

Machbarkeitsstudie: Wasserstoff-Elektrolyseanlage mit Tankstelle für PKW und LKW

Projekt-Nr.: 2010-075
Antragsnummer LE4-24917
Auftraggeber: Frioheat GmbH
Betriebsnummer: 7761165778



frioheat[®]
wärme aus kälte

Frioheat GmbH
Zur Schultenwiese 4,
58285 Gevelsberg
Geschäftsführer: Herr Kuls

Fachplanungsbüro H₂ Systeme
BEN- Tec GmbH
Im Ossenpohl 96
48432 Rheine

Projektingenieur: Dipl. Ing. (FH) Gerd Sommerweiß
Lindau den, 26.10.2021



INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	1
1. EINLEITUNG	1
1.1. MOTIVATION	1
1.2. WIESO WASSERSTOFF	2
1.3. WOZU WIRD WASSERSTOFF BENÖTIGT?	3
1.4. EIGENSCHAFTEN WASSERSTOFF.....	3
1.5. WASSERSTOFF IN DER MOBILITÄT	5
1.6. VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN FARBEN DES WASSERSTOFFES	6
1.7. SICHERHEIT.....	6
2. VALIDIERUNG MÖGLICHER FÖRDERTÖPFE UND -AUFSTELLUNG	8
3. SIMULATION H₂-BEDARF ANHAND DER BUSANZAHL, PKW- UND LKW ENTWICKLUNG.....	11
3.8. ERMITTELN MÖGLICHER H ₂ ABSATZMENGEN	11
3.9. VERLAUF DER H ₂ ABSATZMENGEN	12
3.9.1. Simulation H2 Bedarf realistisch.....	13
3.9.2. Simulation H2 Bedarf optimistisch	13
3.9.3. Simulation H2 Bedarf pessimistisch.....	14
4. RECHERCHE HINSICHTLICH WEITERER H₂ ABNEHMER IM RAUM LINDAU	15
5. UNTERSUCHUNG DER NUTZUNG DES PRODUZIERTEN SAUERSTOFFS IN DER KLÄRANLAGE LINDAU.....	17
6. ZEICHNERISCHE DARSTELLUNG MODULARE ERWEITERUNG UND WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG BEI VERDOPPELUNG UND VERDREIFACHUNG DER ANLAGENKAPAZITÄT.....	18
7. KONZEPTERSTELLUNG UND VORHABENSBSCHREIBUNG	19
7.1. GROBE AUFSTELLUNGSZEICHNUNG UND ERMITTLUNG DES FLÄCHENBEDARFS.....	19
7.1.1. Elektrolyseur	19
7.1.2. Kompressor.....	20
7.1.3. Speicher.....	21
7.2. BESCHREIBUNG BAUVORHABEN ALLGEMEIN UND TECHNISCH	21
7.3. VERBALE BESCHREIBUNG DES VORHABENS HINSICHTLICH INNOVATION FÜR DIE STADT LINDAU IM LANDKREIS LINDAU, KLIMASCHUTZ- UND UMWELTASPEKTE, MINDERUNGSPOTENTIAL DER CO₂, ETC.	22
7.4. BESTIMMUNG DER REGENERATIVEN ENERGIEQUELLEN.....	24
7.5. ERMITTLUNG GEEIGNETER AUFSTELLUNGSFLÄCHEN UND FLÄCHENANFORDERUNGEN	28
8. KOSTENKALKULATION, WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG.....	30
8.1. ZUSAMMENSTELLUNG INVESTITIONSKOSTEN	30
8.2. ZUSAMMENSTELLUNG JÄHRLICHE KAPITALKOSTEN	32
8.3. ZUSAMMENSTELLUNG JÄHRLICHER WIRTSCHAFTLICHKEIT	33
8.4. WIRTSCHAFTLICHER VERLAUF BEI REALISTISCHEM VERLAUF	35

8.4.1.	Prognostizierter Umsatz	35
8.4.2.	Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten.....	36
8.4.3.	Entwicklung des Betrieb Ergebnisses.....	39
8.5.	WIRTSCHAFTLICHER VERLAUF BEI OPTIMISTISCHEM VERLAUF.....	40
8.5.1.	Prognostizierter Umsatz	40
8.5.2.	Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten.....	42
8.5.3.	Entwicklung des Betrieb Ergebnisses.....	42
8.6.	WIRTSCHAFTLICHER VERLAUF BEI PESSIMISTISCHEM VERLAUF.....	43
8.6.1.	Prognostizierter Umsatz	43
8.6.2.	Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten.....	45
8.6.3.	Entwicklung des Betrieb Ergebnisses.....	46
9.	HANDLUNGSEMPFEHLUNG	48
10.	LITERATURVERZEICHNIS.....	50
11.	ANHANG.....	1

1. Einleitung

Der Klimaschutz gewinnt in der deutschen Wirtschaft einen immer höheren Stellenwert, denn Deutschland will seinen Anteil leisten, damit das globale Ziel des Pariser Abkommens erreicht wird. Hierfür hat Deutschland sich als Mittelfristziel das Senken der Treibhausgasemissionen in Deutschland bis 2030 um mindestens 55 Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 gesetzt.

Studien beschäftigen sich mit der Fragestellung, ob ein klimaneutrales Energiesystem aus heutiger Sicht überhaupt ohne Wasserstoff denkbar ist. Diese Annahme führt zu einer immer weiterwachsenden Entwicklung im Bereich Wasserstoff, welche durch die Politik mit der Wasserstoffstrategie und anderen Förderungen vorangetrieben wird. Klimapolitische Entscheidungen werden zu Gunsten von Wasserstoff entschieden.

Der Verkehrssektor ist mit rund 20 Prozent CO₂-Ausstoß (2019) der drittgrößte Verursacher von Treibhausgasemissionen. Um das Klimaziel zu erreichen, müssen die Emissionen im Verkehr bis 2030 um die Hälfte sinken. Der Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität steht derzeit noch am Anfang der Entwicklung. Der größte Teil der bereits bestehenden Tankstellen wurde durch Bundes- oder EU-Förderung bezuschusst, um das „Henne-Ei-Problem“ zwischen Kraftstoffbereitstellung und Wasserstoffbedarf der Fahrzeuge zu lösen.

Die Entwicklung der letzten Jahre zeigt auf, dass ein Anstieg der Kraftfahrzeuge und des dazugehörigen Energiebedarfs auch in Zukunft weiter zu beobachten sein wird. Zudem nahmen die gefahrenen Personenkilometer bis 2017 um etwa 64 Prozent zu. Auch im Güterverkehr ist eine klare Tendenz zur Steigerung zu beobachten mit 74 Prozent. Dies zeigt eine dringende Notwendigkeit für alternative Antriebe.

1.1. Motivation

In der Mobilität entstehen hauptsächlich Verkehrsemissionen im Straßenverkehr (94 Prozent), wo dem Benzin- und Diesel-Pkw etwa 59 Prozent zuzuschreiben sind. Zwei Prozent der angemeldeten PKW fahren mit alternativen Antrieben, dieser Anteil muss sich erhöhen. Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) zählen zu den alternativen Antrieben und könnten eine mögliche Lösung zur Reduktion von CO₂, Lärm und Schadstoffen sein. Allerdings stehen Sie vor der Problematik einer noch nicht funktionierenden Infrastruktur, deswegen müssen Unternehmen wie Frioheat GmbH sich für den Ausbau von Wasserstofftankstellen engagieren.

Ziel der Machbarkeitsstudie ist zu untersuchen, inwiefern eine Wasserstofftankstelle am Standort **Lindau** wirtschaftlich ist.

1.2. Wieso Wasserstoff

Das Thema Wasserstoff ist in aller Munde. Diskutiert im Bundestag oder auf der Vorstandssitzung eines großen Energieversorgers, scheint das Thema sehr präsent zu sein.

"Wasserstoff ist der Rockstar unter den erneuerbaren Energien"



Frans Timmermans
EU-Klimakommissar

Weltweit werden Strategien zur Wasserstoffnutzung erarbeitet. Dabei ist die Wasserstofftechnologie keine neue Technik, schon 1965 wurde Wasserstoff im Rahmen der Gemini Projekte eingesetzt. 1966 gab es den ersten wasserstoffbetriebenen Personenwagen. Sicherlich hat sich die Technik die letzten 50 Jahre weiterentwickelt. Wo erste Wasserstoffsysteme auf Basis von alkalischen Technologien eingesetzt wurden, werden heute neuartige Membranverfahren eingesetzt, wie zum Beispiel die PEM Technologien, die gerade in den letzten Jahren einen großen Sprung gemacht haben.

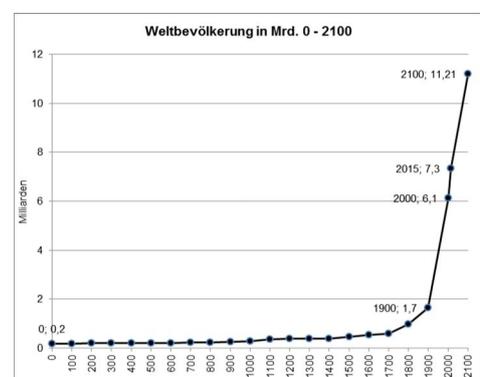
Aber wieso ist Wasserstoff jetzt ein so großes Thema, das weltweit die Politiker sowie die Wirtschaft beschäftigt und selbst im Schatten der Corona Krise Berücksichtigung findet. Wieso wird es als das Hypethema gesehen?

Die Antwort liegt im rasanten Anstieg der Weltbevölkerung und dem immensen Anstieg des Welt Energiebedarf, mit dem viele unserer heutigen Probleme zusammenhängen. Gab es 2000 6,1 Milliarden Menschen auf diesen Planeten so werden es 2100 nach aktuellen Statistiken 11,21 Milliarden Menschen sein. Dieses entspricht fast einer Verdoppelung in gerade einmal 100 Jahren.

Daraus kann man sehr einfach ableiten, dass wir mit unseren Ressourcen, wozu auch der Energiesektor gehört, effizienter umgehen und regenerative Energien ausbauen müssen.

"Das Wasser ist die Kohle der Zukunft. Die Energie von morgen ist Wasser, das durch elektrischen Strom zerlegt worden ist. Die so zerlegten Elemente des Wassers, Wasserstoff und Sauerstoff, werden auf unabsehbare Zeit hinaus die Energieversorgung der Erde sichern."

Jules Verne, 1874



1.3. Wozu wird Wasserstoff benötigt?

Der Jahresenergiebedarf der Weltbevölkerung liegt derzeit bei $1,4 \times 10^{14}$ kWh/a. Zugleich stellt uns die Sonne $1,5 \times 10^{18}$ kWh/a an Energie zur Verfügung.

Das bedeutet innerhalb von 3h Stunden liefert uns die Sonne genug Energie, um den Weltenergiebedarf für ein Jahr zu decken. Anders dargestellt könnte man mit einer 700km^2 PV Anlage in der Sahara den Energiebedarf der Welt decken. Daher stellt man schnell fest, dass wir die regenerativen Energien weiter ausbauen müssen.

Welche Rolle spielt Wasserstoff dabei? Ist Wasserstoff eine regenerative Energiequelle?

Es kann Energie speichern, wenn es sein muss, monatelang. Auch deswegen wird Wasserstoff derzeit hoch gehandelt - als Speicher für den schwankenden Strom aus Solarzellen oder Windrädern. Man kann ihn wunderbar zwischenlagern,

Nein, Wasserstoff ist eine Speichertechnologie, um große Energien lange zu speichern und über große Entfernungen zu transportieren.



Ein weiterer Ausbau der regenerativen Energien gelingt nur, wenn wir die Energie speichern und transportieren können und hier setzt die Wasserstofftechnologie an.

1.4. Eigenschaften Wasserstoff

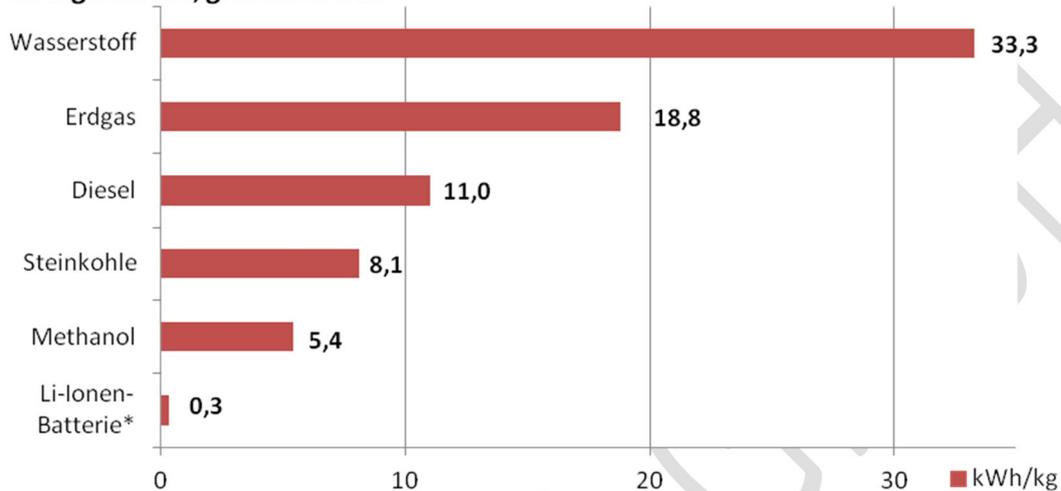
Wasserstoff, mit der chemischen Formel H_2 , ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas. In geringen Mengen ist es ungiftig. Unter Normbedingungen beträgt die Dichte nur $0,0899$ g/L, etwa ein 13-tel der Dichte von Luft. Bei Umgebungsdruck ($101,3$ kPa) betragen die Schmelztemperatur $-259,1^\circ\text{C}$ und die Siedetemperatur $-252,7^\circ\text{C}$. Das Gas trägt nicht zum Treibhauseffekt bei.

Wasserstoff kommt, außer in den höchsten Atmosphärenschichten, auf der Erde nicht elementar vor. Zur Erzeugung und späteren Nutzung von Wasserstoff muss Energie aufgewendet werden. Bei dem Prozess werden zum Beispiel Alkohole, Wasser oder Methan in Bestandteile zerlegt und Wasserstoffgas erzeugt. Die Nutzung erfolgt dann durch Verbrennung. Die Verbrennung kann sowohl „heiß“, was der klassischen Verbrennung mit Flamme entspricht, als auch „kalt“ als elektrochemische Reaktion erfolgen.

Das Wasser kann innerhalb eines Kreislaufs verwendet und nach Zu- und Abgabe von Energie theoretisch unendlich oft wiederverwendet werden.

Wasserstoff hat die höchste Energiedichte auf die Masse bezogen (Abbildung 1), jedoch eine geringe volumenbezogene Energiedichte (Abbildung 2). So enthält ein Kilogramm Wasserstoff so viel Energie wie 3,3 Liter Diesel.

Energiedichte, gravimetrisch



* Die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien ist abhängig von der Leistungsdichte

Abbildung 1: Gravimetrische Energiedichte ausgewählter Energieträger

Energiedichte, volumetrisch

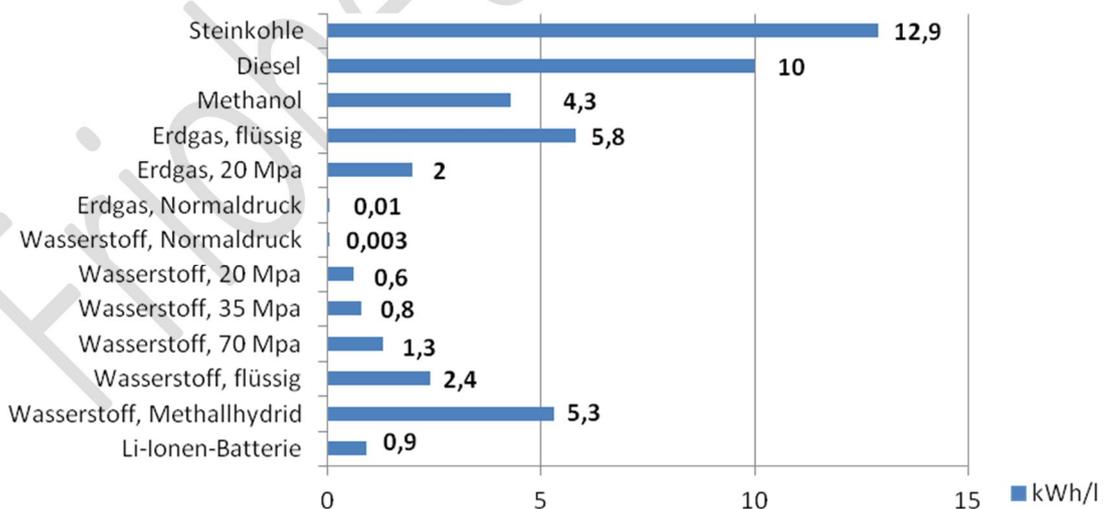


Abbildung 2: Volumetrische Energiedichte ausgewählter Energieträger

Die geringe volumetrische Dichte des Wasserstoffs erfordert hohe Drucke für die Speicherung.

Wegen der geringen Masse und Größe der Wasserstoffmoleküle, bewegen sich diese im Gas sehr schnell. Deshalb besitzen die Moleküle ein hohes Diffusionsvermögen, welches besondere Anforderungen an die Speicherung stellt.

Die hohe Energiedichte, die rückstandsfreie Verbrennung und die flexible Nutzung als Gas sind die wesentlichen Vorteile von Wasserstoff, gegenüber anderen Energieträgern.

1.5. Wasserstoff in der Mobilität

Die transportable Speichermöglichkeit von Energie in Form von gasförmigem Wasserstoff ist besonders interessant für die Mobilität. Es werden lokal und wenn der Wasserstoff zusätzlich auch „grün“ hergestellt wird, praktisch keine Emissionen freigesetzt.

In der Mobilität steht man vor den limitierten Faktoren des Platzbedarfes, sowie des Maximalgewichts. So steht man vor der großen Aufgabe der Speicherung von Wasserstoff. Dies kann über Druck- und Flüssigwasserstoff geschehen, wobei der Druckwasserstoff sich als technisch einfachste Lösung bewehrte. Deshalb werden in den Fahrzeugen Drucktanks aus kohlenstoff-faserverstärktem Kunststoff verbaut, wo der Wasserstoff bei 350 oder 700 bar gespeichert wird. Durch die Komprimierung erzielt man eine Erhöhung der volumetrischen Energiedichte, obwohl dieser am Ende drucklos der Brennstoffzelle zugeführt wird.

Batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEV) aber auch Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) gehören zu den reinen Elektrofahrzeugen. FCEV fahren mit Strom, den sie über eine Brennstoffzelle aus Wasserstoff beziehen. Vorteile gegenüber batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen bestehen vor allem in kurzen Tankzeiten und einer höheren Reichweite. Die Reichweite ist vergleichbar mit der von PKW mit Verbrennungsmotoren. Die Faustformel lautet auf 100 km benötigt man 1 kg Wasserstoff, wobei die neuen Autos bereits unter 1 kg verbrauchen. Im Tank befinden sich etwa 5-7 kg. Entsprechend ergeben sich Einsatzpotenziale von FCEV bei Einsatzzwecken mit geringen Standzeiten und häufigen Fernfahrten. Die sich ergänzenden Technologien ermöglichen die Substitution von konventionellen Verbrennern ohne Komforteinschränkungen.

1.6. Vergleich der unterschiedlichen Farben des Wasserstoffes

Wie oben bereits erwähnt handelt es sich bei Wasserstoff um ein farbloses Gas, dennoch spricht man von grünen, blauen, grauen oder türkisen Wasserstoff. Grund hierfür ist die Unterscheidung je nach seinem Produktionspfad, somit geben die Farben in der Bezeichnung Auskunft über die Art der Erzeugung.

Es handelt sich um „grauen“ Wasserstoff, wenn konventionelle Erzeugungsmethoden verwendet werden, die unter dem Einsatz von fossilen Einsatzstoffen ablaufen. Als Nebenprodukt entsteht ebenfalls Kohlendioxid.

„Blauer“ Wasserstoff entsteht ebenfalls auf Basis fossiler Eingangsstoffe, aber die CO₂-Emissionen fallen geringer aus. Das entstehende Kohlendioxid wird gespeichert oder genutzt.

Bei „türkischem“ Wasserstoff wird über eine Methanprolyse Methan in Wasserstoff und festen Kohlenstoff aufgespalten. Es fallen durch die Nutzung des Gases Methan CO₂-Emissionen an.

„Grüner“ Wasserstoff hingegen setzt keine Treibhausgasemissionen oder nur in stark eingeschränktem Umfang CO₂-äquivalente Treibhausgasemissionen aus, weil dieser über regenerative Energien erzeugt wird.

1.7. Sicherheit

Beim Betrieb von Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Transport und Nutzung von Wasserstoff sind sicherheitstechnische Maßnahmen notwendig. Diese sind ähnlich zur Nutzung von Erdgas oder Biogasanlagen. Die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger ist nicht neu, deshalb sind schon vielfältige Verfahren vorhanden. Zusätzlich hat die BEN-Tec begonnen, die Feuerwehren aus dem Münsterland auf die Besonderheiten und Unterschiede von Wasserstoffanlagen, im Vergleich zu Erdgas- und Biogasanlagen, zu schulen.

Im Folgenden wird kurz auf einige Punkte eingegangen.

Explosivität

Die Knallgasprobe aus dem Chemieunterricht ist jedem Schüler bekannt. Deshalb bringen sehr viele Menschen den Wasserstoff mit einer explosiven Wirkung in Verbindung. Wesentlich für die Explosionsfähigkeit ist eine explosive Atmosphäre. Diese kann bei Wasserstoff nur in geschlossenen Räumen entstehen. In der freien Atmosphäre oder belüfteten Räumen entweicht und verflüchtigt sich Wasserstoff aufgrund der geringen Dichte sehr schnell. In geschlossenen Räumen wird die Zufuhr von Wasserstoff bei Leckagen oder menschlichem Fehlverhalten durch Sicherheitsventile unterbrochen.

Brennbarkeit

Wasserstoff besitzt eine sehr niedrige Zündenergie. Bei Leckagen kann die Anwesenheit eines Mobiltelefons, das Schlagen einer Tür oder auch die Reibung von Kleidungsstücken zur Zündung führen. Dies erscheint auf dem ersten Blick als nachteilig. Die geringe Zündenergie führt meist zu einem direkten Verbrennen des Gases an der Austrittsstelle, ohne dass sich in geschlossenen Räumen eine explosionsfähige Atmosphäre bildet. In Abhängigkeit vom Druckniveau und der Austrittsmenge, verbrennt Wasserstoff in offener Flamme schnell zu Wasser. Beim Verbrennen von Wasserstoff entsteht kein giftiges Kohlenmono- oder Kohlendioxid.

Die Flamme von Wasserstoff ist bei Tageslicht nahezu unsichtbar. Weiterhin hat die Flamme, im Gegensatz zum Erdgas, eine geringe Strahlungswärme. Das bedeutet, die Umgebung erhitzt sich weniger stark als zum Vergleich bei anderen Gasen. Folglich sind andere Armaturen und Bauteile, z.B. Rohrleitungen, weniger durch Hitze zersetzungsgefährdet.

Diffusion

Die geringe Molekülgröße von H_2 ermöglicht die Diffusion durch viele Materialien und anderen Stoffe. Deshalb sind besondere Anforderungen an die Anlagentechnik und die Infrastruktur zu beachten.

In Deutschland existieren bereits zwei überregionale Wasserstoffnetze, welche das Gas seit Jahrzehnten über Distanzen von vielen Kilometern transportieren. Diese praktischen Erfahrungen im Betrieb von Wasserstoffnetzen gibt es in NRW mit einem 240km langen Rohrleitungsnetz und im mitteldeutschen Chemiedreieck Leuna-Buna-Bitterfeld.

2. Validierung möglicher Fördertöpfe und -aufstellung

Öffentliche Fördermittel sind staatliche Zuwendungen zur Erreichung bestimmter politischer und wirtschaftlicher Ziele. Für diese werden Förderprogramme veröffentlicht, welche die verbindlichen Regeln der öffentlichen Verwaltung für die Vergabe von Fördermitteln aufzeigen. Sie geben Auskunft über die Rahmenbedingungen, d.h. den Förderzweck, Fördervoraussetzungen und Förderbedingungen, die bei der Beantragung einzuhalten sind. Die Förderung kann auf unterschiedliche Art und Weise ausfallen, so werden typischerweise zinsgünstige Kredite verteilt, der Fördermittelgeber beteiligt sich an der Rückzahlung der Finanzierung oder er bezuschusst das Projekt von Anfang an.

Am 02.08.2021 ist das neue Förderprogramm „*Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge)*“ (Richtlinie KsNI) veröffentlicht worden. Es handelt sich um eine Bundesweite Förderung, die sich auf drei Teilbereiche aufteilt mit dem Ziel des Senkens der Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von alternativen Antrieben und Kraftstoffen im straßengebundenen Güterverkehr.

Im ersten Teilbereich werden Machbarkeitsstudien und Analysen zu Einsatzmöglichkeiten von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen, Nutzung neuer und bestehender Logistikstandorte für diese Nutzfahrzeuge und die Errichtung beziehungsweise Erweiterung entsprechender Infrastruktur gefördert.

Im zweiten Teilbereich werden Nutz- & Sonderfahrzeuge mit brennstoffzellen-elektrischem Antrieb (N1, N2 und N3) gefördert. N1, N2 und N3 sind Klassifizierungen für Kraftfahrzeuge der Güterbeförderung. Je nach Gewichten wird zwischen den Klassen unterschieden, so gilt mit einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3,5 Tonnen N1, anschließend folgt N2 mit einer Gesamtmasse über 3,5 t, aber unter 12t. Ab einer Gesamtmasse von 12 t gilt N3.

Der Antrag unterliegt einer Obergrenze für die förderfähigen maximal Investitionsmehrausgaben. Die Kappungsgrenzen ergeben sich anhand der Klassifizierungen, des dazugehörigen Gewichts, sowie ob es sich um ein Neufahrzeug bzw. um ein umgerüstetes Dieselfahrzeug handelt.

EG-Fahrzeugklasse und - zGG	Kappungsgrenzen je Antriebstechnologie für Neufahrzeuge [€]	Kappungsgrenzen je Antriebstechnologie für umgerüstete Diesel-Fahrzeuge [€]
	Brennstoffzelle	Brennstoffzelle
N1 < 3,5 t	90.000	-
N2 > 3,5 t bis 12 t		
Bis 7,5 t	200.000	190.000
Bis 12 t	300.000	290.000
N3 > 12 t		
< 20 t	450.000	430.000
20 bis 30 t	500.000	480.000
> 30 t	550.000	520.000

Bei positivem Bescheid ist der Zuwendungsempfänger gebunden für die Zeit der verkehrsrechtlichen Zulassung mit zusätzlichen vier Jahren.

Der dritte Teilbereich fördert die für den Betrieb der beantragten Nutzfahrzeuge notwendige Tank- und Ladeinfrastruktur auf privaten Standorten. Demgemäß ist die Tankstelleninfrastruktur nur förderfähig, wenn im Voraus eine Förderung für Nutzfahrzeuge positiv beschieden worden ist. Es handelt sich um eine Anteilsfinanzierung mit bis zu 80% für die zuwendungsfähigen projektbezogenen Ausgaben wie zum Beispiel der Verdichter oder die Zapfsäule, aber auch für Schutzmaßnahmen wie Poller.

Der Förderaufruf soll als einstufiger Antrag jährlich vier Mal aktiviert werden, allerdings wird der dritte Teilbereich der Wasserstofftankstelleninfrastruktur im ersten Aufruf nicht berücksichtigt. Deshalb handelt es sich um einen für die Zukunft interessanten Förderaufruf in Bezug auf Wasserstofftankstellen.

Eine weitere bundesweite Förderung soll demnächst ausgelobt werden des NIP.

Im Bundesland Bayern gibt es von der Bayern Innovativ bereits einen laufenden Förderaufruf für den Aufbau einer öffentlichen Tankstellen-Infrastruktur zur Treibstoffversorgung von Nutzfahrzeugen und Kraftomnibussen sowie Sonderfahrzeugen in der Logistik mit Wasserstoff.

Es handelt sich wieder um eine Förderung mit drei Teilbereichen.

Der erste Teilbereich umfasst die Errichtung von öffentlichen und betriebsinternen Wasserstofftankstellen für wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge, Busse und Sonderfahrzeuge in der Logistik, dementsprechend für die Speichertechnologie bei 350 bar. Die Förderquote der zuwendungsfähigen, projektbezogenen Investitionskosten liegt bei 90% für Kleinunternehmen.

Im zweiten Teilbereich wird die Neuanschaffung, sowie das Umrüsten von bis zu drei wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen, Kraftomnibussen und Sonderfahrzeugen in der Logistik gefördert. Dieser Teilbereich ist nur unter Berücksichtigung einer betriebsinternen Tankstelle aus dem Teilbereich eins förderfähig.

Der dritte Teilbereich ermöglicht die Produktion von Wasserstoff über einen Elektrolyseur als Bestandteil der Betankungsinfrastruktur zu realisieren. Die Förderquote der zuwendungsfähigen, projektbezogenen Ausgaben liegt bei 60 % für Kleinunternehmen. Die Kosten für die Referenztechnologie werden mit 250 € pro KW_{el} angesetzt.

Die Zuwendungssumme soll 2 Mio. € nicht überschreiten.

3. Simulation H₂-Bedarf anhand der Busanzahl, PKW- und LKW Entwicklung

Es gibt bereits unterschiedliche Hersteller für Busse und LKW, wobei die LKW derzeit noch in der Demonstrationsphase sind. Dementsprechend wird die Betankungsmenge anhand der Datenblätter unterschiedlicher Bushersteller wie Van Hool mit seinem A330 FC Brennstoffzellen-Hybridbus oder Solaris mit dem Urbino 12 hydrogen Bus berechnet. Der Bus von Van Hool verfügt über einen Tank mit einer Füllmenge von 38,5 kg H₂ und muss laut Hersteller 3 kg H₂ im Tank behalten. Infolgedessen ergibt sich eine max. Betankungsmenge im Tankvorgang von 35,8 kg H₂. Eder Verbrauch liegt bei etwa 7,5-8,0 kg H₂/100 km. Im Gesamtjahr kann man von einem Verbrauch von 12.000 kg H₂ ausgehen.

Auch im Bereich Personenkraftwagen sind unterschiedliche Hersteller vorhanden, wobei derzeit nur Toyota und Hyundai Autos in Serienfertigung anbieten. Der Toyota Mirai 2. Generation und der Hyundai Nexo besitzen beide eine ungefähre Tankkapazität von 5-6 kg H₂. Das Datenblatt des Mirai II verbraucht etwa 0,89 kg H₂/100km. Für die spätere Prognose gehen wir von einem Gesamtverbrauch von 750 kg H₂ im Jahr aus.

3.8. Ermitteln möglicher H₂ Absatzmengen

Mittelfristig werden zunächst 5 PKW und 3 Busse betrachtet. Daraus resultierend ergibt sich ein Wasserstoffbedarf mit durchschnittlich 35 kg pro Tag, wobei die Bedarfsspitze bei ca. 85 kg pro Tag angenommen werden kann.

Die Zahlen wurden über eine Simulation ermittelt. Die Simulation hat Wahrscheinlichkeiten hinterlegt, zu welchen Uhrzeiten an welchen Tagen über das Jahr getankt wird. Dies wird in Kombination mit der Fahrleistung (Annahme: PKW 15.000 km/a; Bus/LKW 50.000 km/a), Verbrauch (PKW 100 km/kg H₂; Bus 12,5 km/kg H₂) und der Tankkapazität (PKW 5 kg H₂; Bus 31 kg H₂) simuliert.

3.9. Verlauf der H₂ Absatzmengen

Die Rahmenbedingungen entwickeln sich zu Gunsten für die Wasserstofftechnologie. Die Umwelt- und Emissionsvorschriften verschärfen sich, weshalb die Automobilindustrie gezwungen ist sich auf die Elektrifizierung der Antriebe zu konzentrieren. Mehrere Studien eruieren den Bedarf für die nächsten Jahren. Es resultiert im Rahmen der mobilen Markthochlaufbestrebungen im Bereich der Wasserstofftechnologien die Erwartung einer erheblichen Steigerung des Wasserstoffbedarfes.

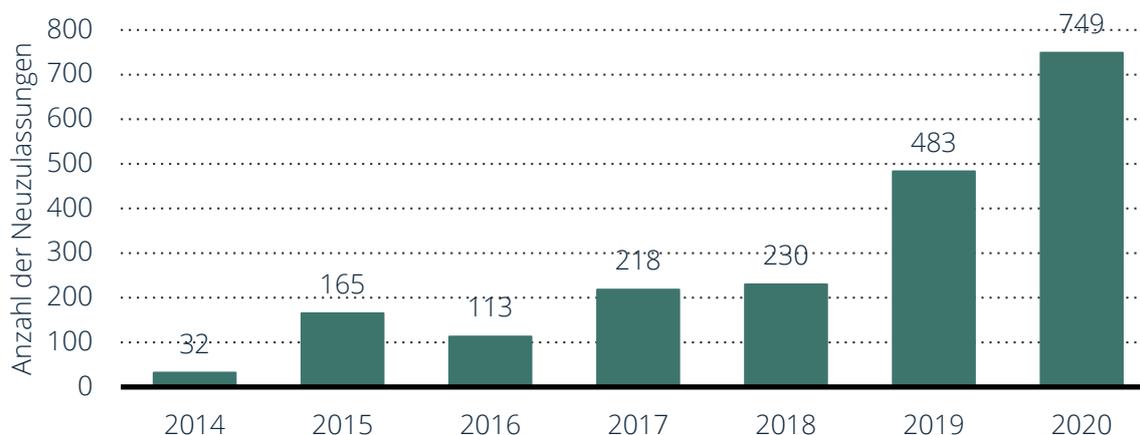


Abbildung 3: Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen mit Brennstoffzellen in der Europäischen Union von 2014 bis 2020¹

Bereits jetzt kann man ein deutliches Wachstum in der Nachfrage nach Brennstoffzellenfahrzeuge sehen. Es handelt sich um eine immer populärere Technologie.

Im Rahmen des HyExperts Projektes entsteht möglicherweise eine weitere Wasserstofftankstelle in der Umgebung. Erfolgt die Anschaffung des geplanten regionalen ÖPNV-Busse mit Wasserstoffantrieb in Kempten, Oberstdorf und Lindau sowie der vorgesehene Einsatz in der Abfallentsorgung und bei regionalen Fuhrparkunternehmen, wird mehr als eine Wasserstofftankstelle benötigt. Eine funktionierende Infrastruktur muss sich auf unterschiedliche Standpunkte verteilen, um Risiken zu mindern. Dieses Vorhaben lässt eine stark steigende Nachfrage zu.

¹ ACEA. (2021, 14. August). Anzahl der Neuzulassungen von Personenkraftwagen mit Brennstoffzellen in der Europäischen Union von 2014 bis 2020 [Graph]. In Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1197284/umfrage/neuzulassungen-von-pkw-mit-brennstoffzelle-in-der-eu/>

Als Grundlage werden die Zahlen, der vorher durchgeführten Simulation, verwendet. Diese werden auf den Monat und anschließend auf das Jahr zusammengefasst. Die folgende Jahre erhalten eine Wachstumsrate, welche sich aus Prognosen unterschiedlicher Studien² ³ und Praxiserfahrungen ergeben. Die Studien erwarten ein deutlich höheres Wachstum, welche an dieser Stelle abgeflacht angenommen werden.

3.9.1. Simulation H2 Bedarf realistisch

Anhand des modularen Elektrolyseurs ist zu beobachten, wann die Produktionsgrenzen erweitert werden müssen, um eine kontinuierliche Versorgung zu sichern. Ein Ausbau müsste nach der Simulation im Jahr 2027 und 2033 geschehen. Die Anschaffung von ÖPNV wurde mit einer Interessenbekundung bestätigt, aber bisherige Erfahrungen zeigen einen deutlichen Verzug bei der Umsetzung. Aus diesem Grund ist die stärkste Steigerung 2026 zu beobachten. Aufgrund des CVDs und anderen Statistiken sind auch starke Steigerungen ab 2030 zu erwarten.

3.9.2. Simulation H2 Bedarf optimistisch

Anhand des modularen Elektrolyseurs ist zu beobachten, wann die Produktionsgrenzen erweitert werden müssen, um eine kontinuierliche Versorgung zu sichern. Ein Ausbau müsste nach der Simulation im Jahr 2026 und 2028 geschehen. Der Elektrolyseur erreicht 2029 seine Produktionsgrenzen, weshalb weitere Quellen für Wasserstoff in Erwägung gezogen werden müssten. Hierzu könnten mehrere Ansätze als Lösung dienen, wie z.B. die Wasserstoffherzeugung aus Klärgas.

² Vgl. Hof, E. (2016). *Die deutsche H₂-RCS-Roadmap 2025*. NOW GmbH. S. 33

³ Vgl. Adolf, J. et al. (2017). *Shell Wasserstoffstudie. Energie der Zukunft?*. Shell Deutschland Oil GmbH. S. 60

3.9.3. Simulation H2 Bedarf pessimistisch

Anhand des modularen Elektrolyseurs ist zu beobachten, wann die Produktionsgrenzen erweitert werden müssen, um eine kontinuierliche Versorgung zu sichern. Ein Ausbau müsste nach der Simulation im Jahr 2030 und 2037 geschehen. Allerdings wird die dritte Produktionsstufe nur zu geringen Teilen ausgelastet.

Friohheat GmbH

4. Recherche hinsichtlich weiterer H₂ Abnehmer im Raum Lindau

Das große Potential für die konstante Wasserstoffabnahme wird im ÖPNV gesehen. Unternehmen wie die Regionalbus Augsburg GmbH werden ihre ÖPNV-Busflotten in den kommenden Jahren nahezu auf null Emissionen umstellen müssen. Begründet kann dies durch Clean Vehicles Directive (CVD), eine Vorschrift, welche verbindliche Mindestziele von emissionsarme und -freie Fahrzeugbeschaffung vorgibt. Aber nicht nur der ÖPNV ist betroffen, sondern für Verträge über Kauf, Leasing oder Anmietung von Straßenfahrzeugen, für öffentliche Dienstleistungsaufträge und für Dienstleistungsaufträge über Verkehrsdienste (z.B. Paket- und Postdienste, Abholung von Siedlungsabfällen).⁴ Der Anteil von Fahrzeugen, die mit kommerziellen Kraftstoffen betrieben werden, werden dabei stetig reduziert.

Ziel der Vorgabe ist die Verbesserung der Luftqualität in den Städten, die Senkung des Lärmpegels, die Schaffung eines Marktes für emissionsfreie Fahrzeuge sowie die Reduktion der Treibhausgase.

Wie bereits oben erwähnt werden die Busunternehmen folge dessen in den nächsten Jahren ihre Neuanschaffungen auf alternative Antriebe umstellen müssen. Aufgrund einer vorhandenen Wasserstofftankstelle im Landkreis Lindau könnten es Brennstoffzellenfahrzeuge sein, welche den CVD Richtlinien entsprechen. Der Vorteil gegenüber eines Batteriebusses wären die größeren Reichweiten, niedrigeres Fahrzeuggewicht gegenüber einem Batterieantrieb⁵ und die notwendige Infrastruktur ist bereits vorhanden. Derzeit besitzt das RBA 27 Busse und die Stadtwerke 18 Busse. Laut VDV (2018) wurden 2017 im Landkreis Lindau 982.000km gefahren. Teilt man die gefahrenen Kilometer auf die 45 Busse auf, so ergibt sich für jeden Bus 21.823 km/a.

Der Wasserstoff Bus von Van Hool hat einen Tank mit einer Füllmenge von 38,5 kg H₂ und muss laut Hersteller 3 kg H₂ im Tank behalten, infolgedessen ergibt sich eine max. Betankungsmenge im Tankvorgang von 35,8 kg H₂. Das Pilotprojekt in Wuppertal zeigte einen Verbrauch von 8 kg/100km im Sommer und 10 kg/100km im Winter, sodass ein Jahresdurchschnitt von 8,7 kg/100km erreicht wurde.⁶

⁴ BMWI. (2021, 31. August). *Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge*. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html>

⁵ Streichfuss, M., Schwillig, A.(2020). *Batterieantrieb oder doch eher Brennstoffzelle?*. Technik und Umwelt

⁶ WSW. (2021, 16. September). *WSW-Wasserstoffbusse erreichen Kostenparität mit Dieseln*. <https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/meldung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieseln>

Es wird die Annahme getroffen, dass RBA in den nächsten 5 Jahren 8 und die Stadtwerke 3 H₂ Busse anschafft. So müsste die Tankstelle für 11 Busse ausgelegt werden. 11 Busse würden etwa 240.045 km/a fahren und dafür eine Wasserstoffmenge von 20.884 kg/a benötigen. Pfllegt man diese Daten in die Simulation ein, so ergibt sich folgendes Bedarfsprofil in der Woche:

Mit dieser Verordnung sind auch andere Bereiche betroffen, so könnten neben den bereits genannten Unternehmen, auch andere wie das Entsorgungsunternehmen aus Lindau sich umstellen. Hierzu gab es von der Firma Faun ein Angebot (Stand Oktober 2020) für eine Kehrmachine mit Brennstoffzellenantrieb (910.262,50€), sowie ein Vergleichsangebot einer Dieselkehrmaschine (201.100,00€). Die Investitionsmehrkosten lagen bei 709.162,50€. Oftmals werden diese Fahrzeuge über Förderaufträge (mit 90% Förderung der Mehrkosten) mitfinanziert, sodass die Mehrkosten für das Unternehmen bei 70.916,25 € liegen. Die restlichen 638.246,25 € werden dann vom Fördermittelgeber übernommen.⁷

⁷Vergleichsangebot im Anhang

5. Untersuchung der Nutzung des produzierten Sauerstoffs in der Kläranlage Lindau

Sauerstoff entsteht als Nebenprodukt der Elektrolyse und wird in den häufigsten Fällen als Abfallprodukt in die Umgebung abgegeben. Auf der Mol-Ebene betrachtet, erhält man halb so viel Sauerstoff wie Wasserstoff aus der Elektrolyse. Anders sieht es beim Massenstrom [kg/h] aus, wo fast das 8-fache an Sauerstoff gegenüber Wasserstoff produziert wird.⁸

Die GTL nutzt zurzeit 220 kg O₂/h aus der Luft. Kläranlagen wie die GTL könnten sich den beinahe reinen Sauerstoff aus der Elektrolyse zu Nutzen machen, wo sie derzeit nur Sauerstoff aus der Umgebungsluft beziehen. Dieser wird in den zweiten Teil des Belebungsbeckens geleitet zur biologischen Reinigung des Abwassers.⁹ Der Kläranlagenprozess erreicht eine Verbesserung der Klärleistung bei Nutzung von reinem Sauerstoff. Es müsste erforscht werden inwieweit die Umwandlung von Sauerstoff zu Ozon und die Verwendung dessen in der vierten Reinigungsstufe Auswirkungen hat. Im Rahmen der vierten Reinigungsstufe soll künftig mit dem Sauerstoff der Elektrolyse, auch eine Produktion zur Entfernung von Arzneimittelrückständen und Industriechemikalien aus Abwässern ermöglicht werden.¹⁰

Neben der Nutzung des Sauerstoffes kann ebenfalls die Nutzung der Wärme angestrebt werden, denn der Reinigungsprozess einer Kläranlage verfügt über einen hohen Wärmebedarf. Dieser kann durch die Abwärme des Elektrolyseurs gedeckt werden.¹¹

⁸ Ermittelt durch die Chemische Reaktion

⁹ Klassewasser. (2021, 11. August). So funktioniert ein Klärwerk.

https://klassewasser.de/content/language1/downloads/schuelerbogen_klaerwerk.pdf

¹⁰ KUMATEC et al. (2021, 11. August). *localhy*. <https://www.localhy.de/>

¹¹ Mitsdoerffer, R. (2017). Innovative Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen : Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. In *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser*. 245:18/1-18/17; Jg. 245 (2017) S. 18/1- (1637S.) (Bd. 245, S. 18/1-(1637S.)).

6. Zeichnerische Darstellung modulare Erweiterung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei Verdoppelung und Verdreifachung der Anlagenkapazität

Es wird ein Elektrolyseur betrachtet, welcher zum Vorteil des Kunden einen modularen Aufbau besitzt. Möglich wird es durch die Kaskadierung mehrerer kleiner Elektrolyseur-Stacks. Dementsprechend kann je nach Kundenwunsch das System nach aktueller Anforderung ausgerüstet werden und bei nachträglich steigendem oder sinkendem Wasserstoffbedarf mit kleinen Elektrolyseur-Stacks angepasst werden. Insgesamt sind drei Produktionsstufen in einem 40 ft. Container vorhanden. Die Produktionsstufen sind über Regale definiert, sodass in der ersten Stufe ein Regal mit 36 Elektrolyseur-Stacks (siehe Abbildung) eingebaut ist und bei Stufe drei entsprechend drei Regale mit 108 Elektrolyseur-Stacks.

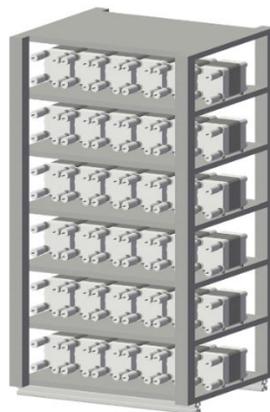
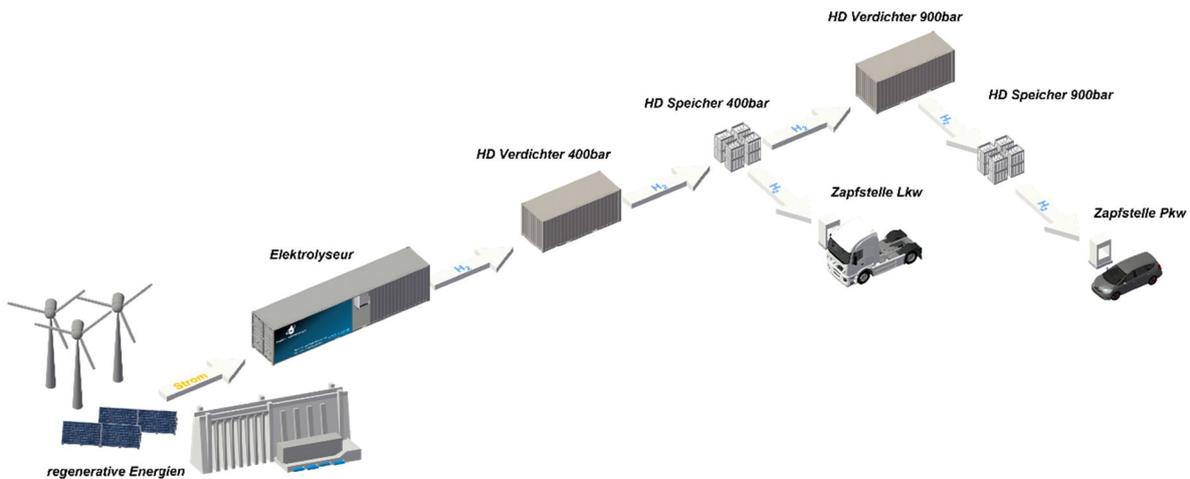


Abbildung 4: Regal mit 36 Elektrolyseur-Stacks

Die Kosten für einen Elektrolyseur mit einem Regal liegen bei etwa 458.000 € nach aktueller Marktlage. Die Erweiterung um ein weiteres Regal würde ungefähr 240.000 € kosten. Dies gilt auch für das dritte Regal.

7. Konzepterstellung und Vorhabensbeschreibung



Der dynamische Wasserstoffbedarf der mobilen Abnehmer wird auf zwei Zapfpunkte aufgeteilt. Da in der mobilen Speichertechnologieentwicklung sowohl Bestrebungen im Bereich der 350 bar sowie in der 700 bar Speichertechnologie zu erkennen sind, wird die Tankstelle sowohl Wasserstoff mit 350 bar für die Betankung von LKW und Bussen sowie Wasserstoff mit 700 bar für die Betankung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen bereitstellen. Die Tankstelle bietet ein Betankungsplatz mit zwei Dispensern für die jeweiligen Druckstufen.

7.1. Grobe Aufstellungszeichnung und Ermittlung des Flächenbedarfs

Die geplante Wasserstofftankstelle soll auf dem Gelände der GTL, Robert-Bosch-Straße 45, 88131 Lindau (Bodensee) betrachtet werden. Das Grundstück befindet sich am Autobahnzubringer der A96 Abfahrt Lindau, welche eine wichtige Verbindungsautobahn zwischen München, dem Bodensee und fortlaufend als A14 nach Österreich darstellt.

Die möglichen Aufstellungsflächen für die Tankstelleneinheit sind im Anhang wiederzufinden.

7.1.1. Elektrolyseur

Elektrolyse bedeutet „mittels Energie trennen“, so spaltet ein Elektrolyseur unter Einfluss von Energie die chemische Verbindung Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff.

Diese chemische Reaktion wird durch die Zuführung von Strom erzwungen und es entsteht eine Umwandlung von elektrischer Energie zu chemischer Energie. Oftmals nennt man diesen Prozess auch Umkehrung einer galvanischen Zelle.

Das Verfahren besitzt zwei Elektroden, bestehend aus einer Kathode (Minuspol) und eine Anode (Pluspol). Der Elektrolyt trennt Wasser (H_2O) in H^+ -Protonen und OH^- -Ionen. Das H^+ -Proton verbindet sich anschließend mit einem Wassermolekül zu einem H_3O^+ -Kation. Die Reduktion wieder zu Wasser verläuft an der Kathode, wo die Kationen Elektronen aufnehmen. Dabei entsteht der Wasserstoff. An der anderen Elektrode, der Anode, werden Elektronen von den negativen OH^- -Ionen abgegeben. Sie oxidieren zu den Nebenprodukten Wasser und Sauerstoff, welche freigesetzt werden.

Die Versorgung der Wasserstofftankstelle erfolgt mit grünem Wasserstoff aus einem Onsite-Elektrolyseur auf dem Gelände der Kläranlage. Onsite bedeutet, dass dies vor Ort geschieht. Der Elektrolyseur ist in der ersten Projektstufe für eine Wasserstoffproduktionsmenge von 85,5 kg H_2 /Tag ausgelegt und kann über eine modulare Erweiterung im Stufenmodell erweitert werden. Dadurch kann die dargestellte Abnehmerstrukturen weitestgehend kontinuierlich betrieben und bedarfsspezifisch erweitert werden. So wirkt man dem Problem der Knappheit bei plötzlichem Markthochlauf entgegen, wie es zum Beispiel in Freiburg geschah. In den nachfolgenden Stufen kann 171 kg H_2 /Tag und anschließend in der vollen Ausbaustufe 256 kg H_2 /Tag.

Die nominale elektrische Leistung beläuft sich in der maximalen Ausbaustufe auf 580 kW mit einer Wasserstoffproduktion von 256 kg/ H_2 pro Tag. Die Versorgung der Elektrolyseeinheit erfolgt über grünen, netzbezogenen Strom. So kann das Angebot von „grünem“ Wasserstoff garantiert werden, das heißt Wasserstoff aus regenerativen Quellen. Nur durch die Verwendung von grünem Wasserstoff kann das volle Potenzial des Energieträgers Wasserstoff ausgeschöpft werden.

7.1.2. Kompressor

Der Wasserstoff wird in einem ölfreiem hydraulischen Kompressor verdichtet. Diese Art von Kompressoren werden verwendet, wenn neben einem hohen Druckverhältnis auch ein begrenzter Volumenstrom aus der Elektrolyse komprimiert werden muss. Für die Lebensdauer der Brennstoffzelle im Fahrzeug ist die Reinheit des Wasserstoffes wichtig, deshalb wird ein schmierungsfreier Prozess gewählt.

Die Verdrängungselemente im Kompressor bewegen sich als Kolben oszillierend zwischen der Oberen- und der Unteren Totlage. Es erfolgt die Komprimierung über zwei Stufen, die hintereinandergeschaltet sind, so wird eine möglichst große Druckerhöhung realisiert. Währenddessen entsteht viel Wärme, welche über einen Tischkühler abgekühlt wird. Um der SAEJ 2601 gerecht zu werden, erreicht der Verdichter etwa 200 bar mehr als im Fahrzeug gespeichert wird, das entspricht 900 bar.

7.1.3. Speicher

Im gasförmigen Zustand unterscheidet man je nach Druck, welche Druckbehälter zum Einsatz kommen. Niederdruckspeicher sind stationär aufgestellt und besitzen im Vergleich zu den Flaschenbündel einen größeren Tank zwischen 2 000 und 78 000 Liter bei bis zu 50 bar. Der Hochdruckspeicher besteht aus speziellen Voll- oder Stahl-Composite-Druckbehälter, die transportabel sind. Es wird zwischen 4 Flaschentypen unterschieden, je nach Festigkeit der Behälter für einen maximal zulässigen Innendruck von 300 bar_ü (Typ 1), 480 bar_ü bis 1000 bar_ü (Typ 2), 350 bar_ü (Typ 3) und 500 bar_ü (Typ 4) ausgelegt sind. Oft werden diese für die Tankstellenanwendung liegend in einem Stahlcontainer untergebracht.

Die Speicherung für die Tankstelle verläuft aufgrund der hohen Drücke über eine Hochdruckbank im gasförmigen Zustand. Der modulare Aufbau erlaubt eine Vergrößerung des Speichers bei Bedarf, sodass zunächst keine Einschränkung für einen Betankungsvorgang angegeben werden muss. Das ist ein großer Vorteil der Flaschenbündel.

7.2. Beschreibung Bauvorhaben allgemein und technisch

In der mobilen Speichertechnologieentwicklung sind sowohl Bestrebungen im Bereich der 350 bar sowie in der 700 bar Speichertechnologie zu erkennen, deshalb sollten Tankstellen sowohl Wasserstoff mit 350 bar für die Betankung von LKW und Bussen sowie Wasserstoff mit 700 bar für die Betankung von PKW und leichten Nutzfahrzeugen bereitstellen.

Die größeren Absatzmengen, welche über die Wirtschaftlichkeit der Anlage bestimmen, werden allerdings über die großen Tankmengen der LKW und Busse bestimmt.

Es gibt bereits unterschiedliche Hersteller für Busse und LKWs, wobei die LKWs derzeit noch in der Demonstrationsphase sind. Dementsprechend wird die Betankungsmenge geplant anhand der Datenblätter unterschiedlicher Bushersteller wie Van Hool mit seinem A330 FC Brennstoffzellen-Hybridbus oder Solaris mit dem Urbino 12 hydrogen Bus. Der Wasserstoff Bus von Van Hool hat sogar den größeren Tank mit einer Füllmenge von 38,5 kg H₂ und muss laut Hersteller 3 kg H₂ im Tank behalten, infolgedessen ergibt sich eine max. Betankungsmenge im Tankvorgang von 35,8 kg H₂.

7.3. Verbale Beschreibung des Vorhabens hinsichtlich Innovation für die Stadt Lindau im Landkreis Lindau, Klimaschutz- und Umweltaspekte, Minderungspotential der CO₂, etc.

Deutschland möchte mit Hilfe der Nationalen Wasserstoffstrategie der Vorreiter in der Wasserstofftechnologie sein. Langfristig soll sogar die Weltmarktführerschaft erlangt und gesichert werden.¹² Grüner Wasserstoff kann in Regionen wie Lindau mit viel Wasserkraft über eine Elektrolyse produziert werden.

Verschafft man sich einen Überblick über den derzeitigen Ausbau der Wasserstofftankstellen in der Welt wird deutlich, dass Deutschland in Europa mit Abstand Marktführer ist. Auch im internationalen Kontext kann es bereits den zweiten Platz sichern. Damit wie oben beschrieben die Führerschaft erzielt wird, müssen Investoren wie Frioheat die Initiative ergreifen und Wasserstofftankstellen bauen.



Abbildung 5: Länder mit den meisten öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstellen weltweit (Stand 2019)¹³

¹² BMBF. (o. D., 26. August). *Nationale Wasserstoffstrategie*. https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energie-wende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html

¹³ ecomento. (2020, 24. August). *Länder mit den meisten öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstellen weltweit (Stand: Januar 2019)* [Graph]. In Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820861/umfrage/laender-mit-den-meisten-wasserstofftankstellen-weltweit/>

Die Tankstelleninfrastruktur hat sich in den letzten Jahren deutlich verbessert. So standen vor vier Jahren nur 1/3 der Tankstellen von heute zur Verfügung. Allerdings ist die Anzahl weiterhin ausbaufähig, deshalb gehört der Bau einer Wasserstofftankstelle weiterhin zu einem innovativen Vorhaben. Es handelt sich außerdem um die erste Wasserstofftankstelle am Bodensee. Bisher wurde keine Tankstelle in näherer Umgebung erbaut, was zu einer Lücke der Infrastruktur führt, welche hiermit aufgehoben werden kann.

Was die Darstellung der Wasserstofftankstellen nicht aufweist, nur acht der deutschen Tankstellen bieten die Betankungsoption 350 bar an. Gerade diese Betankungsoption ist neben der Wirtschaftlichkeit auch für den Umweltgedanken interessant. Die Stadt Lindau erhält die Möglichkeit für das Umrüsten des ÖPNV auf Brennstoffzellentechnologie statt kommerzieller Antriebe.

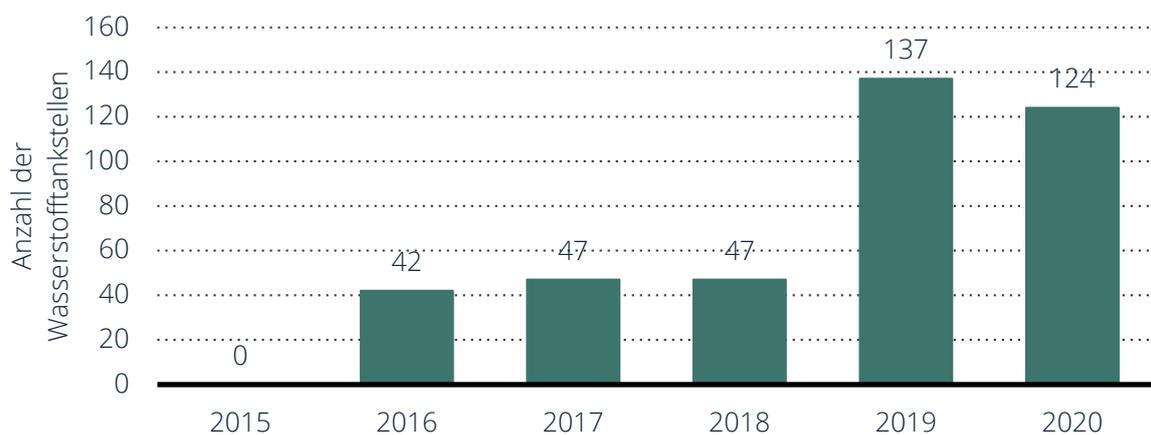


Abbildung 6: Anzahl der Wasserstofftankstellen in Europa von 2015 bis 2020 ¹⁴

Die Wuppertaler Stadtwerke zeigen in ihrem Pilotprojekt, dass der Betrieb von Wasserstoffbussen bereits im ersten Jahr nicht mehr als der der Dieselsebuse kostet. Der Kraftstoffverbrauch ist ebenfalls vergleichbar mit den der Dieselsebuse. In den Sommermonaten wurde weniger verbraucht [8 kg/100km] als in den Wintermonaten [10 kg/100km]. Insgesamt betrug der Jahresdurchschnitt 8,7 kg/100km.

Alternativ zu Wasserstoffbussen wären Elektrobusse, allerdings können diese weder in der Reichweite noch in der schnellen Auftankung mithalten. Eine ländlichere Region, wie sie in Lindau vorzufinden ist, benötigt größere Reichweiten. Vor allem handelt es sich zu dem noch um eine hügelige Region, wo das Fahrzeug Gewicht ebenfalls eine Rolle spielt. Dies bedeutet weiterer Vorteil gegenüber Elektrobusen. ¹⁵

¹⁴ ACEA. (2021, 24. August). *Anzahl der Wasserstofftankstellen in Europa von 2015 bis 2020* [Graph]. In Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1050374/umfrage/anzahl-der-wasserstoff-tankstellen-in-europa/>

¹⁵ Streichfuss, M., Schwilling, A. (2020). *Batterieantrieb oder doch eher Brennstoffzelle?*. Technik und Umwelt

Die CO₂-Einsparungen kann man pauschal nicht berechnen. Zunächst muss ein Gesamtenergiebedarf ermittelt werden, welcher Abhängig ist von den Stopps, aufgrund des erneuten Anfahrens des Busses, der Steigungen auf der Strecke und die Masse, welcher durch die Anzahl der Personen bestimmt wird. Außerdem kommen weitere Einflussfaktoren wie zum Beispiel Temperatur hinzu. Um eine

Entscheidend für die Emissionen bei Wasserstoff ist die Frage der Herstellungsart, doch durch die Bestrebungen von grünem Wasserstoff aus der Elektrolyse können keine Stickoxide oder Feinstaub angenommen werden. Auch die Lärmemissionen sind bei Nutzung regenerativer Antriebe sehr viel geringer.¹⁶

7.4. Bestimmung der regenerativen Energiequellen

Alle Arten von erneuerbarer Energie, die es auf dem Planeten gibt, basieren auf einer der folgenden drei Grundquellen: der von der Sonne emittierten Strahlung, der Erdwärme und der Bewegungsenergie von Erde und Mond. Aus diesen entstehen dann die erneuerbaren Energien wie Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft und weitere. Der Anteil an diesen steigt in der Stromversorgung in Deutschland jährlich. Im Jahr 2000 lag der Anteil noch bei 6 %, während im Jahr 2019 der Anteil bereits bei 42% lag. Auch im folgenden Jahr 2020 wächst der Anteil um weitere 3,4%.¹⁷ Die Produktion an erneuerbaren Energien in absoluten Zahlen ist in Bayern am höchsten von allen Bundesländern. Unter Berücksichtigung des Stromverbrauchs sind sie im Ländervergleich nur noch auf Platz sieben.¹⁸

Um den Ansprüchen des Klimaschutzes gerecht zu werden, muss die Technologie des Wasserstoffs langfristig auf erneuerbaren Energien basieren.

In diesem Projekt wurde bisher festgelegt, dass der Strom aus dem Netz als grüner Strom eingekauft wird. Dies hat den Vorteil grünen Wasserstoff zu erzeugen und somit das volle Potential der Umweltfreundlichkeit aus Wasserstoff auszuschöpfen. Zudem ist eine kontinuierliche Stromversorgung gesichert. Allerdings ist der Strompreis in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern hoch. Zusätzlich fallen Zertifizierungskosten an. Auf der anderen Seite fallen aber auch teilweise Kosten weg, wie zum, Beispiel die EEG-Umlage.

¹⁶ DVGW. (2019). *Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten*

¹⁷ Umwelt Bundesamt. (2021). *Erneuerbare Energien in Zahlen*.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen?sprungmarke=strom#uberblick>

¹⁸ Sebald, C. (2021, 16. September). *Bayern ist bei den erneuerbaren Energien nur Mittelmaß*. Süddeutsche Zeitung. <https://www.sueddeutsche.de/bayern/bayern-erneuerbare-energien-laendervergleich-1.5363485>

Am 01.01.2021 ist eine Erneuerung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2021) in Kraft getreten. Unter anderem thematisiert die Verordnung, wann Wasserstoff als „Grüner Wasserstoff“ für die Zwecke der EEG-Umlagebefreiung anzusehen ist, so dass der für seine Herstellung verbrauchte Strom vollständig von der EEG-Umlage befreit ist. Es gibt zwei Möglichkeiten, um dies zu erreichen.

Stromkostenintensiven Unternehmen können die Strommengen bei der Herstellung von Wasserstoff nach Maßgabe der Besonderen Ausgleichsregelung gemäß § 64a EEG 2021 die EEG-Umlage begrenzen. Allerdings fällt eine Wasserstoff-Tankstelle nicht unter „stromintensives Unternehmen“ laut Anlage 4 EEG 2021, weshalb die Regelung nach § 64a Absatz 1 EEG 2021 in diesem Fall nicht anwendbar ist.¹⁹

Allerdings kann bei der Herstellung von Grünem Wasserstoff verbrauchter Strom aus erneuerbaren Energien nach § 69b EEG 2021 vollständig von der EEG-Umlage befreit werden. Es ist zu beachten, dass diese Regelung nur innerhalb der ersten 5.000 Vollbenutzungsstunden gilt. Die Beschränkung auf 5.000 Vollbenutzungsstunden (definiert in § 12i Abs. 3 EEG) ist festgelegt, weil angenommen wird, dass der Wasserstoff nicht mehr als Grün gilt. Somit ist der Stromverbrauch zur Herstellung dieses Wasserstoffs nicht nach § 69b EEG 2021 von der EEG-Umlage befreit.²⁰

Aufgrund der neuen Technologie und noch keiner vorhandenen Standardisierung sind hohe Wartungs- und Prüfkosten vorhanden, welche als Fixkosten anfallen. Um eine bessere Wirtschaftlichkeit zu erreichen, ist es erstrebenswert eine hohe Wasserstoffmenge für den Verkauf bereitzustellen. Das EEG 2021 hemmt mit der zeitlichen Begrenzung von 5000 h die Wasserstoffproduktion. Der Elektrolyseur könne mehr als 5000 h im Jahr laufen unter Berücksichtigung von regenerativen Energien. Wasserkraft ist im Gegenteil von Windkraft und Photovoltaik unabhängig vom Wetter. Hier ist eine kontinuierliche Versorgung über grünen Strom dementsprechend möglich und widerspricht der Aussage des EEG 2021.

¹⁹ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2021). *Merkmale zur elektrochemischen Herstellung von Wasserstoff in stromkostenintensiven Unternehmen 2021*.

²⁰ Raue. (2021, 6. Oktober). *UPDATE: EEG-UMLAGEBEFREIUNG FÜR ELEKTROLYSEURE BESCHLOSSEN*. <https://raue.com/aktuell/branchen/energie-rohstoffe-und-klimaschutz/energie/update-eeg-umlagebefreiung-fuer-elektrolyseure-beschlossen/>

Neben dem Netzbezogenen Strom können auch eigene Strombestandteile in den Prozess eingeführt werden durch den Ausbau erneuerbaren Energie wie Photovoltaik oder Windkraft. Die eigene Stromproduktion hat von Vorteil, dass eine Unabhängigkeit von den großen Stromerzeugern geschaffen wird. Somit ist eine dezentrale Versorgung gegeben. Im Gegensatz zu zentraler Energieversorgung versteht man unter dezentraler Energieversorgung die Energiebereitstellung durch kleinere Anlagen in Verbrauchernähe. Neben dem Aspekt der Umwelt Freundlichkeit ist vor allem der günstigere Strompreis zu erwähnen. Deutschland besitzt unter anderem einen hohen Strompreis im Europavergleich.²¹

In Kapitel 8.4.2 wird durch Abbildung 23 und 24 deutlich, dass die Stromkosten die größte Kostenstelle ausmachen. Aus diesem Grund ist es wichtig einen niedrigen Strompreis zu erhalten.

Als weitere Möglichkeit zur Stromerzeugung sollten Photovoltaik und Windkraft in Betracht gezogen werden, deshalb werden diese im Folgenden näher beschrieben.

Windkraft

Auf der Erde existieren unterschiedliche Hoch- und Tiefdruckgebiete, aufgrund von unterschiedlichen Temperaturen, welche durch die Sonneneinstrahlung verursacht werden. Diese gleichen sich in Form von Wind aus. Windkraftanlagen nutzen die kinetische Energie des Windes und wandeln diese in Strom um.

Windkraftanlagen können nicht nur anhand ihrer Nennleistung definiert werden, denn zwei Windkraftanlagen mit gleicher Nennleistung können am selben Standort unterschiedliche Jahreserträge erreichen. Die Tabelle 3 und die Abbildung 13 veranschaulicht anhand einer 10 kW Nennleistung Windkraftanlage (WKA) die Unterschiede. Hierbei wird von einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 4 m/s angenommen, was einem guten Binnenland-Standort entspricht.

Aus diesem Grund müssen unterschiedliche Aspekte bei der Wahl des richtigen Windkraftanlage getroffen werden. Ein kleinerer Rotor kommt an Starkwindstandorten zum Einsatz, während der größere Rotor an Standorten mit schwachen Windbedingungen eingesetzt wird. Der Bereich um Lindau gehört zu einem Standort mit eher schwachen Windbedingungen.

²¹ BMWi. (2021, 05. Oktober). *Strompreise für Industriekunden in ausgewählten europäischen Ländern nach Verbrauchsmenge im Jahr 2020 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)*.

Windkraftanlagen im Onshore-Bereich (2-5 MW) weisen mit durchschnittlichen Installationskosten von ca. 1500 EUR/kW und sehr hohen jährlichen Volllaststunden von 3200 Stromgestehungskosten von 3,99 €_{Cent}/kWh auf. Allerdings unter idealen Bedingungen, die in Deutschland nur begrenzt vorhanden sind. Im Binnenland werden nur 1800 Volllaststunden erreicht, deswegen variieren die Kosten von Anlagen an schlechteren Standorten bis in einen Bereich von 8,23 €_{Cent}/kWh.²² Damit liegen die Stromgestehungskosten von Onshore-Anlagen in Deutschland deutlich unterhalb der durchschnittlichen Stromkosten.

Der Vorteil von Windkraft gegenüber Photovoltaik ist die Versorgung über die Wintermonate, da dort Photovoltaik an seine Grenzen gelangt. Auf der anderen Seite produzieren Windkraftanlagen den meisten Strom in windstarken Gegenden, zum Beispiel auf See oder im Gebirge. Die Errichtung an solchen Standorten ist besonders teuer in den Investitionskosten. Außerdem ist mit dem Bau einer Windkraftanlage meist ein umfangreiches Genehmigungsverfahren gekoppelt, um Anwohner und die Natur vor den Geräuschen zu schützen. Es müssen bestimmte Grenzwerte und Mindestabstände von Wohngebieten eingehalten werden.

Photovoltaik

PV-Anlagen erzeugen Strom über die Strahlungsenergie, welche abhängig ist von der Sonneneinstrahlung. Im Süden ist die Sonneneinstrahlung höher als im Norden, was positiv für das Bundesland Bayern zu bewerten ist. Die Einstrahlung liegt dort bei etwa 1.300 kWh/m². Laut einer Studie des Fraunhofer Instituts liegen die Stromgestehungskosten von Freiflächen Photovoltaik Anlage (größer 2 MWp) in Süddeutschland bei etwa 3,71- 4,95 €_{Cent}/kWh. Dachinstallierte Großanlage (100-1000 kWp) erreichen in Süddeutschland Stromgestehungskosten zwischen 4,95 und 6,18 €_{Cent}/kWh produzieren.²³ Damit liegen die Stromgestehungskosten von PV-Anlagen in Deutschland deutlich unterhalb der durchschnittlichen Stromkosten.

Eine Photovoltaikanlage besitzt keine beweglichen Bauteile, deshalb ist diese wartungsarm und es fallen nur geringe Instandhaltungskosten während der Betriebszeit von 20- bis 25-jährigen an. Aber der größte Nachteil ist keine kontinuierliche Stromversorgung gesichert und vor allem im Winter ist eine Sicherstellung der Stromversorgung kritisch.

²² Kost, C., Shammugam, S., Jülch, V., Nguyen, H. T., & Schlegl, T. (2018). Stromgestehungskosten erneuerbare Energien.

²³ Kost, C., Shammugam, S., Jülch, V., Nguyen, H. T., & Schlegl, T. (2018). Stromgestehungskosten erneuerbare Energien.

7.5. Ermittlung geeigneter Aufstellungsflächen und Flächenanforderungen

Das Besondere an dem Vorhanden in Lindau ist die Symbiose der Kläranlage mit dem Elektrolyseur. Kläranlagen sind in Deutschland in Relation zur Einwohnerzahl dezentral über das gesamte Bundesgebiet verteilt, weshalb die Erschließung aller Kläranlagen eine flächendeckende Infrastruktur der Tankstellen bedeuten würde mit der Besonderheit der Symbiose zwischen Erzeugung und Nutzung. Das Projekt localhy überprüft diese Symbiose an einer anderen Kläranlage.

Ein weiterer Vorteil der Flächennutzung auf der Kläranlage ist die leistungsfähige Trafostation, die allgemein verfügbar ist durch das energieintensive Abwasserreinigungsverfahren. Der Zugang zum Mittelspannungsnetz ermöglicht den Anschluss großer Lasten wie dem Elektrolyseur.

Um geeignete Aufstellungsflächen auf dem Gelände zu finden, müssen Sicherheitsabstände beachtet werden, weil es sich bei Wasserstoff um ein gefährliches Gas handelt. Um den Elektrolyseur muss deshalb 5 m Abstand eingehalten werden.²⁴ Es sind unterschiedliche Ex-Zonen definiert, wobei die aus dem Abgasrohr am wichtigsten ist. Hier strömen des Öfteren kleine Mengen Wasserstoff aus. Dasselbe gilt für die Verdichtereinheit mit Speicherung. Allerdings können diese zwei Einheiten zusammenstehen, solange von der Genehmigungsbehörde nichts anderes verlangt wird. Um Kosten zu sparen, sollten möglichst geringe Wege zwischen den Einheiten liegen.

Die Kläranlage soll final den Sauerstoff der Elektrolyse mit nutzen, weshalb ein Aufstellungsort in der Nähe der Belebungsbecken empfehlenswert ist. Folgende Abbildung zeigt das Geländer der GTL mit dem Elektrolyseur, welcher vor Ort aufgestellt werden soll.

²⁴ AGS- Ausschuss für Gefahrenstoffe. (2020). TRBS 3151/TRGS 751 neu gefasst.



Abbildung 7: Lageplan der GTL

Friohheat

8. Kostenkalkulation, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Das nachfolgende Kapitel betrachtet die Gesamtinvestitions-, Kapitalkosten, sowie die Zusammenstellung jährlicher Umsätze, Betriebskosten und Betriebsergebnis je nach Szenario. Es resultieren unterschiedliche Amortisationszeiten, welche ebenfalls tabellarisch dargestellt werden.

8.1. Zusammenstellung Investitionskosten

Die Gesamtinvestitionskosten (in netto) betrachten einen vollausgestatteten Elektrolyseur. Das Gelände der GTL bietet Potentiale zur Einsparung an. In der Regel sind bereits Trafostationen vor Ort gegeben, weshalb kein neuer Hauptstromanschluss für den Elektrolyseur errichtet werden muss.

Komponenten		aktuelle Projektkostenschätzung		
Verdichtereinheit mit Zapfpunkt	Betankungsstation/Verdichter 900bar	629.731,00 €		
	Zapfsäule mit zwei Dispenser	89.485,00 €		
	Rohrleitung und E/MSR- Kabel	10.395,00 €		
	Fernwirksystem	2.640,00 €		
	Inbetriebnahme	38.000,00 €		
	Gesamtkosten	770.251,00 €		
Wasserstoffspeicher	Hochdruckspeicher 900 bar (ü)	184.481,00 €		
	Niederdruckspeicher	84.000,00 €		
	Gesamtkosten	268.481,00 €		
Elektrolyseur	Elektrolyseur	947.000,00 €		
	Wasserstoffpipeline und Sauerstoffpipeline	72.000,00 €		
	Hauptstromanschluss	69.000,00 €		
	Gesamtkosten	1.088.000,00 €		
weitere Kostenstellen	Tankstelle	Kartenlesegerät	20.000,00 €	
		Überdachung Zapfsäule	33.500,00 €	
	vorbereitende Maßnahmen	Genehmigungskosten	40.000,00 €	
		Fundamente	50.000,00 €	
	Planung	Phase 1	Vorhabensentwurf	9.100,00 €
		Phase 2	vorbereitende Maßnahmen	10.400,00 €
		Phase 3	Detailplanung	21.450,00 €
		Phase 4	Umsetzung und Bau	15.600,00 €
		Phase 5	Baubegleitung	8.450,00 €
	Sicherheitsmaßnahmen	Zaun	2.240,00 €	
		Anfahrerschutz	26.000,00 €	
Gesamtkosten	236.740,00 €			
Gesamtinvestitionskosten		2.363.472,00 €		

Tabelle 1: netto Gesamtinvestitionskosten

Friohheat GmbH

8.2. Zusammenstellung jährliche Kapitalkosten

Es stehen unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung das notwendige Kapital für die Umsetzung des Projektes zu beschaffen, so werden Wasserstoffprojekte wie dieses ebenfalls über Förderungen mitfinanziert. Die Kapitalkosten sind die Kosten, die einem Unternehmen durch den Erwerb von Fremd- und Eigenkapital entstehen, die für Investitionen benötigt werden.

Fremdmittel werden von Fremdmittelgeber ausgehändigt, welche nicht an der Unternehmung beteiligt sind. Es besteht ein Anspruch auf Rückzahlung (Tilgung) und gegebenenfalls auf Zahlung von Zinsen. Die Zinsen sind bei einem Bankdarlehen zurzeit niedrig, was zum Vorteil hat, dass die Kapitalkosten ebenfalls niedrig sind.²⁵ Allerdings verlangen Banken oftmals eine Sicherheit, wo der Unsicherheitsfaktor bei großen Projekten der Wasserstofftechnologie eher negative Auswirkungen auf die Bewilligung eines Bankdarlehens ausübt.

Neben dem Fremdkapital gibt es das Eigenkapital. Eigenkapital bezieht sich auf das Geld, das der Eigentümer selbst für Projekt zur Verfügung stellt. Es können auch private Investoren mit eingebunden werden. Der Nachteil liegt beim hohen Eigenkapitalzins, der in der Regel höher als der Fremdkapitalzins ist. Eine hohe Zinsbelastung des Kapitals kann die Wirtschaftlichkeit des Projektes gefährden.

Für das Projekt in Lindau ist der Investor bereit eine Anschubs Finanzierung zu gewährleisten. Es werden hierfür 16 Jahre und 4% Zinsen gewährleistet für eine Darlehenssumme von 1.000.000,00 €.

Es gibt unterschiedliche Arten, um ein Darlehen zurückzuzahlen. Aus diesem Grund möchten wir zwei Arten vergleichen.

Das Tilgungsdarlehen, auch Abzahlungsdarlehen genannt, gehört mit zu den gängigsten Varianten. Hier nimmt der Zinsanteil ab, während der Tilgungsteil konstant gleich hoch bleibt. Es werden insgesamt 340.000,00 € Zinsen gezahlt. Der Vorteil dieses Darlehens ist die sinkende Zinsbelastung über die Laufzeit und die kontinuierliche abnehmende Restschuld. Der Nachteil liegt bei den hohen finanziellen Belastungen am Anfang.

²⁵ Täglicher Anzeiger. (2021, 02. September). *Sprunghaft ansteigende Inflation lässt Realzins für Ratenkredite ins Negative fallen*. <https://www.tah.de/afpnewssingle/sprunghaft-ansteigende-inflation-l%C3%A4sst-realzins-f%C3%BCr-ratenkredite-ins-negative-fallen>

Alternativ dazu gibt es das Annuitätendarlehen. Hier verändern sich die jährlichen Kreditraten nicht. Die Annuität setzt sich aus einem Zinsanteil und einem Tilgungsanteil zusammen, deren Verhältnis sich mit der Zeit verschieben. Das Annuitätendarlehen gibt dem Kreditnehmer Planungssicherheit und kann das finanzielle Budget für die kommenden Jahre genau kalkulieren. Im Vergleich zur Tilgungszahlung ist keine hohe finanzielle Belastung vorhanden. Allerdings ist die Zinsbelastung in Summe mit 373.119,98 € höher.

$$\text{Annuität} = \text{Zinsanteil} + \text{Tilgungsanteil} = \text{const.}$$

8.3. Zusammenstellung jährlicher Wirtschaftlichkeit

Die Betriebskosten können aufgeteilt werden auf den Elektrolyseur und die Tankstelleneinheit (abgekürzt mit TS). Der Elektrolyseur hat laufende Kosten für Wasser, Strom und Wartung. Die Tankstelle hat laufende Kosten für Strom und Wartung. Die Aufteilung ist besonders wichtig für den Stromverbrauch, aufgrund mehrerer Befreiungen – für den Verbrauch für die Wasserstofferzeugung.²⁶

Die Tankstelle hat mehrere Umsatzquellen, so gehört neben dem Wasserstoff für die Betankung, auch die Rückverstromung, sowie die Wärmerzeugung dazu. Der Wasserstoffpreis für die Mobilität ist von H2 Mobility mit 9,50 € incl. MWST festgelegt. Es gibt auch Anbieter, die über dem Standardmarktpreis den Wasserstoff für 9,99 €/kg anbieten. Es wird erstmal keine Veränderung des Abgabepreises für die nächsten Jahre vermutet.

In den ersten 5 Jahren erhalten Brennstoffzellen eine extra Vergütung für die Eigenstromnutzung von 8 Cent. Aus diesem Grund wird hier mit insgesamt 32 Cent/kWh_{el} gerechnet. Nach den 5 Jahren muss der Zuschlag abgezogen werden, sodass die Kilowattstunde nur noch 24 Cent wert ist. Für das Produkt Wärme kann man bis zu 4 Cent/kWh_{th} erhalten. Wärme ist ein Nebenprodukt der Brennstoffzelle, sowie des Elektrolyseurs und es ist erstrebenswert diesen als Nahwärme verkaufen zu können, hierfür müssen Abnehmer in der Nähe gefunden werden.

²⁶ Handelsblatt. (2021, 01. September). Preisgünstiger Strom für grünen Wasserstoff wird nun Realität. <https://www.handelsblatt.com/technik/klimaneutral-preisguenstiger-strom-fuer-gruenen-wasserstoff-wird-nun-realitaet/27504048.html?ticket=ST-2993492-J3yidRkix04cWeezBGRX-ap6>

Der Wasserstoff kann über mehrere Wege eine Einnahmequelle sein. Zunächst wird geprüft wie viele Regale benötigt werden für die Wasserstoffproduktion. Der modulare Elektrolyseur besitzt drei Regale. Ein Regal erreicht die Produktion von 3,56 kg H₂/h. Für die Überprüfung bezieht sich die Tabelle auf die Prognose, welche weiter oben wiederzufinden ist. Die H₂ Produktion für die Tankstelle zeigt wie viel des produzierten Wasserstoffes an die Tankstelle gelangt. In einer späteren Zeile (Zeile 6 H₂ Bedarf TS+BZ) wird die Brennstoffzelle mit betrachtet. Im Elektrolyseur ist eine Brennstoffzelle installiert für die Notstromfähigkeit, aber auch für die Eigenversorgung mit Strom. Diese benötigt 0,387 kg H₂ für 5 kW_{el} und 7,5 kW_{th}. Die Wärme des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle werden in der Simulation für 4 Cent/kWh verkauft. Der Elektrolyseur produziert 4,545 kWh_{th} bei der Produktion von 1 kg H₂.

Eine Re-Einspeisung wird nicht betrachtet in dieser Simulation. Zwar kann in den ersten 5 Jahren die Kilowattstunde mit 19 Cent bewertet werden, aufgrund eines Zuschlages von 16 Cent, aber die Eigennutzung erzielt deutlich bessere Summen. Nach den 5 Jahren ist von einer Re-einspeisung abzuraten, weil die Erzeugung des Wasserstoffs mehr kostet als die eingespeiste Kilowattstunde an Erlös erzielt.

Die Laufzeit der Stacks ist auf 5000 Stunden begrenzt, wobei in der Politik eine Änderung bezüglich Laufzeitenbegrenzung gibt. Möglicherweise wird sich an dieser Stelle etwas ändern in den nächsten Monaten.²⁷ Sobald die Auslastung eines Regals erreicht wurde, wird ein neues hinzugefügt, deswegen schwanken die Zahlen, anstatt ausschließlich zu steigen. Die Verdichtereinheit orientiert sich an der Wasserstoffproduktion. Die Anlage verdichtet etwa 10,42 kg H₂/h.

Die Sauerstoffproduktion orientiert sich nach der Laufzeit des Elektrolyseurs und den eingesetzten Regalen. Ein Regal produziert stöchiometrisch berechnet etwa 28,29 kg O₂.

Die Betriebskosten ergeben sich aus den Wartungskosten, welche auch die Instandhaltungskosten miteinschließen, den Stromkosten und Wasserkosten. In diesem Fall wird ebenfalls eine Fremdfinanzierung mit aufgenommen in die Kosten. Die Wartungskosten werden mit 3 % der Investitionskosten angesetzt, während Instandhaltungskosten aus Erfahrungswerten mit 17.000,00 € alle 5 Jahre beziffert werden. Es liegt kein Stromvertrag vor, deshalb wird mit den durchschnittlichen Stromkosten gerechnet der Bundesnetzagentur. Die Wasserkosten und Abwasserkosten liegen bei 2 €/m³.

²⁷ Handelsblatt. (2021, 01. September). Preisgünstiger Strom für grünen Wasserstoff wird nun Realität. <https://www.handelsblatt.com/technik/klimaneutral-preisguenstiger-strom-fuer-gruenen-wasserstoff-wird-nun-realitaet/27504048.html?ticket=ST-2993492-J3yidRkix04cWeezBGRX-ap6>

8.4. Wirtschaftlicher Verlauf bei realistischem Verlauf

Im folgenden Kapitel werden die Umsätze, Betriebskosten, sowie das daraus resultierende Betriebsergebnis im Detail für das realistisch angenommen Szenario aufgezeigt. Im nachfolgenden Diagramm erhält man bereits einen ersten Eindruck wie die unterschiedlichen wirtschaftlichen Aspekte zueinanderstehen und sich über die Jahre entwickeln.

8.4.1. Prognostizierter Umsatz

Im ersten Jahr produziert der Elektrolyseur eher Wasserstoff für die Brennstoffzelle als für die Tankstelle, das ist auf die noch geringe Wasserstoffabnahme zurückzuführen. Das Einsetzen der Brennstoffzelle ist eine Übergangslösung für die Nutzung des Wasserstoffes, solange die Wasserstoffabnahme durch die Tankstelle vorab gering ist. Die Brennstoffzelle stellt eine stabile Umsatzeinnahme im System dar durch die Stromproduktion, sowie die Wärmeerzeugung wie in der Tabelle deutlich wird. Die Brennstoffzelle erreicht in der maximalen Auslastung eine Produktion von 25.000 kWh_{el} und 37.500 kWh_{th}. Zusätzlich wird Wärme über den Elektrolyseur erzeugt, deshalb steigt die Wärmeproduktion mit der Wasserstoffproduktion. Die Sauerstoffproduktion ist ebenfalls an der Wasserstoffproduktion gekoppelt. Eine Nutzung des Sauerstoffs ist positiv zu bewerten, allerdings muss ein genauer Abnehmer bestimmt werden, wie in diesem Beispielprojekt die Kläranlage. Eine genaue Wertung des Sauerstoffs wird an dieser Stelle nach Angaben des Kunden getätigt.

		Umsatz								
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Regal	#	1	1	1	2	2	2	3	3	
H2 Produktion für Tankstelle	[kg]	2.333	6.713	7.836	19.792	22.809	27.083	42.680	50.729	
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	64.948	131.608	148.692	165.315	188.269	220.796	226.311	267.139	
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	
H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	4.268	8.648	9.771	21.727	24.744	29.019	44.615	52.664	
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0	
Laufzeit EL	[h/a]	1.197,40	2.426,37	2.741,33	3.047,80	3.471,00	4.070,66	4.172,35	4.925,06	
Laufzeit TS	[h/a]	223,94	644,47	752,24	1.900,00	2.189,62	2.600,01	4.097,28	4.869,97	
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	33.877,95	68.649,24	77.560,41	172.462,74	196.410,00	230.342,80	354.145,36	418.034,74	

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	18.615,35	53.571,64	62.530,22	157.937,46	182.012,14	216.125,47	340.586,71	404.816,01
Erlös Sauerstoff		50,82	102,97	116,34	258,69	294,62	345,51	531,22	627,05
Erlös Nutzwärme	[€/a]	4.097,90	6.764,31	7.447,66	8.112,59	9.030,78	10.331,83	10.552,46	12.185,56
Erlös Gesamt	[€/a]	30.713,26	68.335,95	77.977,88	174.050,05	199.042,92	232.457,30	357.139,17	423.001,57

		Umsatz							
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	3	3	3	3	3	3	3	3
H2 Produktion für Tankstelle	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	-	-	-	-	-	-	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47
Erlös Sauerstoff		636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59
Erlös Nutzwärme	[€/a]	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	437.501,61							

Tabelle 2: prognostizierter Umsatz bei realistischem Markthochlauf

Die höchsten Erlöse werden mit der Tankstelle erzielt. Zunächst liegen diese bei etwa 16.800€, aber diese steigen sehr stark über die Jahre, sodass am Ende der Laufzeit 426.000€ erzielt werden. Es handelt sich um eine über 24-fache Steigerung. Ein noch höherer Erlös könnte erzielt werden, wenn der Betreiber sich dazu entscheidet, den Kilogramm Preis für Wasserstoff nicht bei 9,50 € anzusetzen wie es der Markt durch H2Mobility ansetzt, sondern bei 9,99€. Ein noch höherer Preis wäre theoretisch ebenfalls denkbar, allerdings können Zapfsäulen in der Regel keinen Zweistelligen Betrag vor dem Komma anzeigen, weshalb hier eine Einschränkung vorliegt.

8.4.2. Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten

Die Betriebskosten steigen über die Jahre infolge von steigenden variablen Kosten. Vergleicht man die Kostenstruktur am Anfang der Betriebszeit 2024 mit dem Ende der Betriebszeit 2039 sieht man die Veränderung der Kostenstruktur deutlich. Während am Anfang die größten Kosten durch das Kapital und dem Personal entstehen, sind am Ende eher die Stromkosten die größte Kostenstelle.

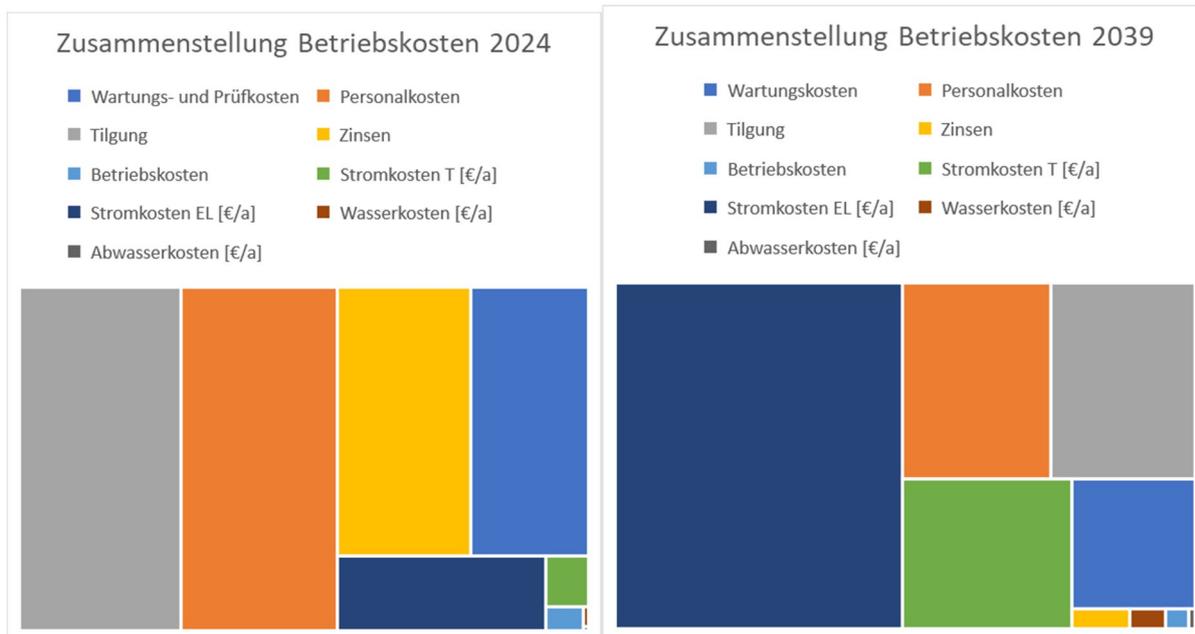


Abbildung 8: Zusammenstellung Betriebskosten 2024

Abbildung 9: Zusammenstellung Betriebskosten 2039

Nimmt man die Kapitalkosten aus der Betrachtung raus ist die Zusammenstellung der Betriebskosten unter anderen Aspekten interessant. Die Wartungskosten sollen über einen Wartungsvertrag festgelegt werden. Je nach Hersteller sind diese auf das Jahr festgelegt oder vom Wasserstoffdurchfluss abhängig. In dieser Simulation wird von einem festen Vertrag ausgegangen. Somit muss ein Kilogramm Wasserstoff am Anfang der Laufzeit einen höheren Anteil der fixen Kosten decken als im Verlauf der Zeit. Die Kostenzusammensetzung aus dem Jahr 2039 entspricht der klassischen Betriebskostenzusammensetzung einer integrierten Elektrolyse-Kompressoranlage.²⁸

²⁸ Peters, Stefanie. (2021, 31. August). *Marktgeschehen und Herausforderungen bei dem Markthochlauf* [Live-Webinar]. Wasserstoff - Chancen für die Wirtschaft in NRW

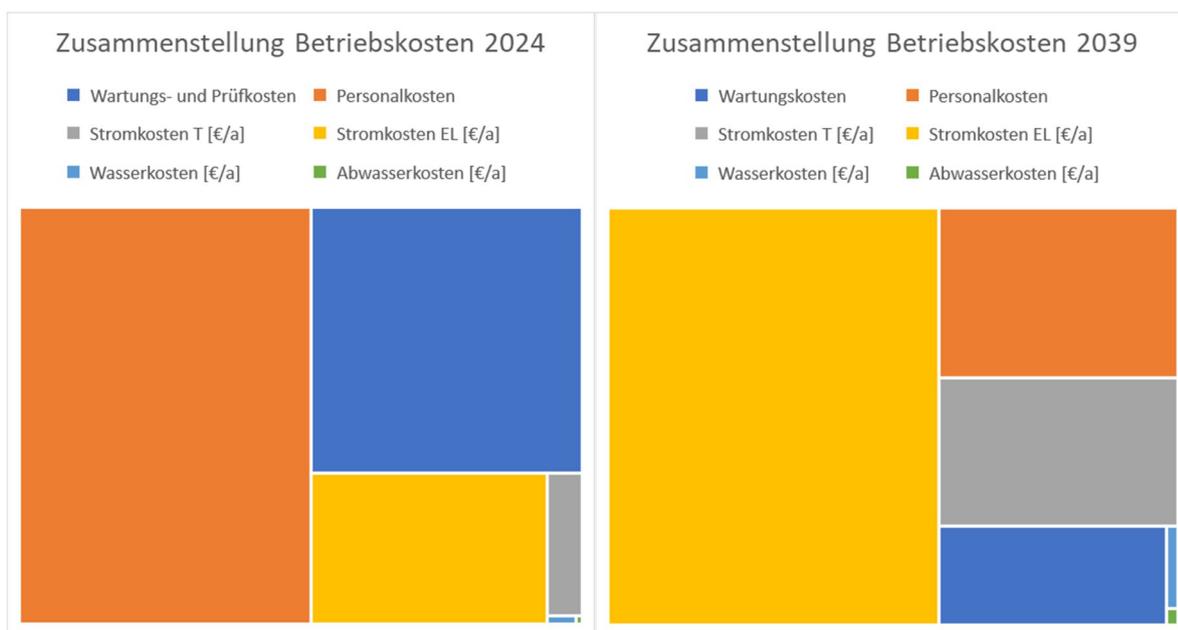


Abbildung 10: Zusammenstellung der Betriebskosten 2024 unter Vernachlässigung der Kapitalkosten

Abbildung 11: Zusammenstellung der Betriebskosten 2039 unter Vernachlässigung der Kapitalkosten

Die Betriebskosten steigen jährlich. Am Anfang liegen diese bei etwa 219.000€ und sind mit 462.000€ im Jahr 2038 am höchsten. Somit verdoppeln sich die jährlichen Ausgaben nach 15 Jahren, obwohl die Steigerung der Wasserstoffmenge beim Faktor 13 liegen. Anhand dieser Zahlen wird deutlich, dass hohe Gemeinkosten anfallen, welche sich besser aufteilen lassen auf die Wasserstoffmenge. Die Spitzen im Verlauf der Betriebskosten sind auf die Prüfkosten zurückzuführen, welche alle 5 Jahre anfallen.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Wasserstoffproduktion [kg]	4.268	8.648	9.771	21.727	24.744	29.019	44.615	52.664	
EL	Wasser [kg/a]	61.556,89	124.736,99	140.928,76	313.368,11	356.880,75	418.537,30	643.488,93	759.577,17
	Wasserkosten	123,11 €	249,47 €	281,86 €	626,74 €	713,76 €	837,07 €	1.286,98 €	1.519,15 €
	Stromverbrauch	231.496,48	469.097,33	529.989,58	1.178.480,75	1.342.118,37	1.573.989,60	2.419.963,26	2.856.535,30
Tankstelle	Stromverbrauch	14.321,23	41.213,91	48.105,96	121.504,97	140.026,18	166.270,36	262.021,30	311.434,39
Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	
Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	
Zinsen	40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	32.500,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €	22.500,00 €	
Personalkosten	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	
laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a]	12311,38	24947,40	28185,75	62673,62	71376,15	83707,46	128697,79	151915,43	
Abwasserkosten	24,62 €	49,89 €	56,37 €	125,35 €	142,75 €	167,41 €	257,40 €	303,83 €	
Strom gesamt	245.817,70	510.311,24	578.095,53	1.299.985,72	1.482.144,55	1.740.259,96	2.681.984,55	3.167.969,69	
Stromkosten a	19.937,17 €	42.474,24 €	48.250,04 €	109.761,14 €	125.282,60 €	147.276,20 €	227.519,04 €	268.929,06 €	
Betriebskosten	219.062,11 €	239.250,81 €	242.565,46 €	301.990,42 €	333.616,32 €	336.257,89 €	414.540,62 €	453.729,24 €	

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Wasserstoffproduktion [kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
EL	Wasser [kg/a]	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46
Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen	20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €	2.500,00 €
Personalkosten	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €
laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten								
Abwassermenge [kg/a]	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96
Abwasserkosten	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €
Strom gesamt	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46
Stromkosten a	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €
Betriebskosten	458.938,10 €	473.438,10 €	453.938,10 €	451.438,10 €	450.514,04 €	448.014,04 €	462.514,04 €	443.014,04 €

Tabelle 3: Betriebskosten bei realistischem Markthochlauf

8.4.3. Entwicklung des Betrieb Ergebnisses

Für die Entwicklung des Betriebsergebnisses muss der Kapitalwert einer Investition betrachtet werden. Dieser ist der reale Wert der Investition zum heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Barwert gibt an, welchen Kapitalwert die Investition zum heutigen Zeitpunkt hat. Der Barwert ergibt sich durch die Abzinsung (Diskontierung) aller jährlichen Einnahmeüberschüsse oder -unterdeckungen auf den heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Abzinsungsfaktor oder Diskontierungsfaktor ist ein festzulegender Kapitalzinsfuß.

Die Verluste sind sehr hoch und sind bis 2029 bei 100.000€ bzw. darüber hinaus. Erst ab 2030 bewegen diese sich unter 50.000€. Indem Jahr ist der Verlust halbiert worden zum Vorjahr. Das Betriebsergebnis ist trotz dessen zu keinem Zeitpunkt positiv. Dieser nähert sich zwar an den Wert Null, doch überschreitet diesen nicht. Es muss eine Deckung der Verluste gewährleistet werden, damit die Tankstelle weiter betrieben wird. Sie kann sich nicht autark halten.

8.5. Wirtschaftlicher Verlauf bei optimistischem Verlauf

Im folgenden Kapitel werden die Umsätze, Betriebskosten, sowie das daraus resultierende Betriebsergebnis im Detail für das optimistisch angenommene Szenario aufgezeigt. Im nachfolgenden Diagramm erhält man bereits einen ersten Eindruck wie die unterschiedlichen wirtschaftlichen Aspekte zueinanderstehen und sich über die Jahre entwickeln.

8.5.1. Prognostizierter Umsatz

Das Einsetzen der Brennstoffzelle ist eine Übergangslösung für die Nutzung des Wasserstoffes, solange die Wasserstoffabnahme durch die Tankstelle vorab gering ist. Aber bereits nach dem ersten Jahr ist eine hohe Wasserstoffabnahme zu erwarten. Nach dem ersten Jahr wird die Wasserstoffproduktion für die Brennstoffzelle reduziert. Eine Erweiterung der Elektrolyseeinheit für eine höhere Wasserstoffproduktion ist nicht sinnvoll, wenn es sich ausschließlich um die Deckung des Wasserstoffbedarfs für die Brennstoffzelle handelt. Deshalb wird die Wasserstoffproduktion für die Brennstoffzelle reduziert. Nach dem zweiten Jahr wird die Wasserstoffproduktion bereits erweitert und auch die Brennstoffzelle wird wieder vollausgelastet.

2030 ist der Elektrolyseur an seine Grenzen der Modularität angekommen. Eine Erweiterung der Wasserstoffproduktion über eine neue Elektrolyseeinheit oder einer anderen Wasserstoffquelle kann in Erwägung gezogen werden. Der Elektrolyseur erreicht neben der Wasserstoffmenge von 53.465 kg H₂ eine Wärmemenge von 271.204 kWh_{th}.

Eine Nutzung des Sauerstoffs ist positiv zu bewerten, allerdings muss ein genauer Abnehmer bestimmt werden, wie in diesem Beispielprojekt die Kläranlage. Eine genaue Wertung des Sauerstoffs wird an dieser Stelle nach Angaben des Kunden getätigt. Es wird eine maximale Sauerstoffproduktion von 424.395,51 kg im Jahr erreicht. Dies entspricht einem Volumenstrom von 84,88 kg/h.

Umsatz									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Regal	#	1	1	2	2	2	3	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	15.117	16.038	20.322	35.372	34.777	42.987	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	259.497	271.204	169.346	271.204	271.204	227.871	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	34.575	37.500	5.254	16.792	37.500	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	23.050	25.000	3.503	11.194	25.000	0	0
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	17.053	17.822	22.257	35.644	35.644	44.923	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	4.784,18	5.000,00	3.122,12	5.000,00	5.000,00	4.201,10	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	1.451,26	1.539,60	1.950,86	3.395,75	3.338,59	4.126,80	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	135.358,92	141.465,17	176.668,47	282.930,34	282.930,34	356.585,78	424.395,51	424.395,51

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	7.375,95	8.000,00	1.120,95	3.582,23	6.000,00	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	120.636,24	127.979,62	162.165,57	282.271,80	277.520,66	343.040,12	426.653,47	426.653,47
Erlös Nutzwärme	[€/a]	11.879,90	12.231,14	8.273,84	11.058,33	11.519,82	10.614,84	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	140.516,14	147.586,71	178.439,42	294.451,08	292.622,71	359.654,95	437.501,61	437.501,61

Umsatz									
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	3	3	3	3	3	3	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	-	-	-	-	-	-	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47
Erlös Nutzwärme	[€/a]	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	437.501,61							

Tabelle 4: prognostizierter Umsatz bei optimistischem Markthochlauf

Die höchsten Erlöse werden mit der Tankstelle erzielt. Zunächst liegen diese bei etwa 120.600€, aber diese steigen sehr stark über die Jahre, sodass bereits 2030 etwa 426.000€ erzielt werden. Es handelt sich um eine über 4-fache Steigerung innerhalb von 7 Jahren. Ein noch höherer Erlös könnte erzielt werden, wenn der Betreiber sich dazu entscheidet, den Kilogramm Preis für Wasserstoff nicht bei 9,50 € anzusetzen wie es der Markt durch H2Mobility ansetzt, sondern bei 9,99€. Ein noch höherer Preis wäre theoretisch ebenfalls denkbar, allerdings können Zapfsäulen in der Regel keinen Zweistelligen Betrag vor dem Komma anzeigen, weshalb hier eine Einschränkung vorliegt.

8.5.2. Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten

Die Betriebskosten steigen über die Jahre, infolge von variablen Kosten. Die Stromkosten machen unabhängig von den Markthochläufen den größten Kostenfaktor. Das Maximum der jährlichen Betriebskosten liegt bei etwa 462.000 €. 2033 und 2038 ist wieder eine kurze Ansteigerung wiederzufinden, welche auf die Prüfungskosten alle 5 Jahre zurückzuführen ist.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Wasserstoffproduktion [kg]	17.053	17.822	22.257	35.644	35.644	44.923	53.465	53.465	
EL	Wasser [kg/a]	245.949,76	257.044,94	321.010,01	514.089,87	514.089,87	647.923,23	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	491,90 €	514,09 €	642,02 €	1.028,18 €	1.028,18 €	1.295,85 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	924.941,16	966.666,67	1.207.219,57	1.933.333,33	1.933.333,33	2.436.639,28	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	92.808,27	98.457,71	124.757,76	217.158,28	213.503,12	263.908,76	328.234,46	328.234,46
	Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
	Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
	Zinsen	40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	30.000,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €	22.500,00 €
	Personalkosten	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €
	laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
	Mietkosten								
	Abwassermenge [kg/a]	49.189,95	51.408,99	64.202,00	102.817,97	102.817,97	129.584,65	154.226,96	154.226,96
	Abwasserkosten [€/a]	98,38 €	102,82 €	128,40 €	205,64 €	205,64 €	259,17 €	308,45 €	308,45 €
	Strom gesamt	1.017.749,43	1.065.124,37	1.331.977,33	2.150.491,61	2.146.836,45	2.700.548,04	3.228.234,46	3.228.234,46
	Stromkosten a	85.712,24 €	89.827,66 €	112.487,09 €	183.098,62 €	182.476,88 €	229.100,81 €	275.072,68 €	275.072,68 €
	Betriebskosten	285.181,34 €	286.818,95 €	307.106,31 €	375.604,00 €	390.982,26 €	418.373,86 €	462.092,15 €	459.592,15 €

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Wasserstoffproduktion [kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
EL	Wasser [kg/a]	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46
	Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
	Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
	Zinsen	20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €
	Personalkosten	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €
	laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
	Mietkosten							
	Abwassermenge [kg/a]	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96
	Abwasserkosten [€/a]	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €
	Strom gesamt	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46
	Stromkosten a	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €
	Betriebskosten	458.629,65 €	473.129,65 €	453.629,65 €	451.129,65 €	450.205,59 €	447.705,59 €	462.205,59 €

Tabelle 5: Betriebskosten bei optimistischem Verlauf

8.5.3. Entwicklung des Betrieb Ergebnisses

Für die Entwicklung des Betriebsergebnisses muss der Kapitalwert einer Investition betrachtet werden. Dieser ist der reale Wert der Investition zum heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Barwert gibt an, welchen Kapitalwert die Investition zum heutigen Zeitpunkt hat. Der Barwert ergibt sich durch die Abzinsung (Diskontierung) aller jährlichen Einnahmeüberschüsse oder -unterdeckungen auf den heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Abzinsungsfaktor oder Diskontierungsfaktor ist ein festzulegender Kapitalzinsfuß.

Im Jahr 2027 sinkt der Verlust sehr stark und ab 2030 bewegt dieser sich in einem Bereich von 20.000€. Allerdings ist Betriebsergebnis zu keinem Zeitpunkt positiv. Dieser nähert sich zwar an den Wert Null, doch überschreitet diesen nicht. Es muss eine Deckung der Verluste gewährleistet werden, damit die Tankstelle weiter betrieben wird. Sie kann sich nicht autark halten.

Jahr	Jahresanzahl	Abzinsungsfaktor (1+i)^n	Einzahlung	Auszahlung	Überschuss	Barwert
2024	1	0,9804	140.516,14 €	285.181,34 €	- 144.665,20 €	- 141.828,63 €
2025	2	0,9612	147.586,71 €	286.818,95 €	- 139.232,24 €	- 133.825,68 €
2026	3	0,9423	178.439,42 €	307.106,31 €	- 128.666,90 €	- 121.245,69 €
2027	4	0,9238	294.451,08 €	375.604,00 €	- 81.152,92 €	- 74.972,75 €
2028	5	0,9057	292.622,71 €	390.982,26 €	- 98.359,55 €	- 89.087,27 €
2029	6	0,8880	359.654,95 €	418.373,86 €	- 58.718,90 €	- 52.140,70 €
2030	7	0,8706	437.501,61 €	462.092,15 €	- 24.590,54 €	- 21.407,54 €
2031	8	0,8535	437.501,61 €	459.592,15 €	- 22.090,54 €	- 18.854,06 €
2032	9	0,8368	437.501,61 €	458.629,65 €	- 21.128,04 €	- 17.679,00 €
2033	10	0,8203	437.501,61 €	473.129,65 €	- 35.628,04 €	- 29.227,40 €
2034	11	0,8043	437.501,61 €	453.629,65 €	- 16.128,04 €	- 12.971,18 €
2035	12	0,7885	437.501,61 €	451.129,65 €	- 13.628,04 €	- 10.745,61 €
2036	13	0,7730	437.501,61 €	450.205,59 €	- 12.703,97 €	- 9.820,59 €
2037	14	0,7579	437.501,61 €	447.705,59 €	- 10.203,97 €	- 7.733,34 €
2038	15	0,7430	437.501,61 €	462.205,59 €	- 24.703,97 €	- 18.355,42 €
2039	15	0,7430	437.501,61 €	442.705,59 €	- 5.203,97 €	- 3.866,63 €

Tabelle 6: Kapitalwert des optimistischen Betrieb Ergebnisses mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2 %

8.6. Wirtschaftlicher Verlauf bei pessimistischem Verlauf

Im folgenden Kapitel werden die Umsätze, Betriebskosten, sowie das daraus resultierende Betriebsergebnis im Detail für das pessimistisch angenommenen Szenario aufgezeigt. Im nachfolgenden Diagramm erhält man bereits einen ersten Eindruck wie die unterschiedlichen wirtschaftlichen Aspekte zueinanderstehen und sich über die Jahre entwickeln.

8.6.1. Prognostizierter Umsatz

Das Einsetzen der Brennstoffzelle ist eine zusätzliche Lösung für die Nutzung des Wasserstoffes, wenn die Wasserstoffabnahme durch die Tankstelle nicht die volle Auslastung erreicht. Die Brennstoffzelle produziert sowohl Wärme als auch Strom, welcher genutzt werden kann. Es handelt sich um eine stabile zusätzliche Einnahme, die über die Jahre erwartet werden kann.

Der Elektrolyseur erzeugt ebenfalls Wärme, welche an der Wasserstoffherzeugung gekoppelt ist, deshalb steigt die Wärmeproduktion mit der Wasserstoffproduktion. Die Sauerstoffproduktion ist ebenfalls an der Wasserstoffproduktion gekoppelt. Eine Nutzung des Sauerstoffs ist positiv zu bewerten, allerdings muss ein genauer Abnehmer bestimmt werden, wie in diesem Beispielprojekt die Kläranlage. Eine genaue Wertung des Sauerstoffs wird an dieser Stelle nicht getätigt.

Der Elektrolyseur erreicht in diesem Szenario nicht seine Grenzen der Modularität. Die maximale Auslastung liegt bei 38.052 kg H₂, was 15.400 kg H₂ weniger sind als in der Theorie möglich. Hier müsste abgewogen werden, ob die Erweiterung im Jahr 2038 für ein weiteres Regal sinnvoll ist. Grund dafür sind die anderen Komponenten der Tankstelle, welche zu dem Zeitpunkt bereits 13 Betriebsjahre besitzen.

		Umsatz								
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Regal	#	1	1	1	1	1	1	1	2	
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	2.116	5.908	6.107	8.192	10.278	13.119	16.903	18.422	
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	61.648	119.353	122.378	154.117	185.857	229.083	271.204	154.896	
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	17.810	37.500	
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	11.873	25.000	
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	4.051	7.843	8.042	10.128	12.213	15.054	17.822	20.358	
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0	
Laufzeit EL	[h/a]	1.136,56	2.200,42	2.256,19	2.841,36	3.426,53	4.223,45	5.000,00	2.855,71	
Laufzeit TS	[h/a]	203,13	567,16	586,24	786,47	986,70	1.259,40	1.622,66	1.768,55	
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	32.156,65	62.256,68	63.834,54	80.390,70	96.946,85	119.494,32	141.465,17	161.593,61	

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	6.000,00	2.849,54	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	16.884,89	47.145,07	48.731,32	65.375,56	82.019,80	104.687,24	134.883,66	147.010,51
Erlös Nutzwärme	[€/a]	3.965,91	6.274,11	6.395,10	7.664,70	8.934,29	10.663,33	11.560,53	7.695,84
Erlös Gesamt	[€/a]	28.850,80	61.419,17	63.126,43	81.040,26	98.954,10	121.350,57	149.293,73	160.706,35

		Umsatz							
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	2	2	2	2	2	2	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	21.640	24.103	26.189	28.803	31.493	34.333	35.664	38.052
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	179.380	198.122	213.992	233.882	254.346	271.204	190.724	202.836
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	25.389	37.500	37.500
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	16.926	25.000	25.000
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	23.575	26.039	28.124	30.738	33.428	35.644	37.600	39.987
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	3.307,12	3.652,64	3.945,22	4.311,92	4.689,21	5.000,00	3.516,25	3.739,54
Laufzeit TS	[h/a]	2.077,47	2.313,93	2.514,16	2.765,11	3.023,31	3.296,00	3.423,78	3.652,99
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	187.136,74	206.688,55	223.244,71	243.994,78	265.343,99	282.930,34	298.456,30	317.408,98

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00	4.062,20	6.000,00	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	172.689,54	192.345,37	208.989,61	229.850,09	251.312,88	273.980,32	284.601,36	303.654,88
Erlös Nutzwärme	[€/a]	8.675,22	9.424,88	10.059,67	10.855,28	11.673,85	11.863,70	9.128,96	9.613,42
Erlös Gesamt	[€/a]	187.364,75	207.770,25	225.049,29	246.705,36	268.986,73	289.906,22	299.730,32	319.268,30

Tabelle 7: Umsatzerlöse bei pessimistischem Markthochlauf

Die höchsten Erlöse werden mit der Tankstelle erzielt. Zunächst liegen diese bei etwa 16.800€, aber diese steigen weniger stark als in den anderen Szenarien über die Jahre, sodass am Ende der Laufzeit nicht die maximalen 426.000€ erzielt werden, sondern nur 303.600€. Es handelt sich um eine über 18-fache Steigerung. Ein höherer Erlös könnte erzielt werden, wenn der Betreiber sich dazu entscheidet, den Kilogramm Preis für Wasserstoff nicht bei 9,50 € anzusetzen wie es der Markt durch H2Mobility ansetzt, sondern bei 9,99€. Ein noch höherer Preis wäre theoretisch ebenfalls denkbar, allerdings können Zapfsäulen in der Regel keinen Zweistelligen Betrag vor dem Komma anzeigen, weshalb hier eine Einschränkung vorliegt.

Die Erlöse sind im Vergleich zu den anderen zwei Szenarien deutlich niedriger. Außerdem erreichen die anderen Szenarien eine Vollauslastung des Elektrolyseurs und die Brennstoffzelle wird nur noch als Notstromaggregat nach wenigen Jahren verwendet, da ein höherer Gewinn über den Vertrieb der Tankstelle erzielt wird. Doch dies wird nicht bei einem pessimistischem Markthochlauf erzielt.

8.6.2. Zusammenstellung jährlicher Betriebskosten

Die Betriebskosten steigen jährlich. Am Anfang liegen diese bei etwa 217.900€ und sind mit 370.900€ im Jahr 2038 am höchsten. Die Steigung der Wasserstoffmenge liegt beim Faktor 10, obwohl die Kosten nur annähernd um das Doppelte steigen. Anhand dieser Zahlen wird deutlich, dass hohe Gemeinkosten anfallen, welche sich besser aufteilen lassen auf die Wasserstoffmenge. Die Spitzen im Verlauf der Betriebskosten sind auf die Prüfkosten zurückzuführen, welche alle 5 Jahre anfallen.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Wasserstoffproduktion [kg]	4.051	7.843	8.042	10.128	12.213	15.054	17.822	20.358
EL	Wasser [kg/a]	58.429,26	113.121,59	115.988,59	146.071,44	176.154,29	217.123,48	293.618,69
	Wasserkosten	116,86 €	226,24 €	231,98 €	292,14 €	352,31 €	434,25 €	587,24 €
	Stromverbrauch	219.734,40	425.415,38	436.197,29	549.329,61	662.461,92	816.534,40	966.666,67
	Abschreibung	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €
Tankstelle	Stromverbrauch	12.989,94	36.269,80	37.490,14	50.294,94	63.099,75	80.538,33	103.769,14
	Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
	Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
	Zinsen	40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	32.500,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €
	Personalkosten	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €
	laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
	Mietkosten							
	Abwassermenge [kg/a]	11.685,85	22.624,32	23.197,72	29.214,29	35.230,86	43.424,70	51.408,99
	Abwasserkosten [€/a]	23,37 €	45,25 €	46,40 €	58,43 €	70,46 €	86,85 €	102,82 €
	Strom gesamt	232.724,34	461.685,18	473.687,43	599.624,55	725.561,67	897.072,73	1.070.435,81
	Stromkosten a	18.821,51 €	38.330,90 €	39.353,59 €	50.084,49 €	60.815,39 €	75.429,57 €	90.731,13 €
	Betriebskosten	217.915,57 €	235.034,34 €	233.562,77 €	241.853,83 €	268.644,90 €	263.841,02 €	286.280,73 €

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	
Wasserstoffproduktion [kg]	23.575	26.039	28.124	30.738	33.428	35.644	37.600	39.987	
EL	Wasser [kg/a]	340.031,05	375.557,07	405.639,92	443.343,21	482.135,13	514.089,87	542.300,83	576.738,22
	Wasserkosten	680,06 €	751,11 €	811,28 €	886,69 €	964,27 €	1.028,18 €	1.084,60 €	1.153,48 €
	Stromverbrauch	1.278.751,84	1.412.354,23	1.525.486,55	1.667.276,98	1.813.161,43	1.933.333,33	2.039.426,06	2.168.934,44
Abschreibung	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	
Tankstelle	Stromverbrauch	132.854,09	147.975,78	160.780,58	176.829,03	193.340,86	210.779,44	218.950,46	233.608,78
Wartungs- und Prüfkosten	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	
Tilgung	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	
Zinsen	20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €	2.500,00 €	
Personalkosten	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €	
laufende Betriebskosten	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a€]	68.006,21	75.111,41	81.127,98	88.668,64	96.427,03	102.817,97	108.460,17	115.347,64	
Abwasserkosten [€/a]	136,01 €	150,22 €	162,26 €	177,34 €	192,85 €	205,64 €	216,92 €	230,70 €	
Strom gesamt	1.411.605,92	1.560.330,01	1.686.267,13	1.844.106,01	2.006.502,28	2.144.112,78	2.258.376,52	2.402.543,21	
Stromkosten a	119.272,12 €	131.944,66 €	142.675,56 €	156.124,76 €	169.962,28 €	182.013,58 €	191.424,08 €	203.708,30 €	
Betriebskosten	301.966,88 €	329.210,47 €	320.501,54 €	331.526,14 €	344.517,19 €	354.132,40 €	378.099,32 €	370.952,41 €	

Tabelle 8: jährliche Betriebskosten bei pessimistischem Markthochlauf

8.6.3. Entwicklung des Betrieb Ergebnisses

Für die Entwicklung des Betriebsergebnisses muss der Kapitalwert einer Investition betrachtet werden. Dieser ist der reale Wert der Investition zum heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Barwert gibt an, welchen Kapitalwert die Investition zum heutigen Zeitpunkt hat. Der Barwert ergibt sich durch die Abzinsung (Diskontierung) aller jährlichen Einnahmeüberschüsse oder -unterdeckungen auf den heutigen Betrachtungszeitpunkt. Der Abzinsungsfaktor oder Diskontierungsfaktor ist ein festzulegender Kapitalzinsfuß.

Die Verluste sind im ersten Jahr am höchsten und fallen anschließend. Jedoch ist die Senkung der Verluste nur niedrig. 2032 sind diese erstmals unter 100.000€. Es muss eine Deckung der Verluste gewährleistet werden, damit die Tankstelle weiter betrieben wird. Sie kann sich nicht autark halten. Die Näherung zu Null ist nur in geringen Maßen vorhanden.

Jahr	Jahresanzahl	Abzinsungsfaktor (1+i)^n	Einzahlung	Auszahlung	Überschuss	Barwert
2024	1	0,9804	28.850,80 €	217.915,57 €	- 189.064,77 €	- 185.357,61 €
2025	2	0,9612	61.419,17 €	235.034,34 €	- 173.615,16 €	- 166.873,48 €
2026	3	0,9423	63.126,43 €	233.562,77 €	- 170.436,34 €	- 160.605,97 €
2027	4	0,9238	81.040,26 €	241.853,83 €	- 160.813,57 €	- 148.566,88 €
2028	5	0,9057	98.954,10 €	268.644,90 €	- 169.690,80 €	- 153.694,19 €
2029	6	0,8880	121.350,57 €	263.841,02 €	- 142.490,45 €	- 126.527,44 €
2030	7	0,8706	149.293,73 €	276.722,42 €	- 127.428,69 €	- 110.934,34 €
2031	8	0,8535	160.706,35 €	286.280,73 €	- 125.574,39 €	- 107.176,53 €
2032	9	0,8368	187.364,75 €	301.966,88 €	- 114.602,13 €	- 95.893,93 €
2033	10	0,8203	207.770,25 €	329.210,47 €	- 121.440,23 €	- 99.623,28 €
2034	11	0,8043	225.049,29 €	320.501,54 €	- 95.452,25 €	- 76.768,72 €
2035	12	0,7885	246.705,36 €	331.526,14 €	- 84.820,78 €	- 66.880,61 €
2036	13	0,7730	268.986,73 €	344.517,19 €	- 75.530,46 €	- 58.387,50 €
2037	14	0,7579	289.906,22 €	354.132,40 €	- 64.226,18 €	- 48.675,42 €
2038	15	0,7430	299.730,32 €	378.099,32 €	- 78.369,00 €	- 58.229,32 €
2039	15	0,7430	319.268,30 €	370.952,41 €	- 51.684,11 €	- 38.402,06 €

Tabelle 9: Kapitalwert des pessimistischem Betrieb Ergebnisses mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 2 %

9. Handlungsempfehlung

Eine Wasserstofftankstelle am Standort Lindau ist nach Durchführung der Machbarkeitsstudie unter den gegebenen Rahmenbedingungen als weniger sinnvoll einzuschätzen. Die Tankstelle wäre am Autobahnzubringer der A96 Abfahrt Lindau, welche eine wichtige Verbindungsautobahn zwischen München, dem Bodensee und fortlaufend als A14 nach Österreich darstellt. Durch diese überregionale Anbindung des Standortes und die wichtige Positionierung im Nord-Süd Verkehr wäre die Umsetzung der Wasserstofftankstelle von überregionalem Interesse. Deshalb ist selbst im optimistischen Szenario eine Unterschätzung des Absatzes möglich. Wie sich der Markt tatsächlich entwickelt, wenn die ersten Massenproduktionen von LKW beginnen, sei für den Standort sehr entscheidend.

Um eine bessere Wirtschaftlichkeit darzustellen, wird die Zusammenarbeit mit einem bestehenden Tankstellenbetreiber empfohlen. Auf diese Weise können bestimmte Kosten wie zum Beispiel Personalkosten auf mehrere Kostenstellen übertragen werden und nicht nur auf den Energieträger Wasserstoff.

Der entscheidende Faktor liegt allerdings am Ende an den Stromkosten. Es ist sehr wichtig grünen Strom zu beziehen oder sogar selbst zu produzieren. Zurzeit ist der günstigste Strom über Photovoltaik zu erzielen. Deshalb wird der Ausbau von eigenen Photovoltaikanlagen empfohlen. Alternativ könnte man eine Windkraftanlage bauen, doch diese ist mit hohen Investitionskosten, sowie Genehmigungen verbunden bei höheren Stromgestehungskosten im Vergleich zu Photovoltaik. Grüner Strom selbst produziert verhindert jedoch nicht die Tatsache, dass man immer noch darauf angewiesen ist, Strom aus dem Netz zu beziehen, weil die Sonnenscheinstunden oder windreichen Stunden über das Jahr gesehen zu gering sind. Unsere Empfehlung ist immer noch, grünen Strom aus Wasserkraftwerken zu nutzen, da dieser über 8.760 h/a zur Verfügung steht. Jedoch steht die Entwicklung des Strompreises für EE-Strom dem Ganzen gegenüber. Dieser entwickelt sich derzeit kontraproduktiv zu der notwendigen Transformation zur Klimaneutralität von Industrie und Mobilität hin.

An dieser Stelle ist auch auf politischer Seite noch sehr viel Verbesserungspotential zu sehen, weil die Anlagenteile der Tankstelleneinheit nicht unter den Regularien der Strombefreiung fallen und eine maximale Betriebsstundenzahl des Elektrolyseurs festgelegt ist. Diese ist nicht sinnvoll, weil am Standort Wasserkraft vorhanden ist, welche eine grüne, kontinuierliche Versorgung an Strom bereitstellt. Zudem sollte vom marktüblichen Verkaufspreis abgewichen werden. Grünen Wasserstoff für einen höheren Preis zu verkaufen ist an dieser Stelle sinnvoll und wird von anderen Tankstellen ebenfalls angeboten.

Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyseure müssen mit Ausnahme von geplanten Wartungsfenstern rund um die Uhr betrieben werden, damit sie sich wirtschaftlich darstellen lassen. Das derzeitige EEG 2021 erlaubt das nicht. Hier hat man zu sehr auf die PV und Windkrafttechnik geschielt, die bei weitem nicht auf diese Betriebsstundenzahlen kommen. Das EEG muss an dieser Stelle zwingend korrigiert werden.

Strom aus Blockheizkraftwerken zu nutzen macht unter dem Aspekt des elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW und unter dem Aspekt des Wirkungsgrades der Elektrolyse auch keinen wirtschaftlichen Sinn: ein BHKW hat im Mittel einen elektr. Wirkungsgrad von ca. 35% und ein Elektrolyseur von etwa 70%. Beides zusammen betrachtet reduziert theoretisch massiv den Wirkungsgrad des Systems. Von solchen Konzepten ist abzuraten und der Strom besser direkt zu vermarkten.

Außerdem sollte der Betreiber die feste Abnahme von Wasserstoff sicherstellen, indem er Akteure wie die Stadtwerke oder Spediteure vom Kauf von Brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen überzeugt. Zwar legt das CVD bereits die richtigen Rahmendbedingungen dafür fest, aber diese gelten nur eingeschränkt und legen Wasserstoff als Energieträger nicht fest. So können feste Mengen abgesetzt werden, welche eine sichere Einnahmequelle darstellen.

Die Zusammenarbeit mit der Kläranlage ist positiv zu bewerten, weil Wasserstoff und Sauerstoff im Kläranlagenprozess Verwendung finden können.

10. Literaturverzeichnis

ACEA. (2021, 24. August 2021). *Anzahl der Wasserstofftankstellen in Europa von 2015 bis 2020*. In Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1050374/umfrage/anzahl-der-wasserstoff-tankstellen-in-europa/>

Adolf, J. et al. (2017). *Shell Wasserstoffstudie. Energie der Zukunft?*. Shell Deutschland Oil GmbH.

BMBF. (o. D, 26. August). *Nationale Wasserstoffstrategie*. https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html

BMWi. (2021, 05. Oktober 2021). *Strompreise für Industriekunden in ausgewählten europäischen Ländern nach Verbrauchsmenge im Jahr 2020 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)*.

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. (2021). *Merkblatt zur elektrochemischen Herstellung von Wasserstoff in stromkostenintensiven Unternehmen 2021*.

DVGW. (2019). *Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten*

ecomento. (2020, 24. August 2021). *Länder mit den meisten öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstellen weltweit (Stand: Januar 2019)*. In Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820861/umfrage/laender-mit-den-meisten-wasserstofftankstellen-weltweit/>

Günther, M. (2015). *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Springer Vieweg

Hof, E. (2019). *Die deutsche H₂-RCS-Roadmap 2025*. NOW GmbH.

Jüttermann, P. (2016, 06. Oktober 2021). *Auswahl einer Windkraftanlage: Leistung oder Rotor als Bezugsgröße?*. <https://www.klein-windkraftanlagen.com/allgemein/auswahl-einer-windkraftanlage-leistung-oder-rotor-als-bezugsgroesse/>

Klassewasser. (2021, 11. August 2021). *So funktioniert ein Klärwerk*. https://klassewasser.de/content/language1/downloads/schuelerbogen_klaerwerk.pdf

Kost, C., Shammugam, S., Jülch, V., Nguyen, H. T., & Schlegl, T. (2018). *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*.

KUMATEC et al. (2021, 11. August 2021). *localhy*. <https://www.localhy.de/>

Mitsdoerffer, R. (2017). *Innovative Wärme- und Kältekonzepte auf Kläranlagen : Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft*. In *Gewässerschutz, Wasser, Abwasser* . 245:18/1-18/17; Jg. 245 (2017) S. 18/1- (1637S.) (Bd. 245, S. 18/1–(1637S.)).

Raue. (2021, 6. Oktober 2021). *UPDATE: EEG-UMLAGEBEFREIUNG FÜR ELEKTROLYSEURE BESCHLOSSEN*. <https://raue.com/aktuell/branchen/energie-rohstoffe-und-klimaschutz/energie/update-eeq-umlagebefreiung-fuer-elektrolyseure-beschlossen/>

Sebold, C. (2021, 16. September 2021). *Bayern ist bei den erneuerbaren Energien nur Mittelmaß*. *Süddeutsche Zeitung*. <https://www.sueddeutsche.de/bayern/bayern-erneuerbare-energien-laendervergleich-1.5363485>

Streichfuss, M., Schwilling, A. (2020). *Batterieantrieb oder doch eher Brennstoffzelle?*. *Technik und Umwelt*

Täglicher Anzeiger. (2021, 02. September 2021). *Sprunghaft ansteigende Inflation lässt Realzins für Ratenkredite ins Negative fallen*. <https://www.tah.de/afpnewssingle/sprunghaft-ansteigende-inflation-l%C3%A4sst-realzins-f%C3%BCr-ratenkredite-ins-negative-fallen>

VDV. (2021, 31. August 2021). *Umsetzung der Clean Vehicles Directive (CVD)*. <https://www.vdv.de/umsetzung-cvd.aspx>

VDV. (2018). *Statistik 2017*.

WSW. (2021, 16. September 2021). *WSW-Wasserstoffbusse erreichen Kostenparität mit Dieselbussen*. <https://www.wsw-online.de/unternehmen/presse-medien/presseinformationen/pressemeldung/meldung/wsw-wasserstoffbusse-erreichen-kostenparitaet-mit-dieselbussen/>

11. Anhang

Umsatz									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Regal	#	1	1	1	2	2	2	3	3
H2 Produktion für Tankstelle	[kg]	2.333	6.713	7.836	19.792	22.809	27.083	42.680	50.729
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	64.948	131.608	148.692	165.315	188.269	220.796	226.311	267.139
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000
H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	4.268	8.648	9.771	21.727	24.744	29.019	44.615	52.664
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	1.197,40	2.426,37	2.741,33	3.047,80	3.471,00	4.070,66	4.172,35	4.925,06
Laufzeit TS	[h/a]	223,94	644,47	752,24	1.900,00	2.189,62	2.600,01	4.097,28	4.869,97
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	33.877,95	68.649,24	77.560,41	172.462,74	196.410,00	230.342,80	354.145,36	418.034,74

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	18.615,35	53.571,64	62.530,22	157.937,46	182.012,14	216.125,47	340.586,71	404.816,01
Erlös Sauerstoff		50,82	102,97	116,34	258,69	294,62	345,51	531,22	627,05
Erlös Nutzwärme	[€/a]	4.097,90	6.764,31	7.447,66	8.112,59	9.030,78	10.331,83	10.552,46	12.185,56
Erlös Gesamt	[€/a]	30.713,26	68.335,95	77.977,88	174.050,05	199.042,92	232.457,30	357.139,17	423.001,57

Umsatz									
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	3	3	3	3	3	3	3	3
H2 Produktion für Tankstelle	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	-	-	-	-	-	-	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47
Erlös Sauerstoff		636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59	636,59
Erlös Nutzwärme	[€/a]	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	437.501,61							

Tabelle 5: prognostizierter Umsatz bei realistischem Markthochlauf

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Wasserstoffproduktion [kg]	4.268	8.648	9.771	21.727	24.744	29.019	44.615	52.664	
EL	Wasser [kg/a]	61.556,89	124.736,99	140.928,76	313.368,11	356.880,75	418.537,30	643.488,93	759.577,17
	Wasserkosten	123,11 €	249,47 €	281,86 €	626,74 €	713,76 €	837,07 €	1.286,98 €	1.519,15 €
	Stromverbrauch	231.496,48	469.097,33	529.989,58	1.178.480,75	1.342.118,37	1.573.989,60	2.419.963,26	2.856.535,30
Tankstelle	Stromverbrauch	14.321,23	41.213,91	48.105,96	121.504,97	140.026,18	166.270,36	262.021,30	311.434,39
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	32.500,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €	22.500,00 €
Personalkosten		60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a]		12311,38	24947,40	28185,75	62673,62	71376,15	83707,46	128697,79	151915,43
Abwasserkosten		24,62 €	49,89 €	56,37 €	125,35 €	142,75 €	167,41 €	257,40 €	303,83 €
Strom gesamt		245.817,70	510.311,24	578.095,53	1.299.985,72	1.482.144,55	1.740.259,96	2.681.984,55	3.167.969,69
Stromkosten a		19.937,17 €	42.474,24 €	48.250,04 €	109.761,14 €	125.282,60 €	147.276,20 €	227.519,04 €	268.929,06 €
Betriebskosten		219.062,11 €	239.250,81 €	242.565,46 €	301.990,42 €	333.616,32 €	336.257,89 €	414.540,62 €	453.729,24 €

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Wasserstoffproduktion [kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
EL	Wasser [kg/a]	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €
Personalkosten		63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten								
Abwassermenge [kg/a]		154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96	154226,96
Abwasserkosten		308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €
Strom gesamt		3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46
Stromkosten a		275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €
Betriebskosten		458.938,10 €	473.438,10 €	453.938,10 €	451.438,10 €	450.514,04 €	448.014,04 €	443.014,04 €

Tabelle 8: Betriebskosten bei realistischem Markthochlauf

Umsatz									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Regal	#	1	1	2	2	2	3	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	15.117	16.038	20.322	35.372	34.777	42.987	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	259.497	271.204	169.346	271.204	271.204	227.871	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	34.575	37.500	5.254	16.792	37.500	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	23.050	25.000	3.503	11.194	25.000	0	0
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	17.053	17.822	22.257	35.644	35.644	44.923	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	4.784,18	5.000,00	3.122,12	5.000,00	5.000,00	4.201,10	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	1.451,26	1.539,60	1.950,86	3.395,75	3.338,59	4.126,80	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	135.358,92	141.465,17	176.668,47	282.930,34	282.930,34	356.585,78	424.395,51	424.395,51

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	7.375,95	8.000,00	1.120,95	3.582,23	6.000,00	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	120.636,24	127.979,62	162.165,57	282.271,80	277.520,66	343.040,12	426.653,47	426.653,47
Erlös Nutzwärme	[€/a]	11.879,90	12.231,14	8.273,84	11.058,33	11.519,82	10.614,84	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	140.516,14	147.586,71	178.439,42	294.451,08	292.622,71	359.654,95	437.501,61	437.501,61

Umsatz									
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	3	3	3	3	3	3	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204	271.204
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Laufzeit TS	[h/a]	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67	5.132,67
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51	424.395,51

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	-	-	-	-	-	-	-	-
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47	426.653,47
Erlös Nutzwärme	[€/a]	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15	10.848,15
Erlös Gesamt	[€/a]	437.501,61							

Tabelle 10: prognostizierter Umsatz bei optimistischem Markthochlauf

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Wasserstoffproduktion [kg]	17.053	17.822	22.257	35.644	35.644	44.923	53.465	53.465	
EL	Wasser [kg/a]	245.949,76	257.044,94	321.010,01	514.089,87	514.089,87	647.923,23	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	491,90 €	514,09 €	642,02 €	1.028,18 €	1.028,18 €	1.295,85 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	924.941,16	966.666,67	1.207.219,57	1.933.333,33	1.933.333,33	2.436.639,28	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	92.808,27	98.457,71	124.757,76	217.158,28	213.503,12	263.908,76	328.234,46	328.234,46
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	32.500,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €	22.500,00 €
Personalkosten		60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a]		49.189,95	51.408,99	64.202,00	102.817,97	102.817,97	129.584,65	154.226,96	154.226,96
Abwasserkosten [€/a]		98,38 €	102,82 €	128,40 €	205,64 €	205,64 €	259,17 €	308,45 €	308,45 €
Strom gesamt		1.017.749,43	1.065.124,37	1.331.977,33	2.150.491,61	2.146.836,45	2.700.548,04	3.228.234,46	3.228.234,46
Stromkosten a		85.712,24 €	89.827,66 €	112.487,09 €	183.098,62 €	182.476,88 €	229.100,81 €	275.072,68 €	275.072,68 €
Betriebskosten		285.181,34 €	286.818,95 €	307.106,31 €	375.604,00 €	390.982,26 €	418.373,86 €	462.092,15 €	459.592,15 €

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Wasserstoffproduktion [kg]	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465	53.465
EL	Wasser [kg/a]	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81	771.134,81
	Wasserkosten	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €	1.542,27 €
	Stromverbrauch	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00	2.900.000,00
Tankstelle	Stromverbrauch	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46	328.234,46
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €
Personalkosten		63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten								
Abwassermenge [kg/a]		154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96	154.226,96
Abwasserkosten [€/a]		308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €	308,45 €
Strom gesamt		3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46	3.228.234,46
Stromkosten a		275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €	275.072,68 €
Betriebskosten		458.629,65 €	473.129,65 €	453.629,65 €	451.129,65 €	450.205,59 €	447.705,59 €	442.705,59 €

Tabelle 11: Betriebskosten bei optimistischem Markthochlauf

Umsatz									
		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Regal	#	1	1	1	1	1	1	1	2
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	2.116	5.908	6.107	8.192	10.278	13.119	16.903	18.422
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	61.648	119.353	122.378	154.117	185.857	229.083	271.204	154.896
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	17.810	37.500
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	11.873	25.000
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	4.051	7.843	8.042	10.128	12.213	15.054	17.822	20.358
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	1.136,56	2.200,42	2.256,19	2.841,36	3.426,53	4.223,45	5.000,00	2.855,71
Laufzeit TS	[h/a]	203,13	567,16	586,24	786,47	986,70	1.259,40	1.622,66	1.768,55
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	32.156,65	62.256,68	63.834,54	80.390,70	96.946,85	119.494,32	141.465,17	161.593,61

		2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	8.000,00	6.000,00	2.849,54	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	16.884,89	47.145,07	48.731,32	65.375,56	82.019,80	104.687,24	134.883,66	147.010,51
Erlös Nutzwärme	[€/a]	3.965,91	6.274,11	6.395,10	7.664,70	8.934,29	10.663,33	11.560,53	7.695,84
Erlös Gesamt	[€/a]	28.850,80	61.419,17	63.126,43	81.040,26	98.954,10	121.350,57	149.293,73	160.706,35

Umsatz									
		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Regal	#	2	2	2	2	2	2	3	3
tat. H2 Produktion für TS	[kg]	21.640	24.103	26.189	28.803	31.493	34.333	35.664	38.052
Wärmeproduktion EL [kWh th]	[kWh th/a]	179.380	198.122	213.992	233.882	254.346	271.204	190.724	202.836
Wärmeproduktion BZ	[kWh th/a]	37.500	37.500	37.500	37.500	37.500	25.389	37.500	37.500
Stromerzeugung BZ	[kWh el/a]	25.000	25.000	25.000	25.000	25.000	16.926	25.000	25.000
tat. H2 Bedarf TS+BZ	[kg]	23.575	26.039	28.124	30.738	33.428	35.644	37.600	39.987
Re-Einspeisung	[kWh el/a]	0	0	0	0	0	0	0	0
Laufzeit EL	[h/a]	3.307,12	3.652,64	3.945,22	4.311,92	4.689,21	5.000,00	3.516,25	3.739,54
Laufzeit TS	[h/a]	2.077,47	2.313,93	2.514,16	2.765,11	3.023,31	3.296,00	3.423,78	3.652,99
Sauerstoffproduktion	[kg/a]	187.136,74	206.688,55	223.244,71	243.994,78	265.343,99	282.930,34	298.456,30	317.408,98

		2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039
Erlös Standort Eigenstrom	[€/a]	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00	4.062,20	6.000,00	6.000,00
Erlös H2 Vertrieb	[€/a]	172.689,54	192.345,37	208.989,61	229.850,09	251.312,88	273.980,32	284.601,36	303.654,88
Erlös Nutzwärme	[€/a]	8.675,22	9.424,88	10.059,67	10.855,28	11.673,85	11.863,70	9.128,96	9.613,42
Erlös Gesamt	[€/a]	187.364,75	207.770,25	225.049,29	246.705,36	268.986,73	289.906,22	299.730,32	319.268,30

Tabelle 13: Umsatzerlöse bei pessimistischem Markthochlauf

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	
Wasserstoffproduktion [kg]	4.051	7.843	8.042	10.128	12.213	15.054	17.822	20.358	
EL	Wasser [kg/a]	58.429,26	113.121,59	115.988,59	146.071,44	176.154,29	217.123,48	257.044,94	293.618,69
	Wasserkosten	116,86 €	226,24 €	231,98 €	292,14 €	352,31 €	434,25 €	514,09 €	587,24 €
	Stromverbrauch	219.734,40	425.415,38	436.197,29	549.329,61	662.461,92	816.534,40	966.666,67	1.104.209,28
	Abschreibung	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €
Tankstelle	Stromverbrauch	12.989,94	36.269,80	37.490,14	50.294,94	63.099,75	80.538,33	103.769,14	113.098,61
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		40.000,00 €	37.500,00 €	35.000,00 €	32.500,00 €	30.000,00 €	27.500,00 €	25.000,00 €	22.500,00 €
Personalkosten		60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	60.000,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €	61.500,00 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a€]		11.685,85	22.624,32	23.197,72	29.214,29	35.230,86	43.424,70	51.408,99	58.723,74
Abwasserkosten [€/a]		23,37 €	45,25 €	46,40 €	58,43 €	70,46 €	86,85 €	102,82 €	117,45 €
Strom gesamt		232.724,34	461.685,18	473.687,43	599.624,55	725.561,67	897.072,73	1.070.435,81	1.217.307,89
Stromkosten a		18.821,51 €	38.330,90 €	39.353,59 €	50.084,49 €	60.815,39 €	75.429,57 €	90.731,13 €	102.716,29 €
Betriebskosten		217.915,57 €	235.034,34 €	233.562,77 €	241.853,83 €	268.644,90 €	263.841,02 €	276.722,42 €	286.280,73 €

	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	
Wasserstoffproduktion [kg]	23.575	26.039	28.124	30.738	33.428	35.644	37.600	39.987	
EL	Wasser [kg/a]	340.031,05	375.557,07	405.639,92	443.343,21	482.135,13	514.089,87	542.300,83	576.738,22
	Wasserkosten	680,06 €	751,11 €	811,28 €	886,69 €	964,27 €	1.028,18 €	1.084,60 €	1.153,48 €
	Stromverbrauch	1.278.751,84	1.412.354,23	1.525.486,55	1.667.276,98	1.813.161,43	1.933.333,33	2.039.426,06	2.168.934,44
	Abschreibung	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €	67.000,00 €
Tankstelle	Stromverbrauch	132.854,09	147.975,78	160.780,58	176.829,03	193.340,86	210.779,44	218.950,46	233.608,78
Wartungs- und Prüfkosten		35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	35.477,20 €	52.477,20 €	35.477,20 €
Tilgung		62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €	62.500,00 €
Zinsen		20.000,00 €	17.500,00 €	15.000,00 €	12.500,00 €	10.000,00 €	7.500,00 €	5.000,00 €	2.500,00 €
Personalkosten		63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	63.037,50 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €	64.613,44 €
laufende Betriebskosten		1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €	1.000,00 €
Mietkosten									
Abwassermenge [kg/a€]		68.006,21	75.111,41	81.127,98	88.668,64	96.427,03	102.817,97	108.460,17	115.347,64
Abwasserkosten [€/a]		136,01 €	150,22 €	162,26 €	177,34 €	192,85 €	205,64 €	216,92 €	230,70 €
Strom gesamt		1.411.605,92	1.560.330,01	1.686.267,13	1.844.106,01	2.006.502,28	2.144.112,78	2.258.376,52	2.402.543,21
Stromkosten a		119.272,12 €	131.944,66 €	142.675,56 €	156.124,76 €	169.962,28 €	182.013,58 €	191.424,08 €	203.708,30 €
Betriebskosten		301.966,88 €	329.210,47 €	320.501,54 €	331.526,14 €	344.517,19 €	354.132,40 €	378.099,32 €	370.952,41 €

Tabelle 14: jährliche Betriebskosten bei pessimistischem Markthochlauf