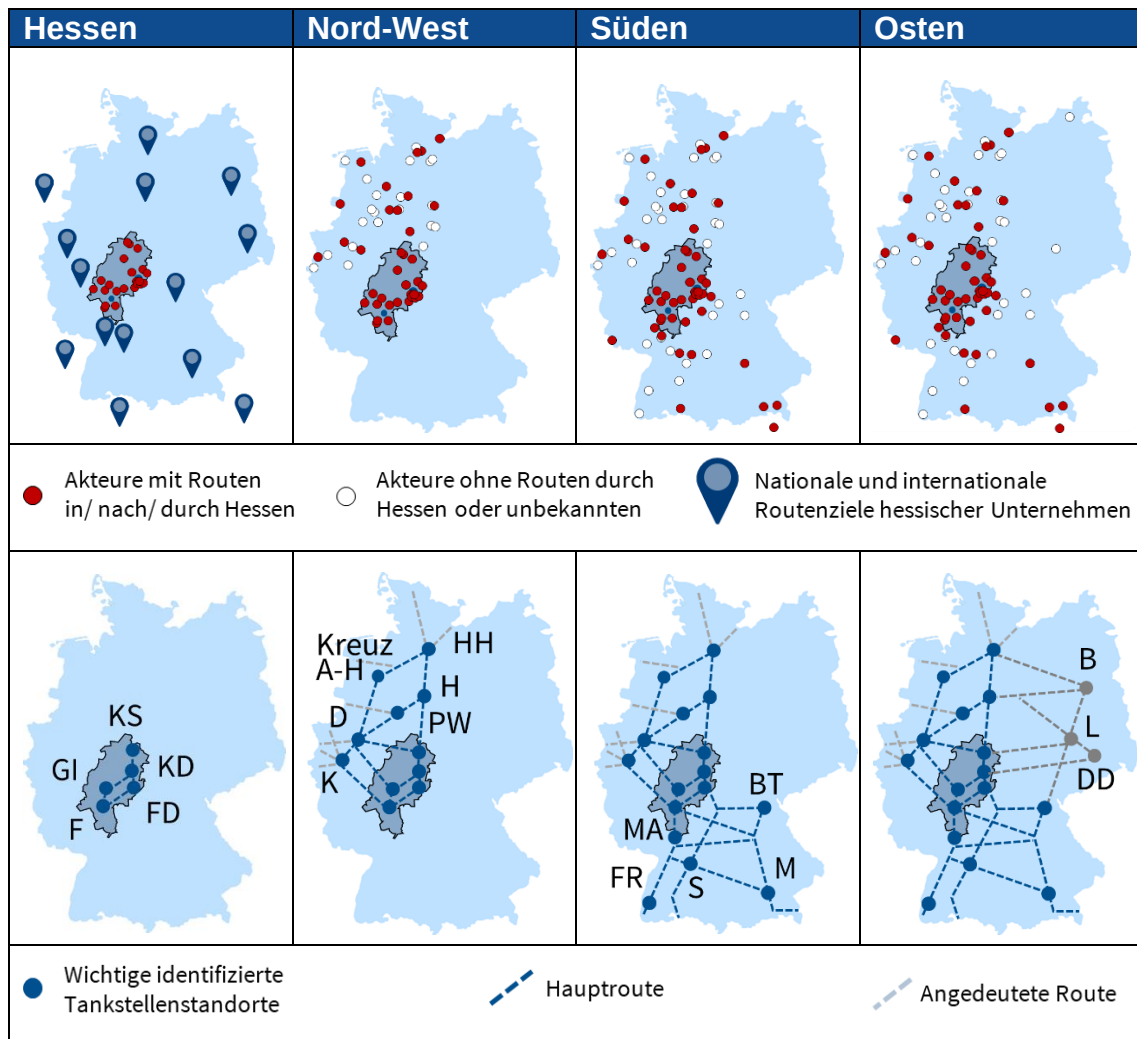
Abbildung 4.1-1: Interesse der Akteure an verschiedenen Fahrzeugklassen. Quelle: Akteursumfrage

Mit den ermittelten Kennwerten für den Aufbau einer Infrastruktur wurden in einem nächsten Schritt die Standorte der an der Beschaffung von BZ-Lkw und der Errichtung von Tankstellen interessierten Unternehmen ermittelt sowie mögliche Routen für den Betrieb von BZ-Fahrzeugen identifiziert (siehe Tabelle 4.1-1).

Viele der Logistikunternehmen haben ihren Standort in Hessen, insbesondere im Raum Fulda, Frankfurt und Kassel. Die Unternehmen transportieren Güter sowohl im regionalen und landesweiten Verteilerverkehr als auch im In- und Ausland.⁴¹ Außerhalb von Hessen haben vor allem Unternehmen in Nord- und Westdeutschland Interesse bekundet. Etwa die Hälfte dieser Logistikunternehmen hat festgelegte Routen nach oder durch Hessen (roter Punkt). Logistikunternehmen ohne Routen nach oder durch Hessen bzw. ohne festgelegte Route sind mit einem weißen Punkt gekennzeichnet. Während auch in Süddeutschland zahlreiche Unternehmen bereits ihr Interesse bekundet haben, wurde in Ostdeutschland im Rahmen der Umfrage nur ein geringes Interesse ermittelt. Entsprechend verlaufen die ersten Routen im nationalen Verkehr zwischen Hessen und Nordwest- sowie Süddeutschland.

⁴¹ Häufig werden national die Metropolregionen wie Hamburg, Hannover, Stuttgart, München, Berlin und auch kleinere Städte wie Neuss und Bamberg sowie international die Benelux-Staaten, Schweiz und Österreich angefahren.

Tabelle 4.1-1: Standorte interessierter Akteure und mögliche Tankstellenstandorte gemäß der Unternehmensumfrage



Bayreuth (BT), Berlin (B), Dortmund (D), Dresden (DD), Frankfurt (F), Freiburg (FR), Fulda (FD), Gießen (GI), Hamburg (HH), Hannover (H), Kassel (KS), Kirchheimer Dreieck (KD), Köln (K), Kreuz Ahlhorner Heide (A-H), Leipzig (L), Mannheim (MA), München (M), Porta Westfalica (PW), Stuttgart (S)

Auf der Basis der Angaben zu den von den Akteuren favorisierten Tankstellenstandorten hat sich ein flächendeckendes Netz ergeben (siehe Tabelle 4.1-1). Laut Umfrage streben 87 % der teilnehmenden Logistikunternehmen die Betankung ihrer Fahrzeuge an öffentlichen Tankstellen an. Demnach sollte der Aufbau von vorrangig öffentlichen Wasserstofftankstellen anvisiert werden, um möglichst vielen Unternehmen den Zugang zu eröffnen und die erforderliche Abnahmemenge für einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten zu können.

Im Rahmen des Feinkonzeptes wurden in Osthessen sieben Standorte ermittelt, die einer umfassenden Analyse unterzogen wurden (siehe Tabelle 4.1-2). In Hessen wurden die idealen Standorte an den Knotenpunkten neben Fulda bei Frankfurt, Gießen, Kassel und dem Kirchheimer Dreieck identifiziert (siehe Tabelle 4.1-1). Diese Tankstellen sind für die hessischen Unternehmen und den Durchgangsverkehr nutzbar. Um die Routen nach und in Nordwestdeutschland zu er-

möglichen, werden auf dieser Achse an wichtigen Autobahnkreuzen sechs Wasserstofftankstellen benötigt. Die dort ansässigen Logistikunternehmen haben so ebenfalls die Möglichkeit, BZ-Lkw zu betreiben, und tragen zudem maßgeblich dazu bei, die Tankstellenauslastung zu erhöhen. Zur Erschließung weiterer nationaler Routen sind weitere Standorte in Süd- und Ostdeutschland erforderlich.

Tabelle 4.1-2: Standorte für Wasserstofftankstellen in Ostthessen. Quelle: Infraser

Standort	Ort	Bezeichnung	Beschreibung des Standortes
Standort 1	Fliesen	Fa. Sostmeier	Gewerbegebiet Fliesen, Firmengelände
Standort 2	Fliesen	Tankstelle RHV	Gewerbegebiet Fliesen, Grundstück neben vorhandener RHV Tankstelle
Standort 3	Eichenzell	An L3307	Unbebaute Fläche, Gemeinde Eichenzell
Standort 4	Eichenzell	Euro Rastpark	Fläche neben vorhandener Total Tankstelle
Standort 5	Eichenzell	Eichenzell-Welkers Industriegebiet	Fläche nördlich von Tankpool24
Standort 6	Michelsrombach	A7 Abfahrt Hünfeld/Schlitz	Gewerbegebiet bei AS
Standort 7	Schlüchtern	A66 Abfahrt Schlüchtern Nord	Rasthof an A66
Standort 8	Fulda	A7 Abfahrt Fulda Nord	Autohof Fulda-Nord; neu zu erschließende Fläche, Aral Tankstelle

Drei Phasen zur Einführung von 1.000 und mehr Fahrzeugen

Ausgehend von den gezeigten Kernergebnissen für eine wirtschaftliche Umsetzung und den Kernergebnissen der Umfrage wurde ein Fahrplan mit drei Phasen entwickelt, der den Hochlauf für BZ-Fahrzeuge und Tankstellen skizziert (siehe Tabelle 4.1-3).

Tabelle 4.1-3: Angestrebte Anzahl von betriebenen BZ-Fahrzeugen und Wasserstofftankstellen

Jahre	Fahrzeuge in Betrieb	Min. Tankstellenanzahl in Betrieb
2021 – 2022	Tests / Einführung	Planung Aufbau
2023	20 – 40	1 – 2
2024	80 – 120	3 – 5
2025	350 – 450	5 – 10
2026	800 – 1.200 (Ziel)	10 – 15
2027	1.800 – 2.200	>15

Phase 1: Erprobung und Einführung von Fahrzeugen (2021 – 2022)

Die Umsetzung des Projekts startet mit der Erprobung und Einführung erster BZ-Fahrzeuge. Im Rahmen von HYWHEELS haben über 50 Unternehmen ihr Interesse an der Erprobung und Anschaffung von BZ-Fahrzeugen in Phase 1 bekräftigt. Um zeitnah BZ-Fahrzeuge auf die Straße zu bringen, finden bereits Gespräche mit Herstellern, Logistikunternehmen und Tankstellenbetreibern statt. Die Fahrzeuge können während der Erprobungs- und Einführungsphase zunächst bei den bereits vorhandenen 350-bar-Tankstellen betankt werden (in Hessen bspw. in Frankfurt, Gießen und möglicherweise Wiesbaden, siehe Abbildung 4.1-2). Besonders zu Beginn gilt es, sich mit aktuellen Tankstellenbetreibern darüber abzustimmen, ob eine Betankung von Lkw möglich ist. Dabei sind z. B. das Betankungsprotokoll und der notwendige Platz zu berücksichtigen.

Erste mögliche Routen könnten sein:

- › Fulda – Frankfurt
- › Frankfurt – Stuttgart
- › Frankfurt – Ruhrgebiet
- › Hamburg – Münster

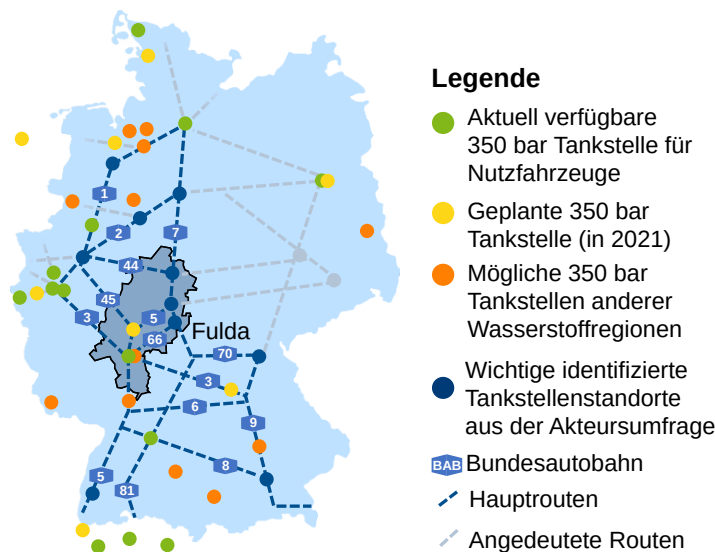


Abbildung 4.1-2: 350-bar-Wasserstofftankstellen in Deutschland

Wie in Tabelle 4.1-2 gezeigt existieren sieben potenzielle Standorte für Wasserstofftankstellen in Ostthessen. In Phase 1 gilt es mit dem Aufbau der regionalen Tankstelleninfrastruktur in Ostthessen zu beginnen. Parallel ist es erforderlich, deutschlandweit den Aufbau weiterer großer Tankstellen voranzutreiben. Zu Beginn des Aufbaus der Tankstelleninfrastruktur ist zu prüfen, ob durch den Zusammenschluss von Unternehmen, beispielsweise durch die Gründung einer Kommanditgesellschaft durch Logistikunternehmen, eine gesicherte Abnahmemenge für Wasserstoff an der Tankstelle generiert werden kann.

Bereits in Phase 1 ist es erforderlich regionale Werkstätten für den Service und Wartung der BZ-Fahrzeuge zu ertüchtigen. Hierfür haben sich bereits interessierte Kfz-Werkstätten gemeldet. Schulungen und Weiterbildungen zu Service und Wartung werden im ersten Schritt voraussichtlich durch Fahrzeughersteller angeboten. Hierbei ist es wichtig, dass regionale Institutionen wie die Industrie- und Handelskammer (IHK) und die Handwerkskammer (HWK) aber auch Innungen eingebunden werden.

Konkret werden aktuell zwei Möglichkeiten für die Erprobung von BZ-Lkw im Rahmen von HYWHEELS geplant:

- › „Tag des BZ-Lkw“: Am Tag des BZ-Lkw sollen interessierte Logistikunternehmen die Möglichkeit erhalten, BZ-Lkw zu erproben und die BZ-Technologie praxisnah kennenzulernen. Verschiedene Hersteller stellen Testfahrzeuge an diesem Tag zur Schau.
- › Test / Erprobung von BZ-Lkw: Verschiedene Hersteller stellen BZ-Fahrzeuge zur Verfügung, um diese im Linienbetrieb der Logistikunternehmen testen zu können. Hierbei können BZ-Fahrzeuge bspw. bis zu 14 Tage im Probebetrieb in den Logistikunternehmen eingesetzt werden.

Die Koordination des „Tag des BZ-Lkws“ sowie der Real-Tests der BZ-Lkw erfolgt durch eine zentrale Netzwerkkoordination, die durch die LandesEnergieAgentur Hessen und die Stadt Fulda unterstützt wird.

Deutschlandweit schreitet der Hochlauf von Fahrzeugen mit BZ-Technologie und der Betankung der Fahrzeuge voran. Hier bietet sich an, Synergien zu schaffen, indem Partnerschaften mit anderen geförderten Regionen (u. a. aus dem Programm HyLand) eingegangen werden, um gemeinsam ein nationales Tankstellennetz aufzubauen. In einer im Rahmen des HYWHEELS-Projektes durchgeführten Umfrage haben weitere Wasserstoffregionen in Deutschland einen Überblick über ihre Vorhaben gegeben. Es konnten Regionen identifiziert werden, mit denen Synergieeffekte im Hinblick auf Beschaffungsinitiativen und den Aufbau eines deutschlandweiten Tankstellennetzes für SNF erzielt werden können.⁴²

Folglich konnten zusätzliche Standorte für Tankstellen ermittelt werden, die das zukünftige 350-bar-Tankstellennetz erweitern und weitere Routen ermöglichen können (Abbildung 4.1-2, orange). In Abhängigkeit von der bestehenden Tankstelleninfrastruktur ergeben sich somit erste Cluster, in denen BZ-Fahrzeuge betrieben werden können.

⁴² Im Anhang in Tabelle A.6.3-2 sind Projekte zu finden mit ähnlichen Vorhaben wie HYWHEELS.

Phase 2: Anlauf im Wirtschaftsverkehr (2023 – 2024)

Durch den koordinierten Aufbau neuer Tankstellen vergrößert sich das mögliche Einsatzgebiet der Lkw, und mehr Routen können mit BZ-Lkw befahren werden. Die zu Beginn entstandenen Cluster vergrößern sich und können verbunden werden. Die ersten BZ-Fahrzeuge werden im Wirtschaftsverkehr eingesetzt, und die ersten nationalen Routen im Fernverkehr sind befahrbar.

Phase 3: Hochlauf (2025 – 2026)

Die Tankstelleninfrastruktur ist flächendeckend in Hessen, Nordwest- und Süddeutschland nutzbar, so dass die meisten Routen befahren werden können. Es werden insgesamt ca. 1.000 BZ-Fahrzeuge eingesetzt.

4.2. Handlungsempfehlungen zur Umsetzung

Für die Umsetzung des Projektes empfiehlt es sich, das entstandene Netzwerk gezielt und systematisch zu koordinieren. Hierzu soll eine zentrale Netzwerkkoordination eingerichtet werden. Unterstützt wird das Vorhaben durch die LandesEnergieAgentur Hessen. Die zentrale Netzwerkkoordination hat die Aufgabe, insbesondere in Phase 1, die Aktivitäten zur Umsetzung des Projektes zu planen und zu koordinieren und die Interessen aller Akteure zu bündeln.

Ziel der Netzwerkkoordination ist die zeitnahe Erprobung und Einführung von BZ-Lkw und der koordinierte Aufbau einer Tankstelleninfrastruktur. Die fortlaufende, koordinierte Kommunikation mit Herstellern von Infrastruktur und Fahrzeugen soll den Umstieg auf eine klimafreundliche Logistik erleichtern. Eine besondere Rolle spielt die Einbindung der Logistikunternehmen. Die Stadt Fulda und die LandesEnergieAgentur Hessen haben ihre Unterstützung für die Einrichtung einer zentralen Netzwerkkoordination zugesagt. Weiterhin wird die Ausrichtung des „Tages des BZ-Lkw“ sowie die „Realtests von BZ-Lkw“ unterstützt. Idealerweise ist mit dem Beginn von Phase 2 eine zentrale Netzwerkkoordination nicht mehr erforderlich und der Hochlauf der BZ-Fahrzeuge sowie der Aufbau der Tankstelleninfrastruktur erfolgt eigenständig durch die Unternehmen. Zur Umsetzung wird weiterhin empfohlen, dass sich interessierte Unternehmen direkt zusammenschließen und gemeinschaftlich die Optionen zur Beschaffung von Fahrzeugen diskutieren und in Angriff nehmen. Hierbei hilft die zentrale Koordinierungsstelle bei der Identifikation von Akteuren und der Netzworkebildung sowie bei der Organisation von Netzwerktreffen. Das übergeordnete Ziel ist eine Beschaffungsinitiative mit einer Vielzahl von Akteuren, die BZ-Fahrzeuge beschaffen, um die Verhandlungsposition bei der Beschaffung von BZ-Fahrzeugen zu stärken und angesichts des gebündelten höheren Potenzials das Interesse von Herstellern zu steigern.

Eine Vernetzung über die Region Osthessen hinaus (bspw. mit weiteren HyLand-Regionen) ist nicht nur im Hinblick auf eine nationale Beschaffungsinitiative sinnvoll. Der Aufbau eines flächendeckenden Tankstellennetzes muss auf nationaler und europäischer Ebene adressiert werden.

Weiterhin sind Aspekte wie die Standardisierung von Komponenten und die gesicherte und langfristige Bereitstellung von Fördermitteln Themen, die, wie vom Nationalen Wasserstoffrat gefordert, auf europäischer Ebene zu diskutieren sind.

5. Die Vision

5.1. Erst 1.000, was danach?

Ausgehend von der Keimzelle Osthessen, einem wichtigen Logistiknotenpunkt in Deutschland, können perspektivisch durch einen synchronen Aufbau von Tankstelleninfrastruktur und Fahrzeugflotten weiterführende Routen erschlossen werden. Hinzu kommen Wasserstofftankstellen, die in regionalen Projekten wie HYWHEELS aufgebaut werden. Die Vision, kurz- bis mittelfristig eine flächendeckende Tankstelleninfrastruktur für BZ-Fahrzeuge zu aufzubauen und den Betrieb eines Großteils von Transport- und Logistikrouten mit BZ-Fahrzeugen zu ermöglichen, wird von über 125 Unternehmen mitgetragen und mitentwickelt.

Wie gemeinsam mit den teilnehmenden Logistikunternehmen erarbeitet reichen bereits mindestens 10 - 15 Tankstellen, um einen Großteil des nationalen Logistikverkehrs zu ermöglichen. Die ermittelten Kennzahlen sind übertragbar auf jede Region. Die Region Osthessen dient somit als Blaupause für Deutschland.

In zahlreichen wissenschaftlichen Studien wird dem wasserstoffbasierten Schwerlastverkehr ein Potenzial von einem Drittel der Transportfahrzeuge prognostiziert. Somit stellt die BZ-Technologie, insbesondere im Schwerlastverkehr, eine elementare Säule auf dem Weg zu einem klimaneutralen Verkehr dar. Dies tritt umso eher ein, je deutlicher die Signale aus Politik und Wirtschaft für bspw. den CO₂-Preis und weitere im Rahmen des Feinkonzepts analysierte regulatorische Rahmenbedingungen sind. Der Durchbruch der BZ-Fahrzeuge, insbesondere bei SNF und Lkw, ermöglicht auch anderen Fahrzeugsegmenten eine flächendeckende Marktdurchdringung, da auch diese Fahrzeugsegmente von Skaleneffekten und weiteren Technologieentwicklungen profitieren. Auf diese Weise werden BZ-Fahrzeuge langfristig zu einer wichtigen Säule auf dem Weg zu einer emissionsfreien Mobilität und zum elementaren Bestandteil eines klimaneutralen Deutschlands.

5.2. Emissionsfreier Verkehr für ein klimafreundliches Europa

Dem Projekt HYWHEELS haben sich nicht nur osthessische Akteure angeschlossen, auch national hat das Projekt große Aufmerksamkeit gefunden und vor allem Anknüpfungspunkte zu weiteren regionalen Projekten für den Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur eröffnet. Die im Rahmen des Konzeptes ermittelten Kennwerte und Erkenntnisse können universell eingesetzt werden und deutschland- bzw. europaweit als Blaupause dem Aufbau von Wasserstoffinfrastruktur, bspw. an Logistikstandorten, dienen.

In der Schweiz werden BZ-Fahrzeuge bereits in den Betriebsablauf von Unternehmen integriert. Das Projekt „HyTruck“ treibt mit einer Beschaffungsinitiative den Einsatz von BZ-Lkw im Schwerlastverkehr in den Niederlanden an. Das Projekt HYWHEELS trägt wie diese Projekte ebenfalls wesentlich zu einem europaweiten Aufbau der Tankstelleninfrastruktur bei. Wenn die Synergien mit anderen Regionen bei der Betankungsinfrastruktur genutzt und weiter gehoben werden, ist kurz- bis mittelfristig auch eine flächendeckende europaweite Infrastruktur vorhanden. Die Vernetzung über die Landesgrenze stellt hierbei einen wichtigen Schritt dar. Projekte wie bspw. „European Hydrogen Backbone“ der europäischen Fernleitungsnetzbetreiber unterstützen den Hochlauf der BZ-Technologie mit europaweiten Wasserstofftransportmöglichkeiten und tragen damit zu einer höheren Marktdurchdringung von Wasserstoff in ganz Europa bei. Internationale Zusammenschlüsse von Unternehmen und Netzwerken ermöglichen so langfristig auch den Betrieb von Routen im internationalen Schwerlastverkehr.

A. Anhang

A.1. Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	
ASF	Abfallsammelfahrzeug
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BZ	Brennstoffzelle
CNG	Compressed Natural Gas
CO₂	Kohlenstoffdioxid
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ELY	Elektrolyse
ETS	Emissionshandelssystem (Emissions Trading System)
EU	Europäische Union
Ex	Explosion
FFZ	Flurförderzeug
GIS	Geoinformationssystem
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
H₂	Wasserstoff
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied natural gas
LSVA	leistungsbedingte Schwerverkehrsabgabe
MaStR	Marktstammdatenregister
ND	Niederdruck
NO_x	Stickoxide
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEM	Protonen-Austausch-Membranen

Abkürzungsverzeichnis	
Pkw	Personenkraftwagen
PPA	Power-Purchase-Agreement
PV	Photovoltaik
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SZM	Sattelzugmaschine
TCO	Total Cost of Ownership
TtW	Tank-to-Wheel
THG	Treibhausgase
UEG	Untere Explosionsgrenze
VLS	Volllaststunden
VRG	Vorranggebiete
WEA	Windenergieanlage
WtW	Well-to-Wheel

A.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1-1 :	Siegerehrung des Projekts HYWHEELS in der Kategorie HyExperts 2019	4
Abbildung 1.1-2 :	Siegerehrung des Projekts HYWHEELS in der Kategorie HyExperts 2019	4
Abbildung 1.2-3:	Schema regionale Wertschöpfung	5
Abbildung 2.1-1:	Angestrebte Kennzahlen im Projekt HYWHEELS	7
Abbildung 2.2-1:	Kurzfristig an BZ-Lkw interessierte Unternehmen sowie die kurzfristig (innerhalb von Phase 1) vorhandene Wasserstofftankstellen (350 bar)	9
Abbildung 3.1-1:	Stromgestehungskosten verschiedener Energieträger in Deutschland; Studie des Fraunhofer ISE (Fraunhofer ISE, 2021)	11
Abbildung 3.1-2:	Erzeugungsprofil einer Windenergieanlage über ein beispielhaftes Jahr (eigene Darstellung)	12
Abbildung 3.1-3:	Erzeugungsprofil einer PV-Freiflächenanlage über ein beispielhaftes Jahr (eigene Darstellung)	12
Abbildung 3.1-4:	Kombiniertes Erzeugungsprofil einer WEA und einer PV-Anlage gleicher Leistung (in Bezug auf die Leistung der WEA) (eigene Darstellung)	13
Abbildung 3.1-5:	Volllaststunden (VLS) eines Elektrolyseurs (ELY) mit 2 MW Leistung in Abhängigkeit der installierten Leistung von Windenergieanlagen sowie in Kombination mit PV-Anlagen	14
Abbildung 3.1-6:	Volllaststunden (VLS) eines Elektrolyseurs (ELY) mit 2 MW Leistung in Abhängigkeit der installierten Leistung von PV-Anlagen sowie in Kombination mit Windenergieanlagen mit jeweils 5,6 MW	15
Abbildung 3.1-7:	Ausbau der Windkraft in Osthessen als Heatmap (eigene Darstellung)	16
Abbildung 3.1-8:	Windenergieanlagen in der Region Osthessen, die aus der EEG-Vergütung fallen	18
Abbildung 3.1-9:	WEA in der Region Osthessen: Bestand (li.), Potential (Mitte) und Summe aus Bestand & Potential (re.)	20
Abbildung 3.1-10:	PV-Analyse Region Osthessen: Untersuchungsgebiet (li.), Ausschlussflächen (Mitte) und theoretisches Potenzial (re)	21

Abbildung 3.2-1:	Potenzielle Standorte für H ₂ -Tankstellen und Zählstellen	26
Abbildung 3.2-2:	Bewertungsmatrix Auswahl Tankstellenstandorte	27
Abbildung 3.2-3:	Lkw-Aufkommen nach Uhrzeit im Jahr 2018 an den Zählstellen 6879, 6715, 6877, 6680 und 6614 (Bundesanstalt für Straßenwesen)	29
Abbildung 3.2-4:	Betankungsprofil Logistiker / Spediteure Region Fulda	30
Abbildung 3.2-5:	Lkw-Aufkommen nach Tag und Uhrzeit im Zeitraum 2017 bis 2019 an den Zählstellen 6879, 6715, 6877, 6680 und 6614 (Bundesanstalt für Straßenwesen)	31
Abbildung 3.2-6:	Schematischer Aufbau einer Wasserstofftankstelle	32
Abbildung 3.2-7:	Aufstellungsvariante S	35
Abbildung 3.2-8:	Ausschnitt aus dem deutschen Gasfernleitungsnetz; eigene Abbildung nach (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016)	39
Abbildung 3.2-9:	Zusammensetzung Strompreis Netzbezug ohne Mehrwertsteuer (Stand Juli 2021)	41
Abbildung 3.2-10:	Investitionskosten der Auslegungsvarianten (Tankstelle inklusive Windpark und Photovoltaikanlage) (Stand Juli 2021)	41
Abbildung 3.2-11:	Wasserstoffkosten im Vergleich unter Betrachtung unterschiedlicher Fördermöglichkeiten (Stand Juli 2021)	42
Abbildung 3.2-12:	Wasserstoffkosten im Vergleich zu Dieselskosten (ohne MWSt.) bezogen auf Kilometer (Stand Juli 2021)	43
Abbildung 3.2-13:	Genehmigungsverfahren der Wasserstoffinfrastruktur	44
Abbildung 3.2-14:	Betreibermodelle für H ₂ -Tankstellen im Vergleich (eigene Abbildung nach (EMCEL GmbH, 2021))	45
Abbildung 3.3-1:	Aufbau eines BZ-Fahrzeuges	48
Abbildung 3.3-2:	Wasserstoffbedarf im Straßenverkehr in Osthessen bis 2030	51
Abbildung 3.3-3:	THG-Einsparung der Fahrzeugflotte in den Bezugsjahren 2030 und 2050 (WtW)	53
Abbildung 3.3-4:	NO _x -Einsparung der Fahrzeugflotte in den Bezugsjahren 2030 und 2050 über die gesamte Jahreslaufleistung (TtW)	53
Abbildung 3.3-5:	36t BZ-Gliederzug der Firma Hyundai	56

Abbildung 3.3-6:	Gesamtkostenvergleich 36 t Hängerzug, bei 100.000 km/a. Quelle: H2 Energy AG	57
Abbildung 3.3-7:	Sensitivität Gesamtkosten-Parameter mit 80 % CAPEX-Mehrkostenförderung [€/km]. Quelle: H2 Energy AG	58
Abbildung 3.3-8:	Relevante Einflussfaktoren im zeitlichen Verlauf für Diesel / H ₂ -Gesamtkosten	59
Abbildung 3.3-9:	Gesamtmehrkosten (inkl. Förderung) von BZ-Fahrzeugen gegenüber konventionellen Fahrzeugen	60
Abbildung 3.3-10:	Vergleich verschiedener Finanzierungsmodelle für BZ-Lkw. Quelle: H2 Energy AG	62
Abbildung 4.1-1:	Interesse der Akteure an verschiedenen Fahrzeugklassen. Quelle: Akteursumfrage	68
Abbildung 4.1-2:	350-bar-Wasserstofftankstellen in Deutschland	71
Abbildung A.5.2 1:	Ausbaustand erneuerbare Energien in Osthessen (Abbildung)	84
Abbildung A.5.9 1:	Speichertypen Wasserstofftanks	96
Abbildung A.5.11 1:	H ₂ -Kosten aus Elektrolyse mit Strombezug aus Wind/PV/Netz im Vergleich zu Literaturangaben	100
Abbildung A.6.1 1:	Verteilung der Logistikunternehmen mit Fahrzeugen in Klasse N2 und N3 nach Anzahl der Fahrzeuge in der jeweiligen Klasse	102
Abbildung A.6.2 1:	Lebenszyklus eines Nutzfahrzeugs inkl. Rohstoffgewinnung, Materialherstellung, Produktion, Nutzung, Verwertung und Herstellung der Energieträger	102
Abbildung A.6.2 2:	THG-Emissionen der Wasserstoffbereitstellung in Deutschland, verschiedene Herstellungsrouten, Basisjahr 2020	105
Abbildung A.6.2 3:	THG-Emissionen einer SZM je 100 km (exkl. Fahrzeugherstellung und EoL), Basisjahr 2020	106
Abbildung A.6.2 4:	Jährliche THG-Einsparungen der Brennstoffzellen-SZM-Flotte	107
Abbildung A.6.2 5:	Jährliche Stickoxid-Einsparungen der BZ-SZM-Flotte in der Region Osthessen (Annahme: 10 % der jährlichen SZM-Fahrleistung entfallen auf die Region Osthessen)	107

Abbildung A.6.6 1:	CAPEX-Angaben aus verschiedenen Literaturquellen (Danebergs, 2019; Hunter et al., 2020; Hydorgen Council; Karlstöm et al.; MacCharles et al., 2020; Ruf et al., 2020; thinkstep AG & prognos AG; Unterlohner, 2020), zusammengestellt durch H2 Energy AG	114
Abbildung A.6.6 2:	CAPEX-Angaben verschiedener OEM (Hyzonmotors, 2021) und Abschätzung der Gesamtkostenparität CH. Quelle: H2 Energy AG	115
Abbildung A.6.6 3:	Bottom-Up-Berechnung der BZ-Lkw CAPEX einer SZM ohne Auflieger in k€. Quelle: H2 Energy AG	116
Abbildung A.6.6 4:	Entwicklung der BZ-Lkw-CAPEX einer SZM ohne Anhänger in Abhängigkeit von den Absatzmengen. Quelle: H2 Energy AG	117

A.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.2-1:	Standorte für Wasserstofftankstellen in Osthessen. Quelle: Infraser	10
Tabelle 3.1-1:	Volllaststunden eines 2 MW Elektrolyseurs in Abhängigkeit der Art der Energiebereitstellung	14
Tabelle 3.1-2:	Ausbaustand der erneuerbaren Energien in Osthessen auf Basis des Marktstammdatenregisters	16
Tabelle 3.1-3:	Anteil der EE am Gesamtstromverbrauch im Landkreis Fulda und in der Region Osthessen (eigene Berechnungen)	17
Tabelle 3.1-4:	Windvorrangflächen in Osthessen	19
Tabelle 3.1-5:	Potenzial Windenergie in Osthessen (eigene Berechnung)	20
Tabelle 3.2-1:	Potenzielle Standorte für H ₂ -Tankstellen	26
Tabelle 3.2-2:	Potenzial erneuerbare Energien im Umkreis der potenziellen Tankstellenstandorte (eigene Berechnung)	28
Tabelle 3.2-3:	Größe Wasserstofftankstellenvarianten	32
Tabelle 3.2-4:	Parameter Anlagentechnik	34
Tabelle 3.2-5:	Parameter Speicher	35
Tabelle 3.2-6:	Auslegungsvarianten Wasserstofftankstelle	36
Tabelle 3.2-7:	Transportmöglichkeiten für Wasserstoff	37
Tabelle 3.2-8:	Kriterien zur Wasserstoff-Kostenbetrachtung	40
Tabelle 3.3-1:	Technische Parameter von BZ-Fahrzeugen (Navas, 2017) [Herstellerangaben, www.faun.com , 2020; www.still.de , 2020; Hyundai, 2020; Toyota, 2020 https://www.auto-data.net , 2021; https://ecomento.de , 2021]	48
Tabelle 3.3-2:	Aktueller Fahrzeugbestand und Potenziale für die Einführung von BZ-Fahrzeugen. (Bründlinger et al., 2018; Kraftfahrt-Bundesamt, 2020)	50
Tabelle 3.3-3:	Übersicht relevanter regulatorischer Treiber im Verkehrsbereich	54
Tabelle 3.3-4:	Mögliche Finanzierungsmodelle zur Beschaffung von BZ-Fahrzeugen	60
Tabelle 3.3-5:	Parameter für die qualitative Bewertung von Finanzierungsmodellen	61

Tabelle 3.3-6:	Übersicht zu Ertüchtigungs- und Schulungsmaßnahmen für Arbeiten mit Wasserstoff	64
Tabelle 4.1-1:	Standorte interessierter Akteure und mögliche Tankstellenstandorte gemäß der Unternehmensumfrage	69
Tabelle 4.1-2:	Standorte für Wasserstofftankstellen in Osthessen. Quelle: Infraseriv	70
Tabelle 4.1-3:	Angestrebte Anzahl von betriebenen BZ-Fahrzeugen und Wasserstofftankstellen	70
Tabelle A.5.1-1:	Ausbaustand erneuerbarer Energien in Osthessen in Zahlen	89
Tabelle A.5.3-1:	Übersicht Wasserstofftankstellen in Hessen	91
Tabelle A.5.4-1:	Übersicht Flächen für potenzielle H ₂ -Tankstellen in Osthessen	92
Tabelle A.5.5-1:	Übersicht WEA- und PV-Flächen in der Nähe potenzieller H ₂ -Tankstellen	95
Tabelle A.5.6-1:	Übersicht H ₂ -Verdichter	97
Tabelle A.5.6-2:	Übersicht H ₂ -Speicher	98
Tabelle A.5.7-1:	Auswahl Hersteller von alkalischen (AEL) und Proton-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyseuren	99
Tabelle A.5.8-1:	Auswahl Hersteller von H ₂ -Tankstellen	100
Tabelle A.5.10-1:	Aufstellungspläne H ₂ -Tankstellen	102
Tabelle A.5.11-1:	Investitionskosten Auslegungsvarianten in T€	104
Tabelle A.5.11-2:	Betriebskosten Auslegungsvarianten in T€/a	104
Tabelle A.5.11-3:	Stromerzeugungs- und bedarfsmengen der Auslegungsvarianten in MWh/a	104
Tabelle A.5.11-4:	Wasserstoffbetankungsmengen in kg/a	105
Tabelle A.6.1-1:	Bestandszahlen aller Straßenverkehrsfahrzeuge in Osthessen; getrennt nach Gewichtsklassen und den spezifischen CO ₂ -Emissionen in t CO ₂ pro Jahr	106
Tabelle A.6.2-1:	Verbrauchsdaten der verschiedenen Fahrzeugklassen. Quelle: Expertise EMCEL GmbH aus Kommunikation mit Betreibern und Herstellern	108
Tabelle A.6.2-2:	Zusammensetzung des Strommixes für die Wasserstoffbereitstellung	109

Tabelle A.6.2-3:	Anzahl BZ-Fahrzeuge in der Region Osthessen in den Jahren 2030 und 2050, jährliche Laufleistung je Fahrzeugklasse und Abschätzung des Anteils der Jahresfahrleistung je Fahrzeugtyp in der Region Osthessen	112
Tabelle A.6.3-1:	Beschaffungsinitiativen von BZ-Lkw	113
Tabelle A.6.3-2:	HyLand-Projekte mit ähnlichem Schwerpunkt	113
Tabelle A.6.4-1:	Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Pkw	114
Tabelle A.6.4-2:	Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-FFZ	114
Tabelle A.6.4-3:	Verfügbare Modelle von BZ-Lkw (von Herstellern und Umrüstern)	115
Tabelle A.6.4-4:	Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Bussen	116
Tabelle A.6.4-5:	Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Kommunalfahrzeugen	116
Tabelle A.6.5-1:	Förderungen auf Bundesebene	117
Tabelle A.6.5-2:	Förderungen auf Landesebene	118
Tabelle A.6.7-1:	Eckdaten Hyundai Xcient 4x2. Quelle: (Hyundai Hydrogen Mobility AG)	123

A.4. Literaturverzeichnis

- Bründlinger, T., Elizalde König, J., Frank, O., Gründig, D., Jugel, C., Kraft, P., Krieger, O., Mischinger, S., Prein, P., Seidl, H., Siegmund, S., Solte, C., Teichmann, M., Willke, J. & Wolke, M. (2018). dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Berlin. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. (10.2020). *TRGS 721: Gefährliche explosionsfähige Gemische – Beurteilung der Explosionsgefährdung*.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). BAST. https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html
- Bundesministerium für Bildung und Forschung. *Wasserstoffspeicherung mit LOHC: sicher und kompakt*. <https://www.innotruck.de/mobile-ausstellung/exponatkatalog/wasserstoffspeicherung-mit-lohc>
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2019, 1. Oktober). *Klimaschutzprogramm 2030-Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030*. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutzprogramm_2030_bf.pdf
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (November 2020). *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge: Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße*. Berlin. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2016). *Das deutsche Gas-Fernleitungsnetz im Überblick*.
- Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen. (2021). *Marktstammdatenregister - Erweiterte Einheitenübersicht*. <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR/Einheit/Einheiten/ErweiterteOeffentlicheEinheitenuebersicht>
- Danebergs, J. (2019). *Techno-economic Study of Hydrogen as a Heavy-duty Truck Fuel*. KTH, Stockholm.
- DB Netze, DB Energie, DB Cargo BTT, Infrserv, NPROXX & ESWE. (2020). *Potenzialbeschreibung Wasserstofftransport über das Schienennetz*.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (02.2000). *DGUV Regel 109-009 Fahrzeug-Instandhaltung*.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (06.2010). *DGUV Information 200-005 Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystem*.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2013). *DIN EN 16258 „Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhaus-gasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)“*. Berlin. Beuth-Verlag.
- Elisabeth Paukert. (2019). *Einsatzmöglichkeiten innovativer Wasserstoffspeicher*. Fachhochschule Burgenland GmbH.
- EMCEL GmbH. (2021). *Welche Betreibermodelle von Wasserstofftankstellen gibt es?* <https://emcel.com/de/betreibermodelle-von-wasserstofftankstellen/>
- e-mobil BW GmbH – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie. *Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf*.
- ESWE Verkehr (Hrsg.). (2020). *ESWE Verkehr*. <https://www.eswe-verkehr.de/en/news/eintrag/zukunftprojekt-wasserstofftankstelle-offiziell-gestartet.html>

- Europäische Kommission. (2021a, 25. März). *Reducing CO2 emissions from heavy-duty vehicles*. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy_de
- Europäische Kommission (Hrsg.). (2021b, 27. Mai). *Ein europäischer Grüner Deal: Erster klimaneutraler Kontinent werden*. Europäische Kommission. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- Europäisches Parlament. (2019, 18. April). *Parlament bestätigt neue CO2-Emissionsgrenzwerte für Lkws* [Press release]. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20190412IPR39009/parlament-bestatigt-neue-co2-emissionsgrenzwerte-fur-lkws>
- Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2019a, 17. April). *Verordnung (EU) 2019/631 zur Festsetzung von CO2-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011: Verordnung (EU) 2019/631*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32019R0631>
- Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2019b, 20. Juni). *Richtlinie (EU) 2019/1161 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge: Richtlinie (EU) 2019/1161*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32019L1161>
- Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2019c, 20. Juni). *Verordnung (EU) 2019/1242 zur Festlegung von CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates.: Verordnung (EU) 2019/1242*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1242>
- FNB Gas. (2020). *Fernleitungsnetzbetreiber veröffentlichen Karte für visionäres Wasserstoffnetz (H2-Netz)*.
- Fraunhofer ISE. (2021). *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien - Juni 2021*.
- Gehling, A. (2021, 28. Januar). *Die Arbeit der NOW und aktuelle und geplante Förderaufrufe: Wasserstoff in der Verkehrswende*. NOW GmbH. HYMAT Energie. https://hymat-energie.de/wp-content/uploads/2021/02/2021-01-28-NOW-2.-Netzwerktreffen-HYMAT_Energie.pdf
- H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG. *Häufige Fragen: Fragen zu H2-Kosten, Bezahlung & Rechnungen*. <https://h2.live/faq>
- Hunter, C., Penev, M. & Reznicek, E. (2020). *Market Segmentation Analysis of Medium and heavy Duty Trucks with a Fuel Cell Emphasis*.
- Hydorgen Council. *Path to hydrogen competitiveness, A cost perspective*.
- Hyundai Hydrogen Mobility AG (Hrsg.). *XCIENT Fuel Cell*. <https://hyundai-hm.com/pdf-testseite/>
- Hyzonmotors (02.2021). *Accelerating the Hydrogen Transition: Investor Presentation*. Hyzonmotors. <https://hyzonmotors.com/wp-content/uploads/2021/02/Hyzon-Investor-Presentation-02.12.21ck.pdf>
- INFRAS AG. (2021). *HBEFA - Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 4.1*.
- Karlstöm, M., Holmber, E., Grauers, A. & Pohl, H. *Can fuel cells become a mass produced option globally for heavy duty trucks 2030+? An exploratory study*.
- Kraftfahrt-Bundesamt (Hrsg.). (2020). *Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken (1. Januar 2020)*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html

- MacCharles, A., Lin, C., Xu, A., Berdichevskiy, A., Pocard, N., Wong, A. & DeWoskin, K. (2020). *Fueling the Future of Mobility, Hydrogen and fuel cell solutions for transportation*.
- Navas, C. (2017). *Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities: FCH Material handlingequip*. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Brüssel.
[https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121_FCH2JU_Application-Package_WG2_Material%20handling%20equipment%20\(ID%202910567\)%20\(ID%202911653\).pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/FCH%20Docs/171121_FCH2JU_Application-Package_WG2_Material%20handling%20equipment%20(ID%202910567)%20(ID%202911653).pdf)
- Neumann, H. (2020). *Einmaliges Projekt: Erdgasleitung transportiert 100 Prozent Wasserstoff*.
- Ruf, Y., Baum, M., Zorn, T., Menzel, A. & Rehberger, J. (2020). *Fuel Cells Hydrogen Trucks: Heavy-Duty's High Performance Green Solution*. Brüssel.
- Sphera Solutions GmbH. (2021). *GaBi Ökobilanzdatenbank SP40*.
- Statistisches Bundesamt. (2020). *Umweltökologische Gesamtrechnungen: Private Haushalte und Umwelt*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/_inhalt.html
- Stolzenburg, K. *Speicheroptionen für Wasserstoff*.
- thinkstep AG & prognos AG. *Nullemissions-Nutzfahrzeuge: Vom ökologischen Hoffnungsträger zur ökonomischen Alternative*. Baden-Württemberg.
- Unterlohner, F. (2020). *Comparison of hydrogen and battery electric trucks*.

A.5. Anlage H₂-Erzeugung und Infrastruktur

A.5.1. Ausbaustand erneuerbaren Energien in Osthessen in Zahlen

Tabelle A.5.1-1: Ausbaustand erneuerbarer Energien in Osthessen in Zahlen

	Energieträger	Anzahl	Leistung in MW	Installierte Leistung je 100.000 Einwohner in MW
LK Fulda	Wind	22	57	26
	PV	10.479	172	77
	Biomasse	27	9,8	4
	Wasserkraft	53	1,5	1
Vogelsbergkreis	Wind	255	458	434
	PV	4.516	91	86
	Biomasse	25	15,6	15
	Wasserkraft	34	1,2	1
Hersfeld-Rotenburg	Wind	53	118	98
	PV	5.431	126	104
	Biomasse	28	7,5	6
	Wasserkraft	37	3,9	3
Main-Kinzig-Kreis	Wind	106	264	63
	PV	9.673	146,5	35
	Biomasse	38	18,5	4
	Wasserkraft	27	6,3	1
Osthessen	Wind	436	896	103
	PV	30.099	145	17
	Biomasse	118	51,4	6
	Wasserkraft	151	12,9	1

A.5.2. Visualisierter Ausbaustand erneuerbaren Energien in Osthessen

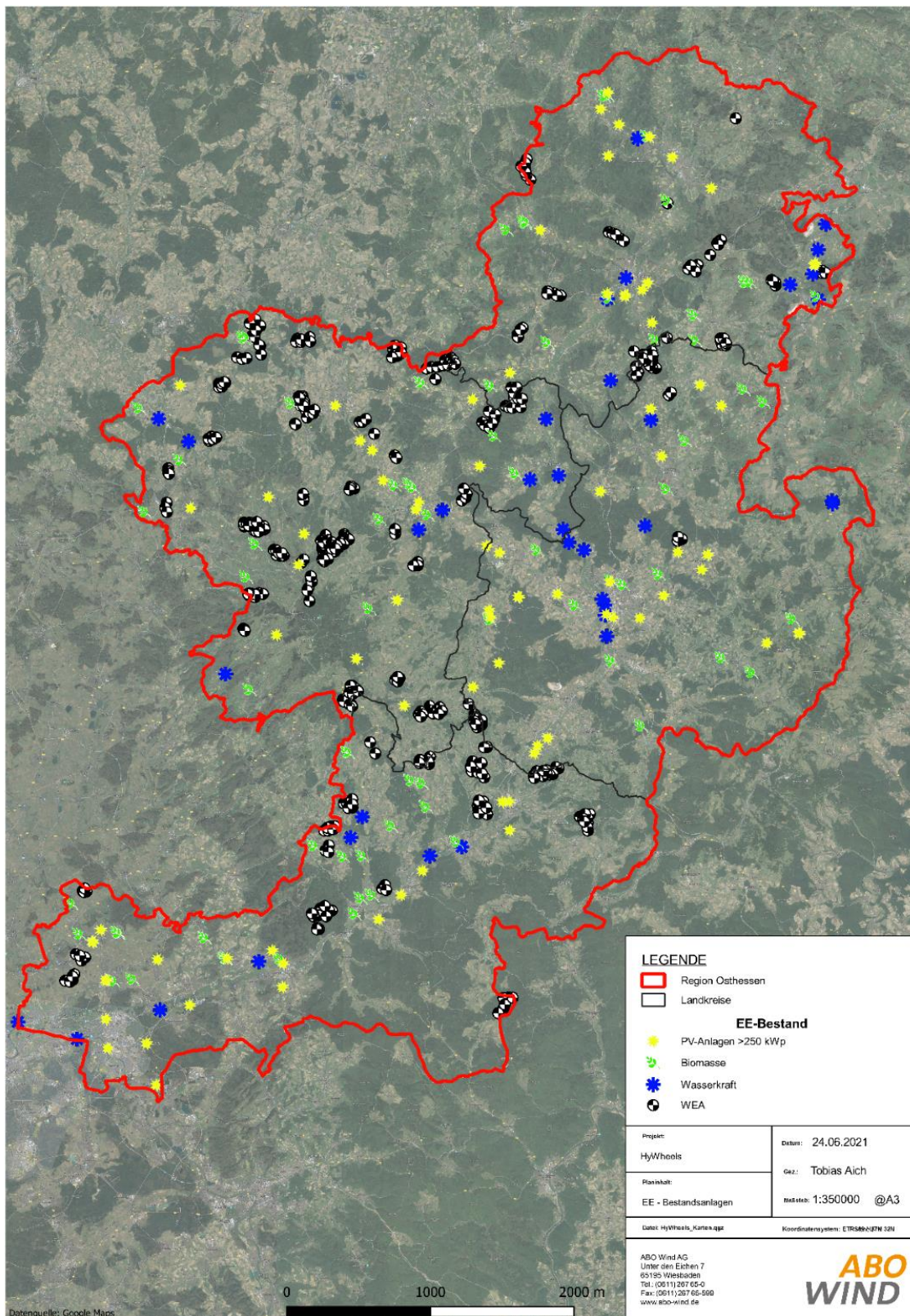


Abbildung A.5.2-1: Ausbaustand erneuerbare Energien in Osthessen (Abbildung)

A.5.3. Übersicht Wasserstofftankstellen in Hessen

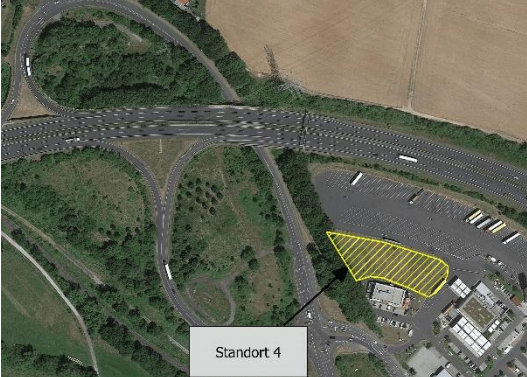
Tabelle A.5.3-1: Übersicht Wasserstofftankstellen in Hessen

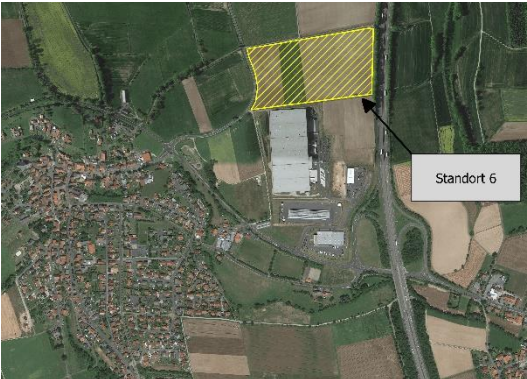
Ort	Druckstufe	Fahrzeugklasse	Anmerkung
Wiesbaden	700 bar	Pkw	
Frankfurt-Höchst	350 & 700 bar	Busse, Lkw, Pkw	
Frankfurt-Niederrad	700 bar	Pkw	
Offenbach	350 & 700 bar	Pkw	
Frankfurt-Ostend	700 bar	Pkw	
Bad Homburg	700 bar	Pkw	
Limburg a.d. Lahn	700 bar	Pkw	
Kassel-Lohfelden	700 bar	Pkw	
Weiterstadt	700 bar	Pkw	
Kirchheim	700 bar	Pkw	im Aufbau
Wiesbaden	350 bar	Busse	Betriebsgelände

A.5.4. Übersicht Flächen für potenzielle H₂-Tankstellen in Osthessen

Tabelle A.5.4-1: Übersicht Flächen für potenzielle H₂-Tankstellen in Osthessen

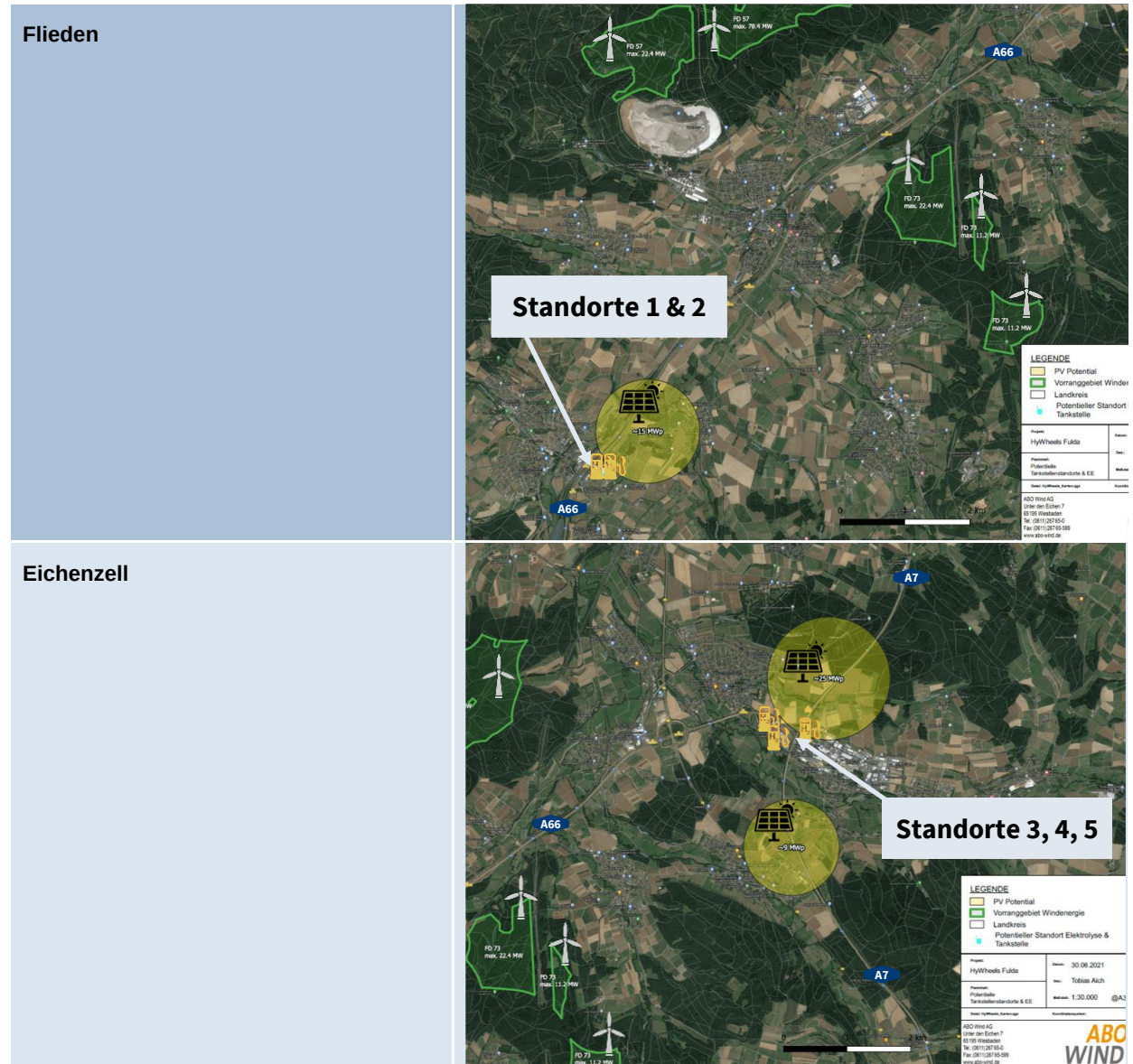
	Ort	Bezeichnung	Beschreibung	Fläche [m ²]	EE-Poten- zial		
1	Flieden	Fa. Sostmeier	Fläche im Gewerbegebiet Flieden, Firmengelände	ca. 13.000	PV: ca. 15 MW Wind: ca. 145 MW		
2	Flieden	Tankstelle RHV	Fläche im Gewerbegebiet Flieden, Grundstück neben vorhandener RHV Tankstelle	ca. 3.300	PV: ca. 15 MW Wind: ca. 145 MW		

3	Eichenzell	An L3307	Unbebaute Fläche, Gemeinde Eichenzell	ca. 14.600	PV: ca. 46 MW Wind: ca. 123 MW		
4	Eichenzell	Euro Rastpark	Fläche neben vorhandener Total Tankstelle	ca. 3.000	PV: ca. 46 MW Wind: ca. 123 MW		
5	Eichenzell	Eichenzell- Welkers Industriegebiet	Fläche nördlich von Tankpool24	ca. 6.500	PV: ca. 46 MW Wind: ca. 123 MW		

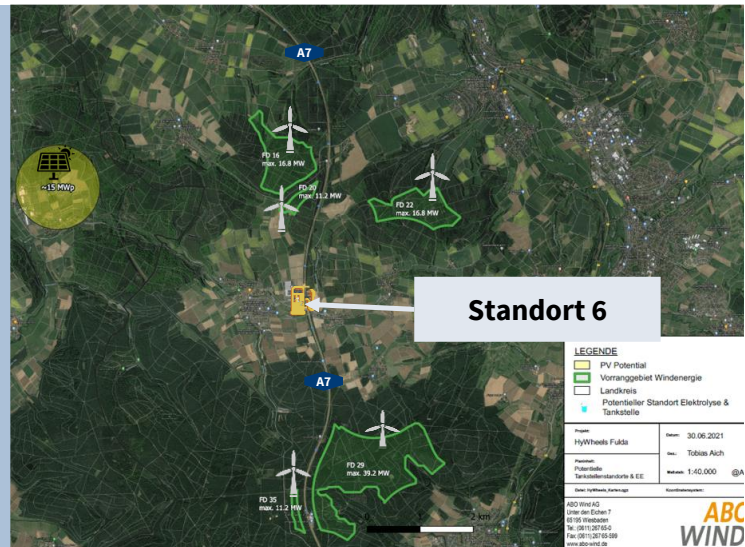
6	Michelsrombach	A7 Abfahrt Hünfeld Schlitz	Gewerbegebiet bei Abfahrt	unbekannt	PV: ca. 14 MW Wind: ca. 95 MW		
7	Schlüchtern	A66 Abfahrt Schlüchtern Nord	Rasthof an A66	ca. 18.000	PV: ca. 21 MW		
8	Fulda	A7 Abfahrt Fulda Nord	Autohof Fulda Nord; neu zu erschließende Fläche, Aral Tankstelle	ca. 14.300	PV: ca. 5,5 MW Wind: ca. 67 MW		

A.5.5. Übersicht WEA- und PV-Flächen in der Nähe potenzieller H₂-Tankstellen

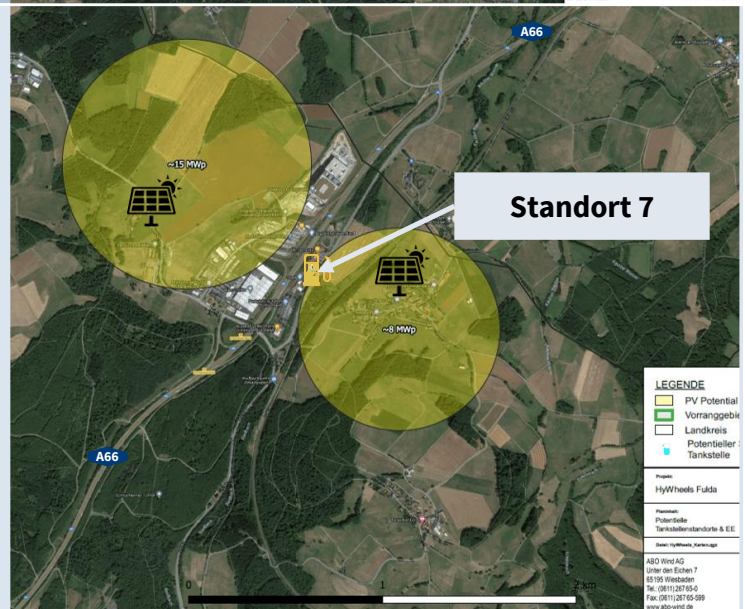
Tabelle A.5.5-1: Übersicht WEA- und PV-Flächen in der Nähe potenzieller H₂-Tankstellen



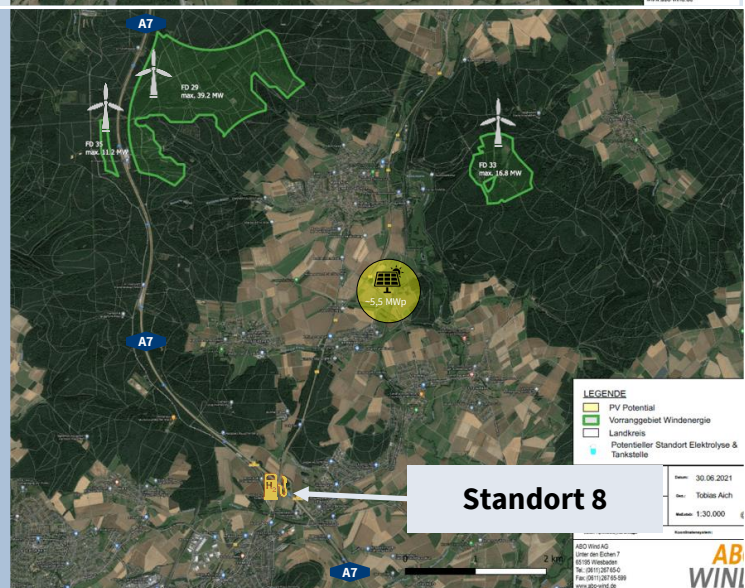
Michelsrombach



Schlüchtern



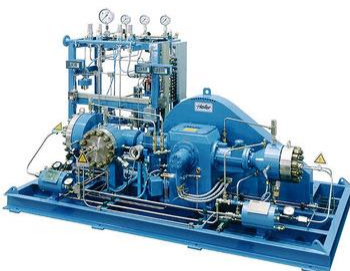
Fulda



A.5.6. Übersicht H₂-Verdichter- und Speichertechnologien

Verdichtertechnologien

Tabelle A.5.6-1: Übersicht H₂-Verdichter

Verdichter	Membranverdichter	Kolbenverdichter	Ionischer Verdichter
Funktion	Hydraulisch	Hydraulisch oder Kurbelbetrieb	Hydraulisch mit ionischer Flüssigkeit
Lieferanten	Hofer, Mehrer, Sera	Mehrer, Atlascopco, Hug, Sera	Linde
Merkmale	Muss permanent laufen Weniger Verschleiß als Kolbenverdichter	Thermische Maschine Ölgeschmiert (hoher Druck) und nicht-ölgeschmiert verfügbar Hubregelung möglich	Isotherm Kein Totraum Keine Ausdampfung
Kosten	Hoch	Hoch	Hoch
Verschleiß	Mittel	Hoch (hohe Wartungskosten)	Niedrig
Gasreinheit	Hoch	Hoch	Hoch
	 Quelle: HOFER Hochdrucktechnik GmbH	 Quelle: HOFER Hochdrucktechnik GmbH	 Quelle: Linde GmbH

Speichermethoden

Tabelle A.5.6-2: Übersicht H₂-Speicher

Speicherung	Druckgas	Flüssiggas	Untertage	LOHC
Methode	Speicherung von H ₂ mit höherem Druck als Normaldruck	Speicherung bei -253 C° und damit im flüssigen Aggregatzustand ⁴³	Kompressor presst Gas unter hohem Druck in die Speicher	Wasserstoff über einen Katalysator chemisch an flüssige, organische Wasserstoffträger gebunden (Kohlenstoffverbindung auf Erdölbasis z.B. Dibenzyltoluol) ⁴³ Hydrierung ⁴³
Aufbau der Speicher	Je nach Einsatzgebiet variierend (stationär oder mobil) Röhren- oder Zylinderförmig	2 Edelstahl-Tanks mit Hohlraum zur Reduzierung des Wärmetransports	Porenspeicher ⁴³ Kavernenspeicher ⁴³	Tanks Containerähnliche Bauweise
Einsatz	Bei Bedarf kleinerer Volumina	Bei Bedarf höherer Volumina	Ausgleich saisonaler Schwankungen ⁴³	Stationär ⁴³ dezentral ⁴³ mobile Wasserstoffspeicherung ⁴³
Verluste	Geringe Verluste bei Komprimierung	Abdampfverluste ⁴³ Variieren nach Tankgröße von 0,1-3 % ⁴³	Höher bei Porenspeicher durch erhöhte Kontaktfläche zw. Gas- und Gestein	
Kosten	Mittel ⁴³	Hoch ⁴³	Kleine Speicher, hohe Kosten ⁴³ Nehmen mit zunehmender Größe ab ⁴³	günstiges Trägeröl
Sonstiges	Spezieller Materialaufwand	Hoher Energieaufwand ⁴³	Geologische Gegebenheiten müssen vorliegen Belastung für umliegende Gewässer ⁴³	Einsatz fossiler Energieträger Abwärme bei Dehydrierung wird genutzt Dibenzyltoluol wirkt gesundheitsgefährdend ⁴⁴

⁴³ Elisabeth Paukert (2019)⁴⁴ Stolzenburg

A.5.7. Auswahl Hersteller von alkalischen (AEL) und Proton-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyseuren

Tabelle A.5.7-1: Auswahl Hersteller von alkalischen (AEL) und Proton-Austausch-Membran (PEM) Elektrolyseuren

Firma	Hauptsitz	AEL / PEM
Cummins Inc.	USA	AEL / PEM
Elogen	Frankreich	PEM
Green Hydrogen Systems	Dänemark	AEL
HIAT	Deutschland	PEM
H-TEC SYSTEMS GmbH	Augsburg	PEM
iGas energy	Deutschland	PEM
ITM Power	UK	PEM
John Cockerill	Belgien	AEL
McPhy	Frankreich	AEL
Nel ASA	Norwegen	AEL / PEM
Plug Power	USA	PEM
Siemens Energy AG	Deutschland	PEM
Sunfire GmbH	Deutschland	AEL
Thyssenkrupp AG	Deutschland	AEL

A.5.8. Auswahl Hersteller von H₂-Tankstellen

Tabelle A.5.8-1: Auswahl Hersteller von H₂-Tankstellen

Firma	Sitz	Besonderheit
Air Liquide Advanced Technologies GmbH	Deutschland	H ₂ -Lieferant, Betrieb möglich
Air Products GmbH	Deutschland	H ₂ -Lieferant gasförmig / flüssig, Betrieb möglich
CODEX-Engineering GmbH	Deutschland	
Covalion / Framatome GmbH	Deutschland	
Everfuel A/S	Dänemark	Eigener Verdichter, H ₂ -Lieferant gasförmig, Betrieb möglich
Hydrogentile GmbH	Deutschland	
JA-Gastechnology GmbH	Deutschland	
Karl Steiger GmbH	Deutschland	
Linde GmbH	Deutschland	Eigener Verdichter, Elektrolyse zusammen mit ITM Power H ₂ -Lieferant gasförmig / flüssig, Betrieb möglich
Maximator GmbH	Deutschland	Eigener Verdichter
McPhy Energy Deutschland GmbH	Deutschland	Eigene Elektrolyse
Noordtec GmbH & Co. KG	Deutschland	
PitPoint.DE GmbH	Deutschland	
Resato International B.V	Niederlande	Eigener Verdichter
Schwelm Anlagentechnik GmbH	Deutschland	
sera GmbH	Deutschland	Eigener Verdichter
Wystrach GmbH	Deutschland	Mobile H ₂ -Tankstelle

A.5.9. Speichertypen Wasserstofftanks

Hochdruckgasflaschen Typ I

- Stahlflaschen

Hochdruckgasflaschen Typ II

- Stahlflaschen, Mantelseite mit Fasern (CFK/GFK) umwickelt

Hochdruckgasflaschen Typ III

- Metallliner, Mantelseite und Stirnseiten mit Fasern (CFK/GFK) umwickelt

Hochdruckgasflaschen Typ IV

- Kunststoffliner, Mantelseite und Stirnseiten mit Fasern (CFK/GFK) umwickelt

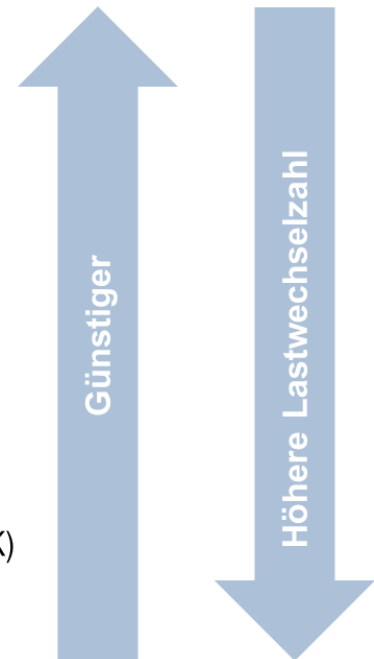


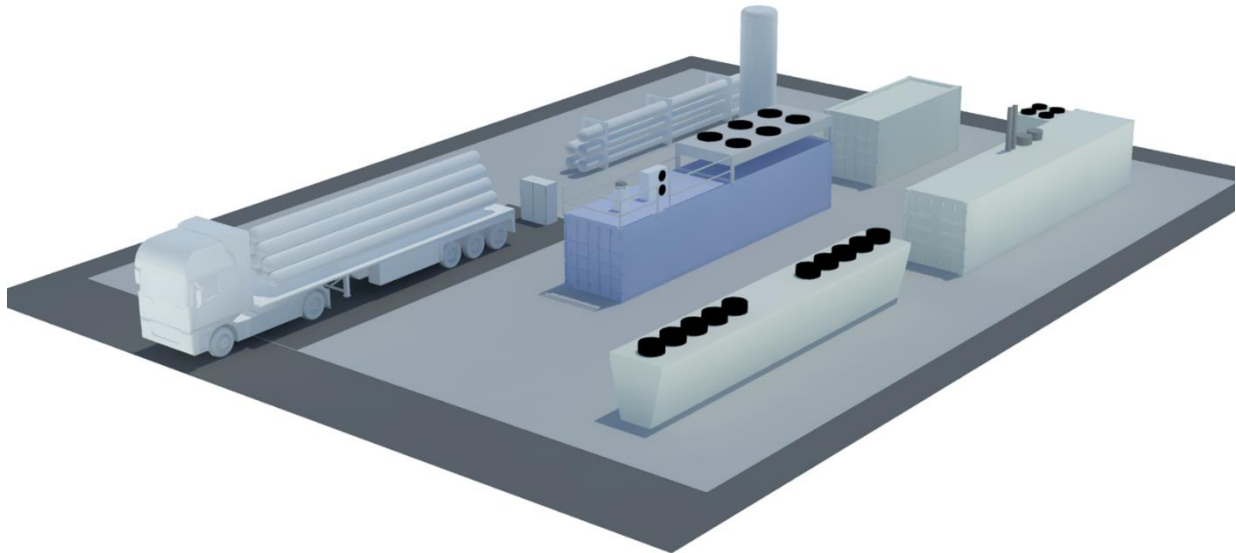
Abbildung A.5.9-1: Speichertypen Wasserstofftanks

A.5.10. Aufstellungspläne H₂-Tankstellen

Tabelle A.5.10-1: Aufstellungspläne H₂-Tankstellen

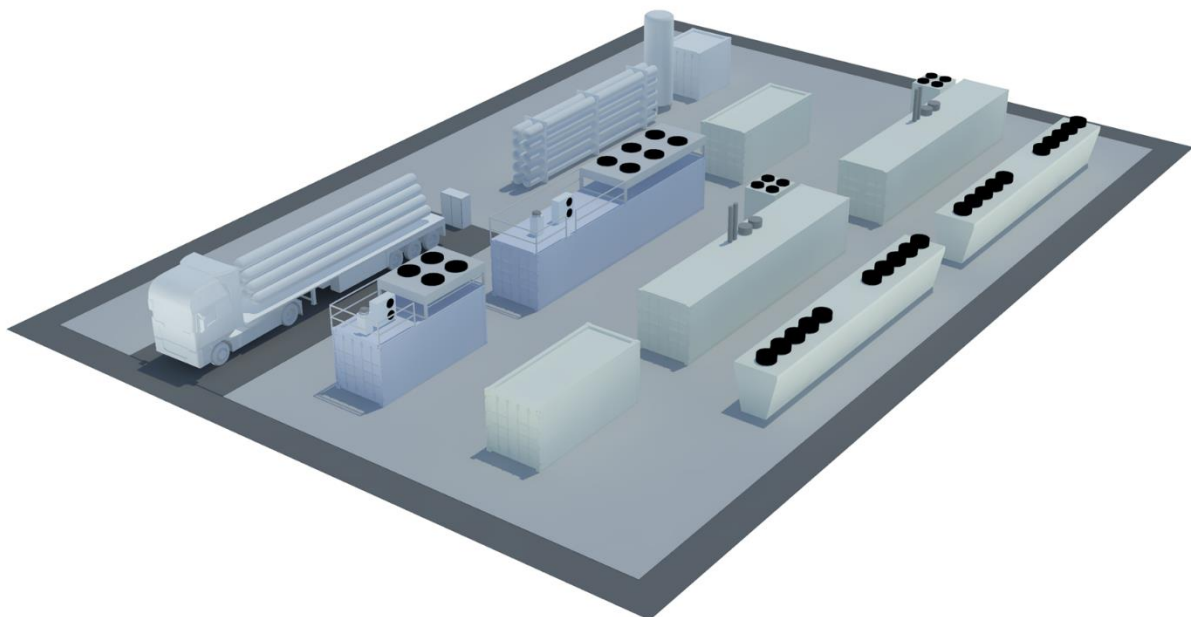
Größe S

Flächenbedarf 900 m²



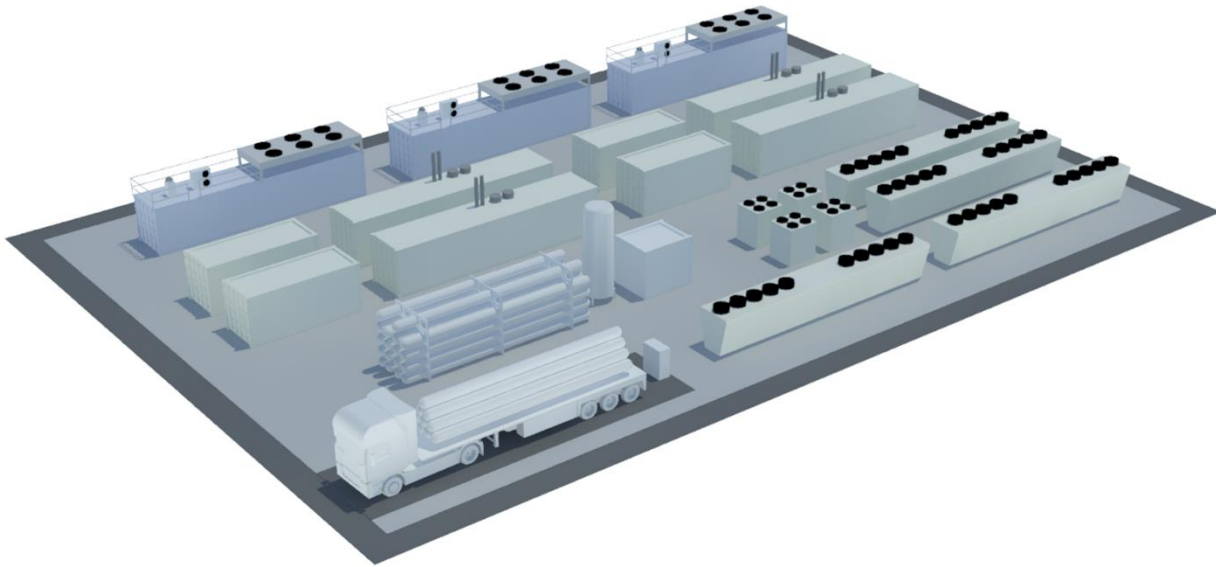
Größe M

Flächenbedarf 1.200 m²



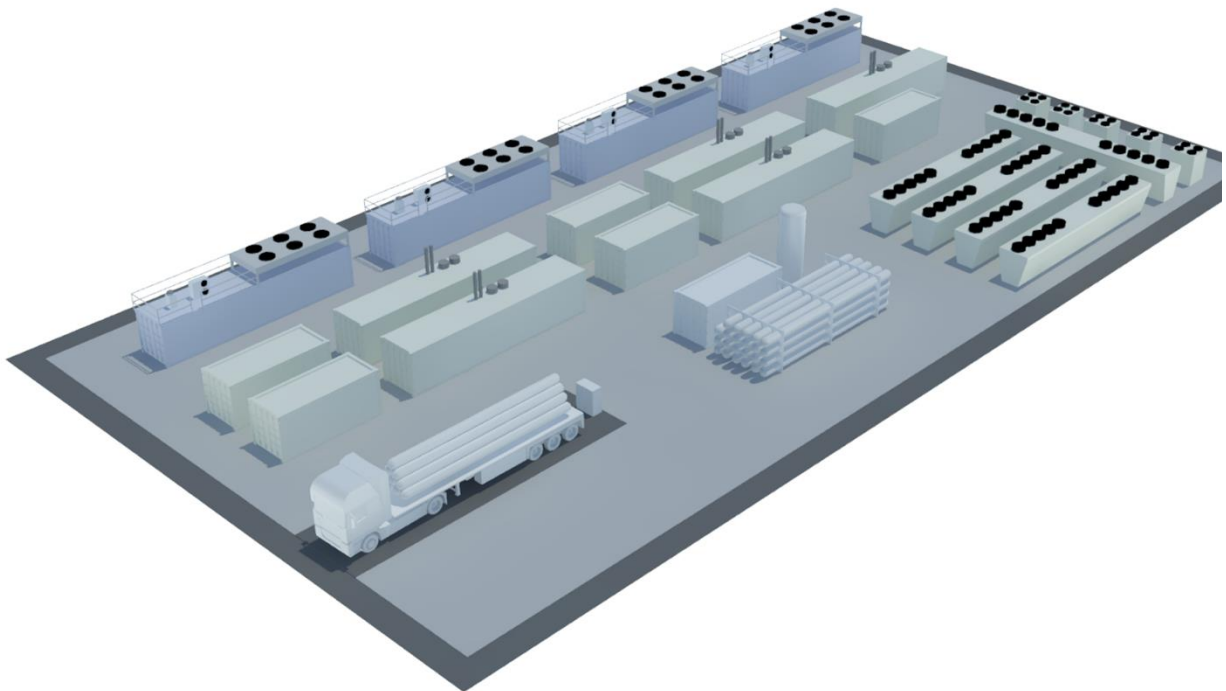
Größe L

Flächenbedarf 1.700 m²



Größe XL

Flächenbedarf 2.200 m²



A.5.11.Daten Wirtschaftlichkeit

Tabelle A.5.11-1: Investitionskosten Auslegungsvarianten in T€

	S_a	S_b	S_c	M_a	M_b	L_a	L_b	XL_a	XL_b
Fälle ⁴⁵	ELY Teil- last	ELY Voll- last	H ₂ -An- liefe- rung	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last
Windpark und PV-Anlage	12.425	12.425	0	27.775	27.775	40.101	40.101	52.426	52.426
Elektrolyseanlage	2.515	2.515	0	7.062	4.869	10.968	9.095	14.231	10.968
Tankstellenanlage	4.250	4.263	3.748	6.875	6.507	9.980	8.436	14.256	11.327
Summe	19.190	19.202	3.748	41.712	39.151	61.048	57.632	80.913	74.720

für weitere Informationen siehe auch Tabelle 3.2-8

Tabelle A.5.11-2: Betriebskosten Auslegungsvarianten in T€/a

	S_a	S_b	S_c	M_a	M_b	L_a	L_b	XL_a	XL_b
Fälle	ELY Teil- last	ELY Voll- last	H ₂ -An- liefe- rung	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last
Windpark und PV-Anlage*	246,2	246,2	0	711,5	711,5	984,9	984,9	1.258,2	1.258,2
Elektrolyse- & Tankstellenanlage*	287,9	288,6	187,4	485,0	422,7	718,3	603,7	997,4	785,7
Wasserstoffbezug	0	0	861,8	0	0	0	0	0	0
Wasser + Strom	469,2	482,4	34,0	1.617,9	1.528,4	2.701,4	2.624,3	3.808,8	3.698,1
Summe	1.003,3	1.017,2	1.083,1	2.814,5	2.662,6	4.404,6	4.212,8	6.064,3	5.742,0

* Wartung, Instandhaltung, Betriebsführung, Versicherungen, Analysen etc.

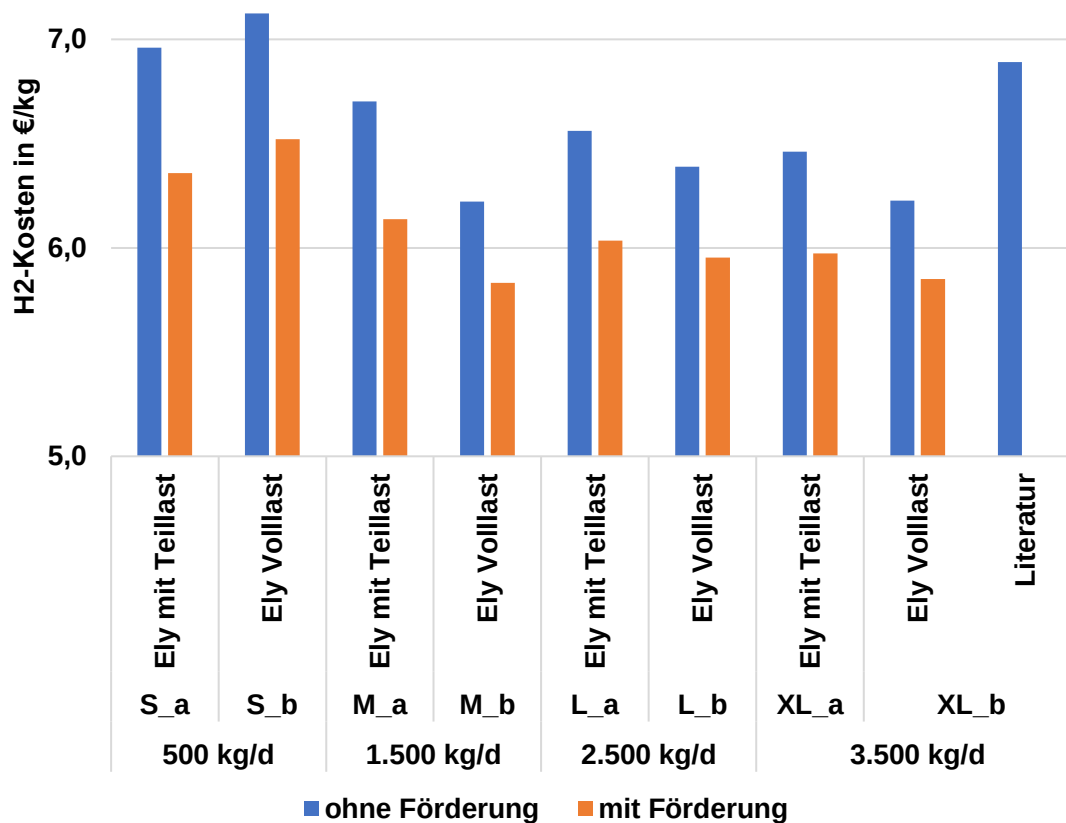
Tabelle A.5.11-3: Stromerzeugungs- und bedarfsmengen der Auslegungsvarianten in MWh/a

	S_a	S_b	S_c	M_a	M_b	L_a	L_b	XL_a	XL_b
Fälle	ELY Teil- last	ELY Voll- last	H ₂ -An- liefe- rung	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last	ELY Teil- last	ELY Voll- last
Erzeugung Wind & PV	20.606	20.606	0	56.974	56.974	82.424	82.424	107.872	107.872
Nutzung für Eigenbedarf	6.199	5.836	0	18.184	17.221	30.270	28.502	42.227	39.611
Netzeinspeisung	14.407	14.770	0	38.790	39.753	52.154	53.922	65.645	68.261
Netzbezug	2.207	2.277	169	7.732	7.490	12.919	12.750	18.235	18.110

⁴⁵ ELY = Elektrolyse, Teillast = Betrieb ELY in Minimalleist während EE-Schwachlastzeiten und höhere Last in EE-Hochlastzeiten, Vollast = Betrieb ELY durchgängig in hoher Last

Tabelle A.5.11-4: Wasserstoffbetankungsmengen in kg/a

	S_a	S_b	S_c	M_a	M_b	L_a	L_b	XL_a	XL_b
Fälle	ELY Teillast	ELY Vollast	H ₂ -An- liefe- rung	ELY Teillast	ELY Vollast	ELY Teillast	ELY Vollast	ELY Teillast	ELY Vollast
Montag – Freitag	130.000	130.000	130.000	390.000	390.000	650.000	650.000	910.000	910.000
Samstag	7.500	7.500	7.500	22.300	22.300	37.200	37.200	52.000	52.000
Sonntag	1.500	1.500	1.500	4.400	4.400	7.400	7.400	10.300	10.300
Summe	139.000	139.000	139.000	416.700	416.700	694.600	694.600	972.300	972.300

Abbildung A.5.11-1: H₂-Kosten aus Elektrolyse mit Strombezug aus Wind/PV/Netz im Vergleich zu Literaturangaben⁴⁶

⁴⁶ Auswertung von Daten aus Studien: Shell (2017), Irena (2019), Bloomberg (2020), Deloitte (2020), Hydrogen Council (2021), Kompetenzregion Wasserstoff Düssel.Rhein.Wupper (2020), HyDrive OWL (2021), NRW Roadmap (2020), Prognos (2020)

A.6. Anhang H₂-Nutzung – Methodik und Rahmenbedingungen

A.6.1. Ergebnisse der Bestandsanalyse der Fahrzeuge

Der Straßenverkehr in Hessen hat 2017 ca. 13,8 Mio. t CO₂-Emissionen verursacht (TtW), das sind 38 % aller CO₂-Emissionen in Hessen. Der Fahrzeugbestand in Osthessen entspricht etwa 15 % des Fahrzeugbestandes in Gesamthessen. Die Bestandsanalyse wurde mit den Daten des Kraftfahrtbundesamts (KBA) erstellt (siehe Tabelle A.6.1-1).

Tabelle A.6.1-1: Bestandszahlen aller Straßenverkehrsfahrzeuge in Osthessen; getrennt nach Gewichtsklassen und den spezifischen CO₂-Emissionen in t CO₂ pro Jahr

	N1	N2			N3					Summe
	unter 3,50 t	3,5 bis 5 t	5 bis 7,5 t	7,5 bis 12 t	12 bis 20 t	mehr als 20 t	SZM	Busse	Pkw	
Kreis Fulda	7.528	138	642	201	259	685	620	292	141.795	152.160
Kreis Hersfeld-Rotenburg	3.720	57	253	92	120	855	545	61	78.646	84.349
Main-Kinzig-Kreis	12.847	222	1.161	440	357	695	926	304	258.169	275.121
Vogelsberg-kreis	3.518	51	308	106	126	211	204	128	71.662	76.314
Summe	27.613	468	2.364	839	862	2.446	2.295	785	550.272	587.944
t CO₂ / Jahr	276.130	9.360	47.280	19.599	61.492	186.623	240.474	60.830	1.001.495	1.903.283
Anteil Fahrzeugklasse	15 %	0,5 %	2,5 %	1,0 %	3,2 %	9,8 %	12,6 %	3,2 %	53 %	100 %

Im Rahmen der Bestandsanalyse wurde auch die Verteilung der Logistikunternehmen in Osthessen analysiert. Eine schematische Darstellung der Verteilung findet sich in Abbildung A.6.1-1. Unternehmen mit mehr als 1.000 Fahrzeugen je Standort sind besonders gekennzeichnet. Da unbekannt ist, ob die Fahrzeuge an dem Standort nur gemeldet sind oder tatsächlich dort fahren, wurde der Grenzwert 1.000 für N3-Fahrzeuge angenommen.

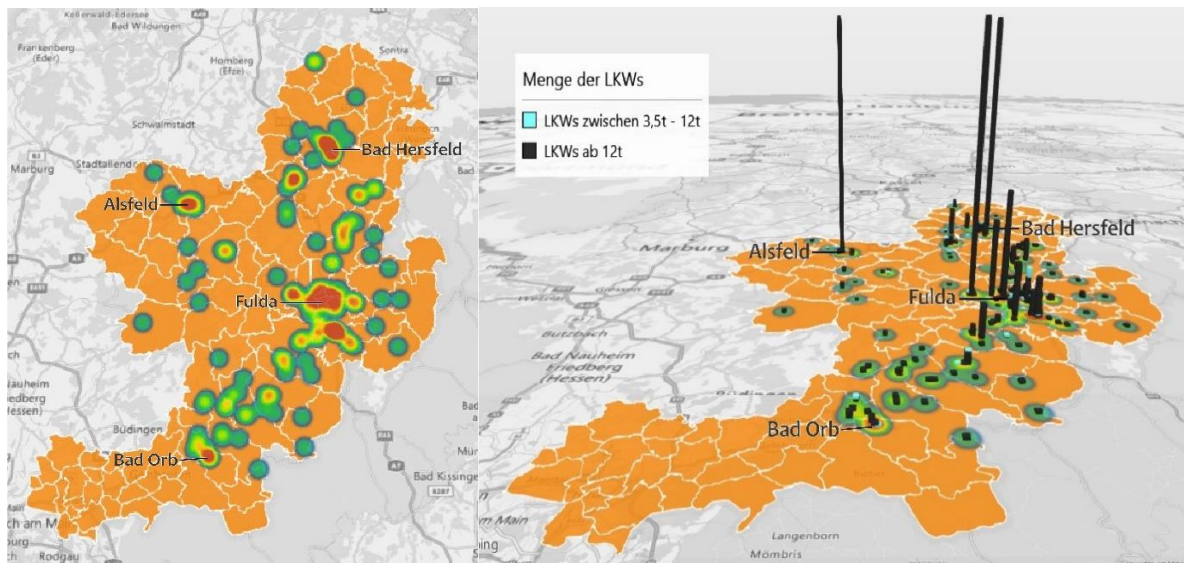


Abbildung A.6.1-1: Verteilung der Logistikunternehmen mit Fahrzeugen in Klasse N2 und N3 nach Anzahl der Fahrzeuge in der jeweiligen Klasse

A.6.2. Methodik und Datengrundlage zur Ermittlung der THG-Emissionen

In Abbildung A.6.2-1 ist der typische Lebenszyklus eines Nutzfahrzeugs dargestellt.

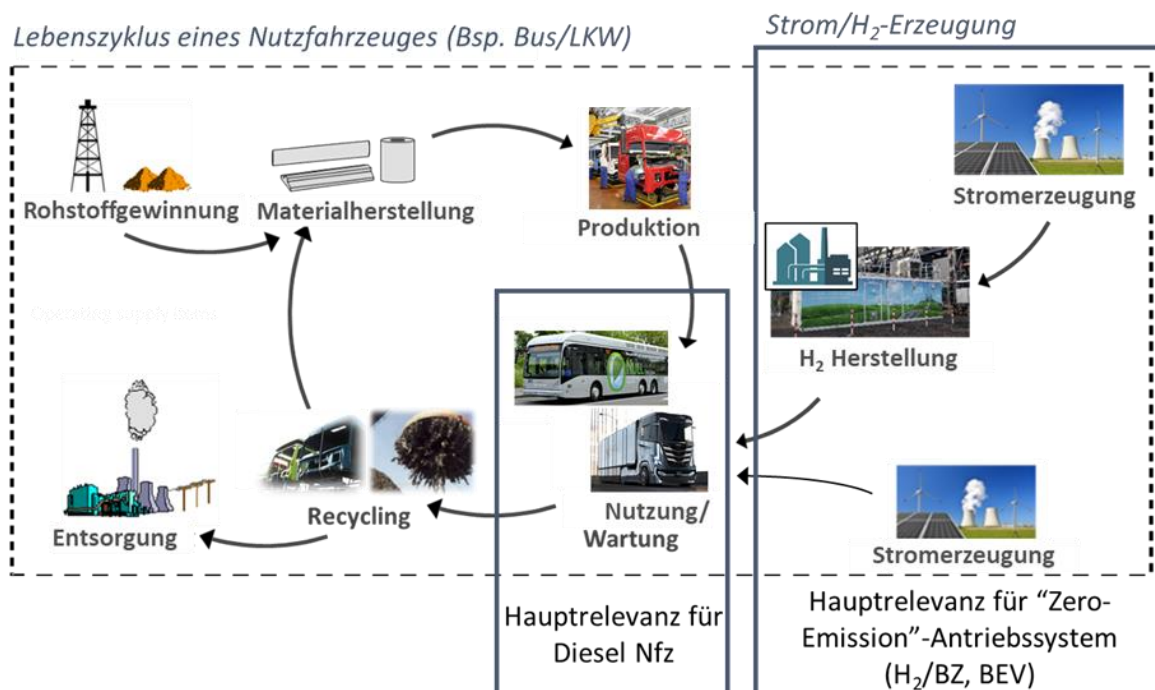


Abbildung A.6.2-1: Lebenszyklus eines Nutzfahrzeugs inkl. Rohstoffgewinnung, Materialherstellung, Produktion, Nutzung, Verwertung und Herstellung der Energieträger

Emissionsfaktoren und Verbrauchswerte

Die verwendeten Emissionsfaktoren stammen aus der GaBi Ökobilanzdatenbank (Sphera Solutions GmbH, 2021). Diese stellt auch eine Datengrundlage für die Product Environmental Footprint (PEF) Datenbank der Europäischen Kommission dar. Für die durch die Verbrennung des Dieselmotors entstehenden THG-Emissionen (TtW) wird der CO₂-Äq.-Faktor für B7-Diesel⁴⁷ aus der DIN EN 16258 verwendet (Deutsches Institut für Normung e.V., 2013).

Die Verbrauchsdaten der Dieselfahrzeuge wurden dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA) entnommen (INFRAS AG, 2021). Das HBEFA stellt u. a. für verschiedene Fahrzeugklassen deutschlandspezifische Verbrauchs- und Emissionsdaten für die Verkehrssituationen innerorts, außerorts, Autobahn sowie einen gewichteten Durchschnitt dieser drei Situationen zur Verfügung.

Die H₂-Verbrauchsdaten für die BZ-Fahrzeuge wurden von EMCEL zur Verfügung gestellt und finden sich in Tabelle A.6.2-1. Für Busse wurde nur der Durchschnitt „innerorts“ berücksichtigt, für SZM wurde die Gewichtung der drei Verkehrssituationen aus der GaBi Ökobilanzdatenbank übernommen. Für alle weiteren Fahrzeugklassen wurde der Gesamtdurchschnitt verwendet (siehe Tabelle A.6.2-1).

Tabelle A.6.2-1: Verbrauchsdaten der verschiedenen Fahrzeugklassen. Quelle: Expertise EMCEL GmbH aus Kommunikation mit Betreibern und Herstellern

Fahrzeugklasse		Abgasklasse	Ø Geschwindigkeit (HBEFA)	Verbrauch Diesel [l/100 km]	Verbrauch H ₂ [kg/100 km]
Pkw		Euro-6c	53,7	7,6	0,9
LNF	LNF	Euro-6ab	57,6	10,6	1,3
	Sonstige	Euro-6ab	57,6	10,6	1,3
SNF	Lkw I ⁴⁸	Euro-VI	56,1	16,5	2,5
	Lkw II ⁴⁹	Euro-VI	55,6	34,3	8,0
	SZM	Euro-VI	67,2	32,3	8,0
Busse		Euro-VI	20,3	46,7	9,0

Wasserstoffbereitstellung

Bei der Ermittlung der ökologischen Einsparpotenziale wird die H₂-Erzeugung entsprechend den Untersuchungsergebnissen des Teilprojekts H₂-Erzeugung modelliert. Der Wasserstoff für die BZ-Fahrzeuge wird ausschließlich über Elektrolyse von Wasser gewonnen. Der benötigte Strom

⁴⁷ B7-Diesel ist ein Dieselmotors, dem maximal 7 Volumenprozent Biodiesel zum konventionellen Diesel beigemischt wurden.

⁴⁸ Die Kategorie LKW I umfasst alle Lastkraftwagen mit einem Gewicht bis zu 12 t.

⁴⁹ Die Kategorie LKW II umfasst alle Lastkraftwagen mit einem Gewicht größer 12 t.

wird dabei aus verschiedenen erneuerbaren Quellen gewonnen, genauer aus einem Mix aus Windenergie und Photovoltaik. Da die regionale Stromerzeugung aus diesen beiden Quellen voraussichtlich nicht ausreicht, den Strombedarf der Elektrolyse zu decken, wird zusätzlich grüner Netzstrom verwendet. Die spezifische Zusammensetzung des Strommixes für die Elektrolyse sowie für die Komprimierung an der Tankstelle sind Tabelle A.6.2-2 zu entnehmen. Der mittlere Transportweg vom Elektrolyseur zur Tankstelle wird mit 15 km angenommen und mit Diesel-Lkw und 200-bar-Trailern durchgeführt. Der Transport per Diesel-Lkw stellt dabei den „worst case“ dar und ist vor allem in der Anfangsphase der Fall. Bei entsprechender Fahrzeugverfügbarkeit ist auch der Transport durch BZ-Lkw möglich.

Tabelle A.6.2-2: Zusammensetzung des Strommixes für die Wasserstoffbereitstellung

	Elektrolyse	Komprimierung & Betankung
DE EE Mix	26 %	35 %
Windenergie	56 %	49 %
Photovoltaik-Energie	19 %	16 %

Abbildung A.6.2-2 vergleicht die verschiedenen Herstellungsrouten von Wasserstoff miteinander. Neben der eigentlichen Produktion sind auch der Transport über 15 km per 200-bar-Transport-trailer, die Komprimierung, die Herstellung des Trailers und die Strom- und Elektrolyseinfrastruktur, die Lagerung an der Tankstelle und die Betankung selbst beinhaltet. Bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse entfallen 11 % der THG-Emissionen auf das Koppelprodukt Wasserstoff.⁵⁰ Die Dampfreformierung aus Erdgas stellt derzeit die mengenmäßig bedeutendste und am häufigsten verwendete Herstellungsrouten dar, sie verursacht pro Kilogramm Wasserstoff jedoch auch die höchsten THG-Emissionen. Der im Rahmen dieser Studie verwendete HYWHEELS-Strommix kann gegenüber der Dampfreformierung 86 % der THG-Emissionen einsparen (bei einem Transport mit BZ-Lkw statt Diesel-Lkw: 87 %).

⁵⁰ Aufteilung der Treibhausgasemissionen auf die drei Koppelprodukte der Chlor-Alkali-Elektrolyse (Chlor, Natronlauge und Wasserstoff) nach CertifHy (Altmann, M. 2020) (11 % Wasserstoff, 89 % Chlor und Natronlauge).

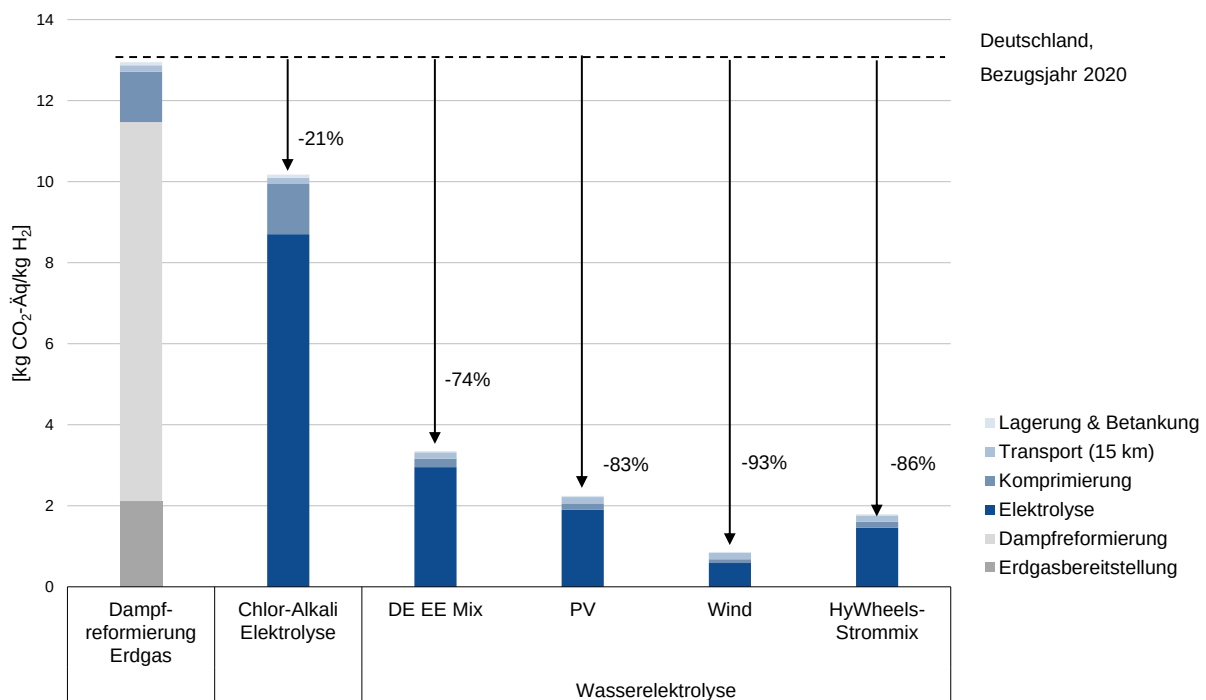


Abbildung A.6.2-2: THG-Emissionen der Wasserstoffbereitstellung in Deutschland, verschiedene Herstellungsrouten, Basisjahr 2020

Zusammensetzung der Nutzungsphaseemissionen pro km am Bsp. SZM

Um ein besseres Verständnis der Zusammensetzung der THG-Emissionen zu vermitteln, werden zunächst die THG-Betriebsemissionen („Well-to-Wheel“: direkte Emissionen plus Kraftstoffbereitstellung) eines Dieselfahrzeugs mit denen eines BZ-Fahrzeugs am Beispiel einer SZM verglichen.

Die THG-Emissionen einer Diesel-SZM bestehen zum Großteil aus den Emissionen der Dieselverbrennung (siehe Abbildung A.6.2-3). Verbrennung und Bereitstellung des Dieseldiesels verursachen insgesamt 97 kg CO₂-Äq. pro 100 gefahrene Kilometer. Die THG-Betriebsemissionen der BZ-SZM bestehen lediglich aus den Emissionen der Wasserstoffbereitstellung, direkte THG-Emissionen während des Betriebs entfallen. Dadurch kann die BZ-SZM 85 % (82 kg/100 km) der THG-Betriebsemissionen einsparen, wenn der Wasserstoff mit dem spezifischen Strommix gemäß dieser Studie hergestellt wird. Wird er mit reiner Windenergie hergestellt, liegt die Einsparung von THG bei 93 %.

Die Herstellung von BZ-Fahrzeugen ist vor allem aufgrund der Herstellung der Hochvoltbatterien sowie der H₂-Tanks aus kohlenstoffverstärktem Kunststoff generell THG-intensiver als die Herstellung eines entsprechenden Dieselfahrzeugs. Bei der BZ-SZM sind die THG-Emissionen der Herstellung um 30 % höher als die der Diesel-SZM. Dieser Nachteil wird sehr schnell durch die weitaus geringeren Emissionen in der Nutzungsphase der BZ-SZM ausgeglichen.

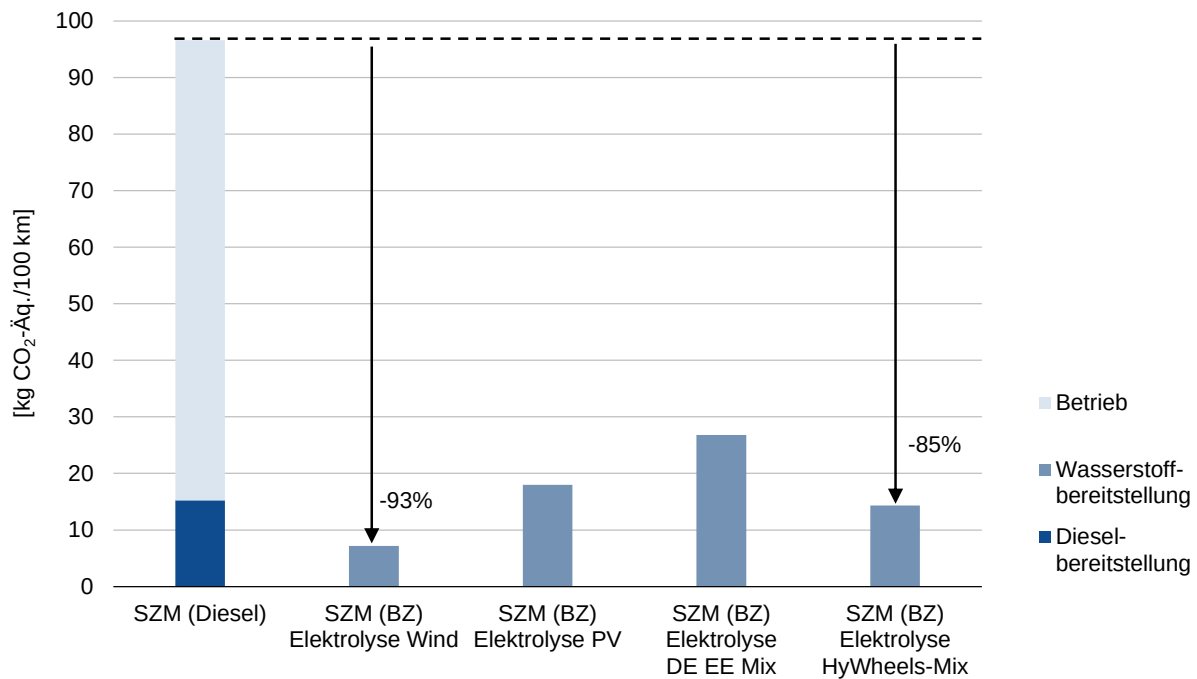


Abbildung A.6.2-3: THG-Emissionen einer SZM je 100 km (exkl. Fahrzeugherstellung und EoL), Basisjahr 2020

Treibhausgasemissionen und lokale Stichoxidemissionen der Hochlaufphase im Projekt HYWHEELS

Für die Ermittlung des THG Einsparpotenzials wird der oben beschriebene Lebenszyklusansatz verwendet. Fahren bis zum Jahr 2026 1.000 BZ-SZM und ersetzen entsprechend 1.000 Diesel-SZM, so können 2026 79 kt CO₂-Äq. eingespart werden. In Abbildung A.6.6-4 sind die jährlichen THG-Einsparungen von 2023 bis 2027 gemäß dem angenommenen Flottenhochlauf (Tabelle 4.1-3) abgebildet. Unter der Annahme, dass 10 % der gefahrenen Kilometer der Langstrecken-SZM auf die Region Osthessen entfallen, können im Jahr 2026 2,8 t NO_x vermieden werden (siehe Abbildung A.6.2-5).

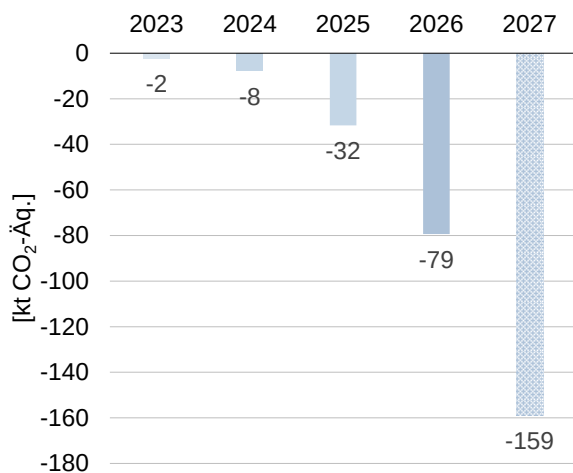


Abbildung A.6.2-4: Jährliche THG-Einsparungen der Brennstoffzellen-SZM-Flotte

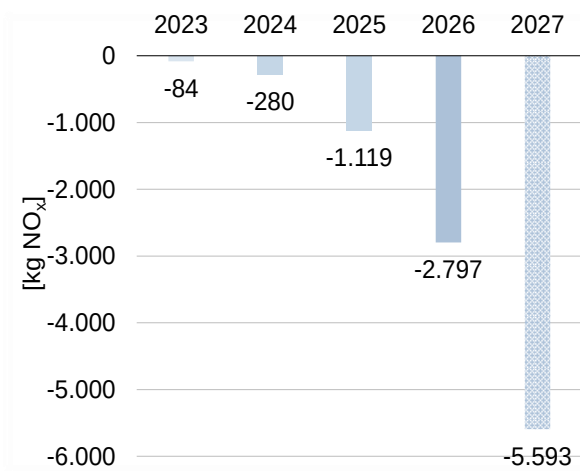


Abbildung A.6.2-5: Jährliche Stickoxid-Einsparungen der BZ-SZM-Flotte in der Region Osthessen (Annahme: 10 % der jährlichen SZM-Fahrleistung entfallen auf die Region Osthessen)

Tabelle A.6.2-3 zeigt die Anzahl der BZ-Fahrzeuge in den Bezugsjahren 2030 und 2050 sowie die jährlichen Laufleistungen und die angenommene beispielhafte Verteilung der Jahreslaufleistung auf die Region Osthessen.

Tabelle A.6.2-3: Anzahl BZ-Fahrzeuge in der Region Osthessen in den Jahren 2030 und 2050, jährliche Laufleistung je Fahrzeugklasse und Abschätzung des Anteils der Jahresfahrleistung je Fahrzeugtyp in der Region Osthessen

Fahrzeugklasse		Anzahl Fahrzeuge 2030	Anzahl Fahrzeuge 2050	Jährliche Laufleistung [km]	Anteil Jahresfahrleistung In der Region Osthessen
Pkw		5.600	139.540	13.913	60 %
LNF	LNF	1.006	7.045	19.573	80 %
	Sonstige	136	94 8	9.348	80 %
SNF	Lkw I	242	1.572	18.176	80 %
	Lkw II	222	1.110	41.375	80 %
	SZM	154	770	98.392	10 %
Busse		91	464	57.276	100 %

A.6.3. Ähnliche Projekte mit Schwerpunkt BZ-Lkw

Tabelle A.6.3-1: Beschaffungsinitiativen von BZ-Lkw

Name der Beschaffungsinitiative	Region	Beschreibung	Weiterführende Information
HyTrucks – Hafen Rotterdam, Air Liquide	Rotterdam, Antwerpen, Rheinbinnenhäfen	Beschaffung von BZ-Lkw Aufbau H ₂ -Tankstellennetz Blaupause für EU-Häfen	https://www.waterstofnet.eu/en/projects-1/vehicles/hytrucks
Hyundai, H2 Energy	Schweiz	Erprobung und Beschaffung von BZ-Lkw	https://hyundai-hm.com/
Hyzon Motors, Hiringa	Neuseeland	Beschaffung von BZ-Lkw; Aufbau H ₂ -Tankstellennetz	https://www.hiringa.co.nz/post/hyzon-motors-and-hiringa-energy-advance-partnership-to-decarbonize-heavy-road-transport-in-nz

Tabelle A.6.3-2: HyLand-Projekte mit ähnlichem Schwerpunkt

HyLand-Projekt	Region	Beschreibung	Weiterführende Information
HyExpert „Future mobility“	Nordöstliches Niedersachsen	Konzepterstellung zum Thema Lastverkehr mit grünem Wasserstoff	https://www.h2non.de/#h2lastverkehr
HyExpert „H2BrakeCO2“	Brake/Wesermarsch	Konzepterstellung zum Thema Hafenlogistik mit Wasserstoff	https://www.h2brakeco2.de/
HyPerformer „HyWays for Future“	Nordwestdeutschland	Beschaffung von BZ-Pkw, -Bussen, -ASF, -SNF	https://www.hyways-for-future.de/

A.6.4. Marktanalyse von BZ-Fahrzeugen

Tabelle A.6.4-1: Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Pkw

Hersteller	Modellname	Fahrzeugklasse	Reichweite [km]	Preis [€]
Toyota	Mirai	Limousine	500	Ab 78.600
Toyota	Mirai 2	Limousine	650	Ab 63.900
Hyundai	Nexo	SUV	750	Ab 79.000
Daimler ⁵¹	GLC F-Cell	SUV	480	Mietmodell
Honda	Clarity 2016	Limousine	650	Bisher nur in Japan und Kalifornien

Tabelle A.6.4-2: Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-FFZ

Hersteller	Modell	Fahrzeugklasse
Linde	P30C	Schlepper
Linde	E30 FC	Gabelstapler
Linde	E35 FC	Gabelstapler
Still	R60	Gabelstapler
Still	R60-25iL	Gegengewichtsstapler
Still	FMX20	Schubmaststapler
Toyota	8FBMT25	Gabelstapler
Toyota	BT Reflex	Schubmaststapler
Toyota	BT Optio	Kommissionierer
Toyota	Traigo 80	Gabelstapler
Toyota	BT Levio LPE	Niederhubwagen
Toyota	TSE	Schlepper
Toyota	RRE	Schubmaststapler
Toyota	Traigo 48	Gabelstapler
Toyota	Traigo 80	Gabelstapler
DanTruck	3000 Power Hydrogen	Gabelstapler
Plugpower	1510-48CE-A	(BZ-Modul)
Plugpower	1600-80CE-A	(BZ-Modul)
Plugpower	1700-48CE	(BZ-Modul)

⁵¹ Wird teilweise bereits nicht mehr angeboten.

Tabelle A.6.4-3: Verfügbare Modelle von BZ-Lkw (von Herstellern und Umrüstern)

Hersteller	Modell	Typ	zGG [t]	Reichweite* [km]	Status	In Serie ab**
Esoro	FCT1	Motorwagen	34	400	Prototyp	Nur Testbetrieb
Hyundai	H2 Xcient	Motorwagen	36	400	Serie	2021
Hyundai	_-***	Sattelzugmaschine	40	1000	Prototyp	2024
Hyzon Motors	_-***	Sattelzugmaschine	bis 58 (Neuseeland)	680	Serie	2021 ⁵²
MAN	_-***	_-***	_-***	800	Prototyp	2025-2030
Mercedes Trucks	GenH2	Sattelzugmaschine	40	1000	Prototyp	2027-2030
Nikola	Tre	Sattelzugmaschine	bis 40	800	Prototyp	2024-2025
Scania	_-***	_-***	27	450	Prototyp	2025-2030
Toyota	_-***	Sattelzugmaschine	40	480	Prototyp	Nicht für europ. Markt
VDL	_-***	Motorwagen	27	400	Prototyp	2023-2025
VDL	_-***	Sattelzugmaschine	40	450 oder 650	Prototyp	2023-2025
Umrüster						
Clean Logistics	DAF, Daimler	Motorwagen, Sattelzugmaschine	18 bis 40	Bis 500	Prototyp	2022-2023
Framo	_-***	Sattelzugmaschine	26	_-***	Prototyp	_-***
e-Trofit	_-***	Motorwagen, Sattelzugmaschine	7,5 bis 40	Bis 500	Prototyp	2023-2025
Paul Nutzfahrzeuge	_-***	Motorwagen	12 bis 18	_-***	Prototyp	2023
Paul Nutzfahrzeuge	_-***	Motorwagen, Sattelzugmaschine	> 18	_-***	Prototyp	_-***
Quantron	Iveco Strator	Sattelzugmaschine	44	700	Prototyp	Mitte 2022

* Reichweite nach Herstellerangabe

** voraussichtlicher Startzeitraum der Serienproduktion für den deutschen Markt

*** fehlende Information

⁵² Serie in Neuseeland; für Deutschland wurde bislang keine Zahl bekannt gegeben. Erste Fahrzeuge wurden im August 2021 in Europa ausgeliefert.

Tabelle A.6.4-4: Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Bussen

Hersteller	Typ	Gesamt (Sitzplatz/ Stehplatz)	Reichweite [km]	Bestellbar ab
Caetano Bus	12 m Solobus	ca. 85	400	sofort
Daimler/Evobus	12 m Solobus	ca. 84	350	sofort
Daimler/Evobus	18 m Gelenkbus	ca. 126	270	sofort
Irizar/Ferrostaal	-	-	-	2022
Iveco	-	-	-	2024
Safra/Businova	12 m Solobus	ca. 95 (25/70)	350	sofort
Skoda	18 m Gelenkbus	-	-	2022/23
Solaris	12 m Solobus	ca. 98 (37/61)	390	sofort
Solaris	18 m Gelenkbus	ca. 120	-	Ende 2022
Van Hool	12 m Solobus	ca. 74 (31/43)	350	sofort

Tabelle A.6.4-5: Hersteller und verfügbare Modelle von BZ-Kommunalfahrzeugen

Verwendungszweck	Chassis-Hersteller	Umrüster	Modell	Bestellbar ab
Abfallsammelfahrzeuge	Mercedes Trucks	Faun Kirchhoff Group	Bluepower	sofort
Kehrfahrzeug	Mercedes Trucks	Faun Kirchhoff Group	Bluepower	sofort
Abfallsammelfahrzeuge	DAF Trucks	E-Trucks Europe	Hydrogenmüllwagen	sofort
Grünflächenpflegefahrzeug, Feuerwehrwesen	Iveco	Quantron AG	Q-Light / IVECO Daily	-
Abfallsammelfahrzeuge	DAF Trucks, Mercedes Trucks	Geesinknorba Group	GPM IV Serie, N Serie, MF Serie, GPM Mini	sofort
Kehrmaschine	Green Machines International	-	GM 500H2	sofort

A.6.5. Aktuelle Förderlandschaft

Tabelle A.6.5-1: Förderungen auf Bundesebene

Ebene	Bezeichnung	Fördergegenstand	Förderung	Beantragungsfrist	Fördergeber	Anmerkung
Bund	Elektromobilität: Umweltbonus, Innovationsprämie	Pkw mit elektrischem Antrieb (BEV, PHEV, FCEV)	bis zu 9000 € für BEV, FCEV bis zu 6000 € für PHEV	Ende 2025	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle	Mit NIP2 kombinierbar
Bund	Förderrichtlinie Nutzfahrzeuge	Nutzfahrzeuge (N1-N3) mit klimafreundlichem Antrieb + Infrastruktur	80 % der Investitionsmehrkosten für Fahrzeuge und Infrastruktur	Ende 2024	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	
Bund	Förderrichtlinie Busse	Busse im Personenverkehr mit alternativem Antrieb + Infrastruktur	80 % Investitionsmehrkosten von Fahrzeugen, 40 % der Investitionsmehrkosten von Infrastruktur	noch nicht bekannt	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	In Notifizierung, Bekanntmachung in Q2 2021
Bund	Förderrichtlinie zur Marktaktivierung im Rahmen des NIP2	ASF und Kehrfahrzeuge + Infrastruktur	Bis zu 40 % der Investitionsmehrkosten, für KMU zusätzlich 20 %	-	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Derzeit abgelaufen
Bund	Förderrichtlinie zur Marktaktivierung im Rahmen des NIP2	FFZ	Bis zu 40 % der Investitionsmehrkosten	-	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	Derzeit abgelaufen

Tabelle A.6.5-2: Förderungen auf Landesebene

Ebene	Bezeichnung	Fördergegenstand	Förderung	Beantragungsfrist	Fördergeber	Anmerkung
Land Hessen	Umweltfreundlicher öffentlicher Personennahverkehr	E-Busse, Ladeinfrastruktur BZ-Busse, Infrastruktur	40 % der Investitionsmehrkosten	Keine Angabe (Einreichung jederzeit möglich)	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen	
Land Hessen	Elektromobilität	Forschungs- und Entwicklungsprojekte, Pilot- und Demonstrationsprojekte	bis zu 50 % der zuwendungsfähigen Ausgaben (Hochschulen bis zu 100 %)	Keine Angabe (Einreichung jederzeit möglich)	Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen	

A.6.6. Ermittlung und Entwicklung der Investitionskosten eines BZ-Lkw

Die Investitionskosten der BZ-Lkw machen einen wesentlichen Teil der Gesamtkosten aus. Grundsätzlich gibt es heute drei Möglichkeiten, die CAPEX eines BZ-Lkw zu ermitteln.

1. Studien / Literaturoauswertung
2. Ankündigungen durch Lkw-Erstausrüster/Original Equipment Manufacturer (OEM)
3. „Bottom-Up“-Berechnung durch die Summierung der Kosten der einzelnen Komponenten

Die am häufigsten vorkommenden Lkw-Typen sind Pritschenfahrzeuge und Sattelschlepper. Im Folgenden werden entweder Pritschenfahrzeuge ohne Aufbau oder reine SZM ohne Auflieger untereinander verglichen. Diese Vereinfachung wird vorgenommen, da sich der Aufbau von Pritschenfahrzeugen / Auflieger von SZM stark unterscheiden können. Ein einfacher Aufbau, z.B. mit Planen, ist preislich nicht mit einem z.B. isolierten, gekühlten und mit Hebebühne ausgerüsteten Aufbau vergleichbar. Das reine Fahrzeug unterscheidet sich weniger und ist daher für den Vergleich besser geeignet.

Studien / Literaturoauswertung

In der Literatur existiert eine hohe Bandbreite für die CAPEX von BZ-Lkw (rund 150-550 k€, siehe Abbildung A.6.6-1). Dies basiert auf der Tatsache, dass viele Studien reine Schätzungen sind. Bislang sind außer dem Hyundai XCient nur BZ-Lkw von Hyzon verfügbar. Da der Hyundai XCient im Pay-Per-Use-Modell angeboten wird, sind keine CAPEX bekannt. Zudem ist in der Literatur häufig nicht angegeben, ob die angegebenen Werte die Kosten oder der Preis des BZ-Lkw sind. Dies kann je nach Entwicklungsphase und Konkurrenz einen großen Unterschied ausmachen.

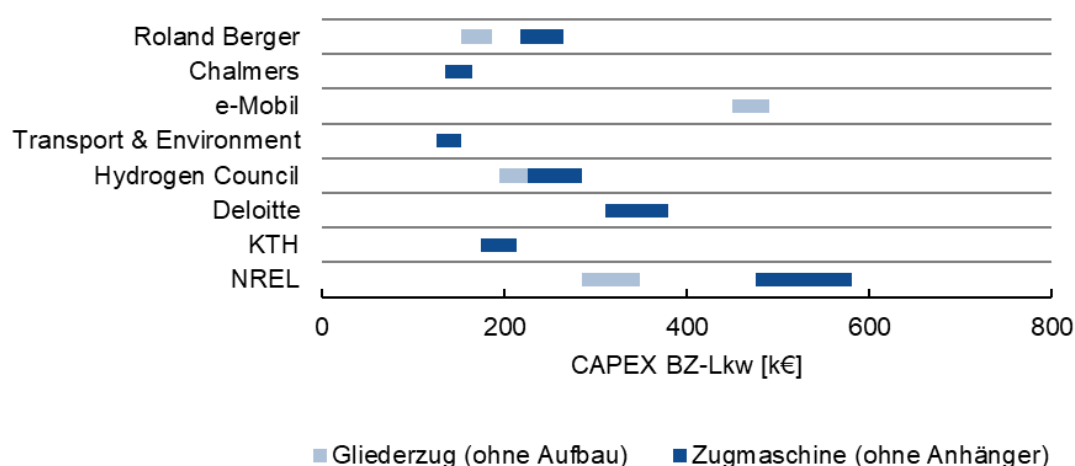


Abbildung A.6.6-1: CAPEX-Angaben aus verschiedenen Literaturquellen (Danebergs, 2019; Hunter et al., 2020; Hydorgen Council; Karlstöm et al.; MacCharles et al., 2020; Ruf et al., 2020; thinkstep AG & prognos AG; Unterlohner, 2020), zusammengestellt durch H2 Energy AG

Ankündigungen durch Lkw OEM

Bislang wurden nur wenige Preise für BZ-Lkw von Erstausrüstern kommuniziert. Abbildung A.6.6-2 zeigt die CAPEX für BZ-Lkw einzelner OEM. In der Schweiz ist ein wirtschaftlicher Betrieb (Gesamtkostenparität) ohne Subventionen und ohne leistungsbedingte Schwerverkehrsabgabe (LSVA) für BZ-Lkw mit CAPEX von rund 250 bis 500 k€ möglich. Hierbei bleibt zu berücksichtigen, dass die Dieselskosten in der Schweiz im Gegensatz zu Deutschland wesentlich höher (rund 50%) liegen und ein Teil der externen Kosten der Diesel-Lkw durch die LSVA internalisiert wird. Diese müssen zum heutigen Zeitpunkt elektrifizierte Fahrzeuge nicht bezahlen.

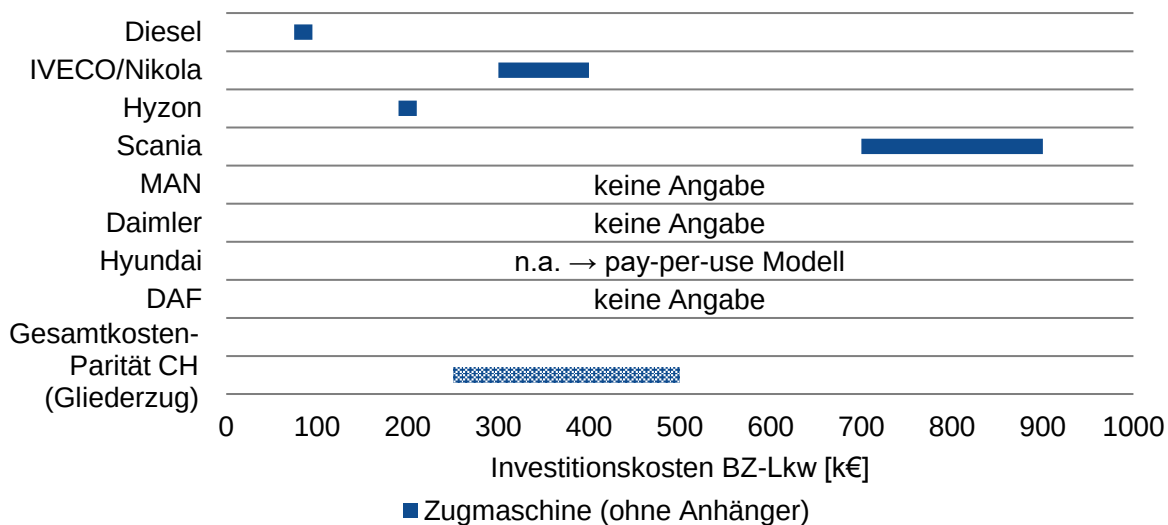


Abbildung A.6.6-2: CAPEX-Angaben verschiedener OEM (Hyzonmotors, 2021) und Abschätzung der Gesamtkostenparität CH. Quelle: H2 Energy AG

Bottom-Up-Berechnung

H2 Energy hat eine Aufteilung derjenigen Parameter vorgenommen, welche in die CAPEX eines BZ-Lkw einfließen und die Kosten abgeschätzt (siehe Abbildung A.6.6-3). Teilweise sind die Parameter von den Stückzahlen der produzierten Lkw abhängig. Nach der Bottom-Up-Betrachtung bewegt sich der Preis für eine SZM zwischen 350 und 650 k€. Hierbei ist die Marge, die den Unterschied zwischen den effektiven Kosten und dem Preis des BZ-Lkw ausmacht, mit großer Unsicherheit behaftet und von OEM zu OEM unterschiedlich. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei Diesel-Lkw aufgrund der erhöhten Konkurrenz die Margen heute vermutlich tiefer liegen als bei BZ-Lkw.

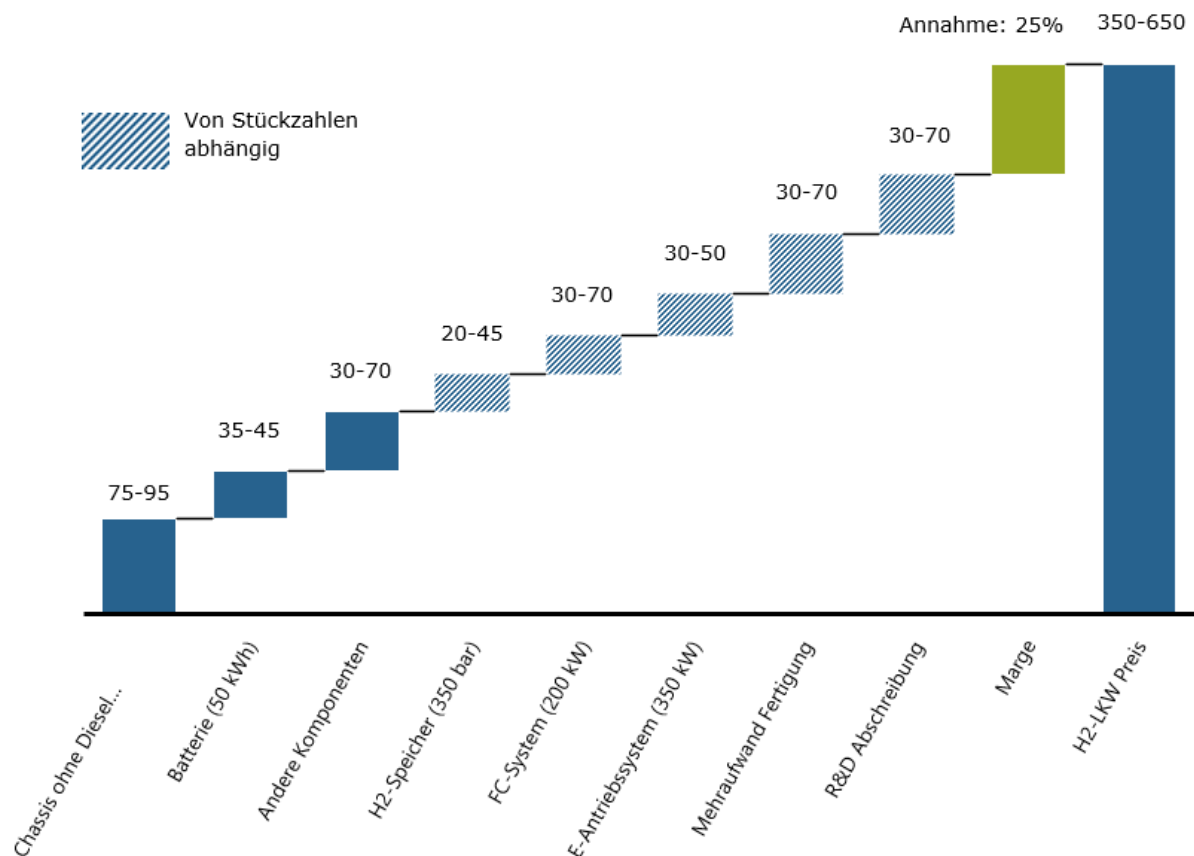


Abbildung A.6.6-3: Bottom-Up-Berechnung der BZ-Lkw CAPEX einer SZM ohne Auflieger in k€. Quelle: H2 Energy AG

Entwicklung der BZ-CAPEX

Aktuell (August 2021) gibt es mit Hyundai und Hyzon Motors zwei Hersteller, die BZ-Lkw in Europa anbieten. Es wird erwartet, dass ca. 2023/2024 weitere OEM serienreife BZ-Lkw auf den Markt bringen werden und dadurch die CAPEX von BZ-Lkw sinken werden.

Die H2 Energy hat eine Abschätzung erstellt, wie sich die CAPEX eines BZ-Sattelschleppers mit steigenden Stückzahlen voraussichtlich verändern werden (siehe Abbildung A.6.6-4). Es wird geschätzt, dass mit der Massenproduktion die BZ-Lkw-Preise im Vergleich zu den ersten Modellen um ca. ein Drittel abnehmen werden. Sollten sich die Margen wegen neuer Mitbewerber verkleinern, können Reduktionen (Preise in Massenfertigung vs. Startphase) von bis zu ca. 50 % realisiert werden.

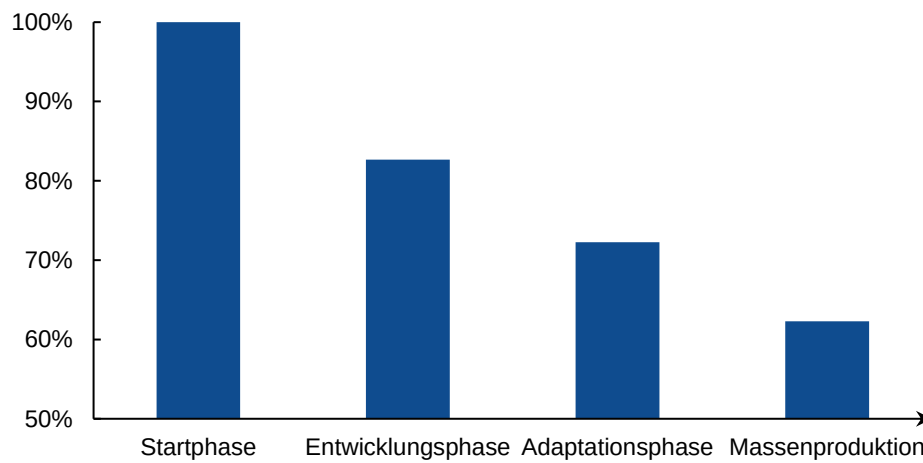


Abbildung A.6.6-4: Entwicklung der BZ-Lkw-CAPEX einer SZM ohne Anhänger in Abhängigkeit von den Absatzmengen. Quelle: H2 Energy AG

A.6.7. Rahmenbedingungen für die Gesamtkostenberechnung

Als BZ-Fahrzeug für die Gesamtkostenberechnung wird der Hyundai Xcient als Referenzfahrzeug herangezogen. Das Modell wird aktuell bereits serienmäßig für den europäischen Markt produziert und bereits erfolgreich eingesetzt (Stand Q1 2021). Die wichtigsten Fakten sind in Tabelle A.6.7-1 zusammengefasst.⁵³

Tabelle A.6.7-1: Eckdaten Hyundai Xcient 4x2. Quelle: (Hyundai Hydrogen Mobility AG)

Parameter	Hyundai XCient
Fahrzeugtyp	Pritschenfahrzeug
Antriebssystem	4x2
Zulässiges Gesamtgewicht	36 t 19 t ohne Anhänger
Nutzlast	9,2 t (Motorwagen)
Motorenleistung	350 kW
Brennstoffzelle	190 kW
Max. Geschwindigkeit⁵⁴	85 km/h
H₂-Tank	32 kg
Druckniveau Tank	350 bar
Reichweite	400 km

Grundsätzlich ist es schwierig, zwei exakt gleiche Lkw, aber mit unterschiedlichem Antrieb (Diesel und Wasserstoff) ausgestattet, zu finden. Daher muss man sich für gewisse Parameter entscheiden, die definieren, ob die beiden Fahrzeuge „gleich“ sind oder nicht. Für den Gesamtkostenvergleich wurden die folgenden Parameter berücksichtigt:

- › Zulässiges Gesamtgewicht: 36 t
- › Fahrzeugtyp: Pritschenfahrzeug mit Anhänger
- › Reichweite: mind. 400 km mit einer Tankfüllung⁵⁵

⁵³ Weitere Informationen sind unter hyundai-hm.com zu finden.

⁵⁴ In Deutschland beträgt die zugelassene Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen 80 km/h.

⁵⁵ Die meisten vergleichbaren Dieselfahrzeuge haben heute eine größere Reichweite. Diese größere Reichweite wurde nicht weiter speziell gewertet, vielmehr wurde angenommen, dass die Reichweiten in etwa gleich sind.