



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Erstellung eines Vergleichswerkzeugs für die Analyse der exergetischen und wirtschaftlichen Parameter einer optimierten Wasserstoffbetankungsanlage unter Berücksichtigung des systemischen Gedankens von der Erzeugung bis zur Abgabe

Bachelorarbeit
im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von
Lukas Willmeroth



Duisburg
am 17.07.2018

1. Gutachterin: Frau Prof. Dr. Marion Siegers (HAW Hamburg)
2. Gutachter: Herr Dipl. Ing. Joachim Jungsbluth (ZBT GmbH)

Die Abschlussarbeit wurde in Zusammenarbeit mit der „Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH“ erstellt.

*„Was werden wir später einmal statt Kohle verbrennen?“ fragte der Seemann.
„Wasser“, antwortete Smith. „Wasserstoff und Sauerstoff werden für sich oder zusammen zu
einer unerschöpflichen Quelle von Wärme und Licht werden, von einer Intensität, die die
Kohle überhaupt nicht haben könnte; das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“*

Jules Verne, „Die geheimnisvolle Insel“

1874

KURZFASSUNG

Die Bachelorarbeit umfasst die Entwicklung eines Tools zur Abbildung einer Wasserstoffbetankungsanlage. Zunächst werden die allgemeinen und technischen Grundlagen vorgestellt. Es wird sowohl der Aufbau und die Struktur des Tools als auch die einzelnen Möglichkeiten der Anwendung erklärt. Das geschieht unter anderem durch eine Bedienungsanleitung. Zur Anwendung des Tools werden drei Szenarien simuliert, ausgewertet und die Ergebnisse diskutiert. Diese drei Szenarien bilden aktuelle oder in der Zukunft relevante Systempfade ab. Als Resultat lässt sich feststellen, dass Wasserstofftankstellen unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich betrieben werden könnten. Abschließend wird festgestellt, dass weitere Forschungen, technische Entwicklungen und politische Veränderungen folgen müssen, um die Technologie der Wasserstoffmobilität im Markt zu etablieren.

ABSTRACT

This bachelor thesis contains the development of a tool for the simulation of a hydrogen refueling station. Initially an overview over the general and technical basics is given. Both the structure of the tool and the possibilities for the user are explained. For these purposes an operating manual is included. To demonstrate the tool three different scenarios will be simulated, evaluated and the results discussed. The three chosen scenarios represent system structures that are or might become relevant in the future. It becomes apparent that a hydrogen refueling station could be operated economically under specific circumstances. In conclusion it is said that additional research, technical development and political change has to follow, to allow hydrogen mobility a market penetration.

DANKSAGUNGEN

An dieser Stelle möchte ich mich bei Frau Professor Marion Siegers für die Unterstützung und Betreuung der Arbeit bedanken. Außerdem danke ich Herrn Joachim Jungsbluth, der mich beratend unterstützt hat und diese Arbeit ebenfalls betreut.

Des Weiteren geht mein Dank an meine Kollegen am ZBT, die mir bei Fragen immer zur Seite standen. Genauso möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben. Besonderer Dank geht an meine Eltern, die mich immer in meinen Entscheidungen unterstützt haben.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG	1
1.1	RELEVANZ DES THEMAS	1
1.2	ZIEL DER ARBEIT	2
2.	GRUNDLAGEN	4
2.1	WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR	4
2.2	AUFBAU EINER WASSERSTOFFTANKSTELLE	6
2.2.1	WASSERSTOFFVERSORGUNG	9
2.2.1.1	ELEKTROLYSE	9
2.2.2	WASSERSTOFFSPEICHERUNG	11
2.2.3	VERDICHTERTYPEN	13
2.2.3.1	KOLBENVERDICHTER	13
2.2.3.2	MEMBRANVERDICHTER	13
2.2.3.3	IONISCHE VERDICHTER	14
2.2.3.4	ELEKTROCHEMISCHE VERDICHTER	14
2.2.3.5	FLÜSSIGWASSERSTOFF-PUMPE	15
2.2.4	KÜHLUNG UND DISPENSER	15
3.	ENTWICKLUNG EINES TOOLS ZUR SIMULATION EINER WASSERSTOFFBETANKUNGSANLAGE	17
3.1	VORAUSSETZUNGEN DES TOOLS	17
3.2	AUFBAU DES TOOLS	21
3.2.1	ERKLÄRUNG DER VERWENDETEN PARAMETER	22
3.2.1.1	ARBEITSBLATT „ÜBERSICHT“	22
3.2.1.2	ALLGEMEINE PARAMETER	24
3.2.1.3	ARBEITSBLATT „ELEKTROLYSE“	28
3.2.1.4	ARBEITSBLATT „ANLIEFERUNG“	31
3.2.1.5	ARBEITSBLÄTTER „SPEICHER“	35
3.2.1.6	ARBEITSBLÄTTER „VERDICHTER“	38
3.2.1.7	ARBEITSBLATT „KÜHLUNG & DISPENSER“	39
3.3	AUSGABE DES TOOLS	42
4.	BEDIENUNGSANLEITUNG	45
5.	ANWENDUNG DES TOOLS	48
6.	VERGLEICH UND DISKUSSION DER SIMULATIONSERGEBNISSE	50
6.1	ERGEBNISSE DES 1. SZENARIOS: „ANLIEFERUNG 200 BAR“	50

6.2	ERGEBNISSE DES 2. SZENARIOS: „ELEKTROLYSE“	52
6.3	ERGEBNISSE DES 3. SZENARIOS: „ANLIEFERUNG 500 BAR“	54
6.4	DISKUSSION DER SZENARIEN	56
7.	FAZIT	61
	QUELLENVERZEICHNIS	63

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Emission von CO ₂ -Äquivalenten in unterschiedlichen Sektoren von 1990-2015 und Zielpfad bis 2050, Quelle: Nach Rosenkranz, G. (2016): Energiepolitische Zielsetzungen des Bundes und Klimaschutzplan 2050 (Vortrag)	2
Abbildung 2: Hyundai Nexo auf der Geneva International Motor Show 2018, Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geneva_International_Motor_Show_2018,_Le_Grand-Saconnex_(1X7A1428).jpg (10.07.2018)	4
Abbildung 3: H ₂ -Mobility Tankstellenstandorte, Quelle: H ₂ -Mobility (2018): Netzplanung (Flyer)	5
Abbildung 4: Vergleich der vier unterschiedlichen Speichertypen, Quelle: Töpler/Lehmann 2017, S. 89	12
Abbildung 5: Temperaturverteilung in flachliegenden Speichern nach 859s abhängig von der Einströmrichtung, Quelle: Nach Melideo et al. 2017	18
Abbildung 6: Exemplarischer Systempfad „Elektrolyse“ mit Übersicht der Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung	21
Abbildung 7: Screenshot eines Tabellenblattes zur Darstellung der generellen Blattstruktur, Quelle: Eigene Darstellung	22
Abbildung 8: Screenshot des Tabellenblatts „Übersicht“, Quelle: Eigene Darstellung	23
Abbildung 9: Screenshot des Tabellenblatts „Elektrolyse“, Quelle: Eigene Darstellung	28
Abbildung 10: Screenshot des Tabellenblatts „Anlieferung“, Quelle: Eigene Darstellung	31
Abbildung 11: Screenshot der Tabellenblätter „Speicher“, Quelle: Eigene Darstellung	35
Abbildung 12: Screenshot der Tabellenblätter „Verdichter“, Quelle: Eigene Darstellung	38
Abbildung 13: Screenshot des Tabellenblatts „Kühlung & Dispenser“, Quelle: Eigene Darstellung	40
Abbildung 14: Entwicklung des H ₂ -Preises pro Kilogramm bei steigender Anzahl der Betankungen im Szenario 1, Quelle: Eigene Darstellung	51
Abbildung 15: Veränderung des H ₂ -Preises in Abhängigkeit einzelner Komponentenkosten, Quelle: Eigene Darstellung	53
Abbildung 16: Veränderung des H ₂ -Preises in Abhängigkeit einzelner Kostenanteile, Quelle: Eigene Darstellung	55
Abbildung 17: Entwicklung des H ₂ -Preises pro Kilogramm bei steigender Anzahl der Betankungen im Szenario 3, Quelle: Eigene Darstellung	56
Abbildung 18: Vergleich der Entwicklung des H ₂ -Preises in den Szenarien 1 und 3 bei steigender Anzahl der Betankungen, Quelle: Eigene Darstellung	57
Abbildung 19: Screenshot der Übersicht über die Kosten pro speicher- und nutzbarem Kilogramm H ₂ , Quelle: Eigene Darstellung	59

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Klassifizierung der Tankstellengrößen, Quelle: Shell 2017, S.53, eigene Darstellung	7
Tabelle 2: Vergleich der alkalischen, der PEM- und der SOEC-Elektrolyse, Quelle: Eigene Darstellung	10
Tabelle 3: Übersicht der Speichertypen und ihrer Unterschiede sowie Vor- und Nachteile, Quelle: Eigene Darstellung	12
Tabelle 4: Kompressionsfaktor bei verschiedenen Drücken und Anstieg des Kompressionsfaktors in den Druckbereichen, Quelle: Nach Linde (2013), eigene Darstellung	19
Tabelle 5: Übersicht der Kategorien zur Einteilung der Daten und Parameter; Quelle: Eigene Darstellung	21
Tabelle 6: Darstellung der prozentualen Auslastung im Tool, Quelle: Eigene Darstellung	43
Tabelle 7: Übersicht der Seiteninhalte der jeweiligen Ausgabeseite, Quelle: Eigene Darstellung	44
Tabelle 8: Übersicht über die zur Verfügung stehenden Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung	46
Tabelle 9: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 1, Quelle: Eigene Darstellung	50
Tabelle 10: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 2, Quelle: Eigene Darstellung	52
Tabelle 11: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 3, Quelle: Eigene Darstellung	54
Tabelle 12: Überblick über relevante Werte der drei Szenarien, Quelle: Eigene Darstellung	56

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEL	Alkalische Elektrolyse
F	Fixkosten
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
HD	Hochdruck
I	Investitionskosten
L	laufende Kosten
Max.	Maximal
MD	Mitteldruck
Min.	Minimal
ND	Niederdruck
OEM	Original Equipment Manufacturer
P	Parameter
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
SOE, SOEC	solid oxide electrolysis

FORMELZEICHEN

b	Breite [m]
h	Höhe [m]
H_u	unterer Heizwert [J/kg, kWh/kg]
l	Länge [m]
m	Masse [kg]
M	molare Masse [g/mol]
n	Stoffmenge [mol]
p	Druck [Pa, bar]
R	universelle Gaskonstante [J/mol K]
T	Temperatur [K]
V	Volumen [m ³]
W	verrichtete Arbeit auf die Masse bezogen [kWh/kg]
Z	Kompressionsfaktor [-]
η	exergetischer Wirkungsgrad [-]
ρ	Dichte [kg/m ³]

1. EINLEITUNG

1.1 RELEVANZ DES THEMAS

Wir befinden uns in einer Zeit des Wandels. Nicht nur eines technologischen, sondern auch eines kulturellen Wandels. Die Weltbevölkerung stößt immer mehr Treibhausgase in die Atmosphäre aus und verbraucht dabei fossilen Ressourcen der Erde. Diese Energieträger werden in nicht allzu ferner Zukunft versiegen. Daher haben es sich viele Länder dieser Welt zum Ziel gesetzt der Nachhaltigkeit im Energieverbrauch der Welt eine wichtigere Rolle zukommen zu lassen.

Im 2015 unterzeichneten Pariser Klimaabkommen verpflichteten sich nahezu alle Länder der Erde, die Klimaerwärmung zu begrenzen und hierzu die Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen zu beschränken. (Europäische Kommission 2018) Auch Deutschland arbeitete einen Klimaschutzplan aus und verschrieb sich einer Reduktion des Ausstoßes bis 2050 in definierten Zielen. Die Erreichung der Klimaschutzziele der Bundesregierung ist auf eine breite Basis gestellt worden und somit eine selbst auferlegte Anforderung, die in verschiedenen Sektoren erhebliche Einsparungen an CO₂ erfordert. Aus Abbildung 1 geht hervor, dass der Sektor Haushalte/GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) in etwa dem Zielpfad entspricht. In den Sektoren Industrie und Landwirtschaft können die Zielpfade derzeit ebenfalls erreicht werden, es zeigt sich jedoch, dass die Entwicklung in den letzten Jahren nahezu stagniert. In der Industrie sind die Einsparpotentiale, beispielweise aufgrund von Herstellungsprozessen gedeckelt. Die vorgesehene Verminderung des Ausstoßes von CO₂-Äquivalenten um 80 bis 95% (bezogen auf den Wert von 1990) erscheint in diesem Sektor zum jetzigen Zeitpunkt schwer realisierbar. Es ist erkennbar, dass der Ausstoß von CO₂-Äquivalenten im Verkehrssektor nicht nur über dem nötigen Zielpfad liegt, sondern in den letzten Jahren stetig angestiegen ist. Vorhandene Einsparpotentiale müssen zeitnah ausgeschöpft werden und so kommt dem Verkehrssektor eine spezielle Rolle bei der Einhaltung der Klimaschutzziele zu.

Durch Kopplung der Sektoren Strom und Verkehr kann der regenerative Strom langfristig über einen Sekundärenergieträger (bspw. Wasserstoff) sowohl lagerfähig als auch systemübergreifend nutzbar gemacht werden. Damit bietet sich eine realistische Option zur Verminderung des CO₂-Ausstoßes. Dazu muss regenerativer Strom langfristig über einen Sekundärenergieträger eingebracht werden. Neben der bereits großflächiger bekannten Option der batteriebetriebenen Elektrofahrzeuge bieten sich elektrische Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb an. Diese benötigen Wasserstoff als Kraftstoff und sind bereits kommerziell verfügbar.

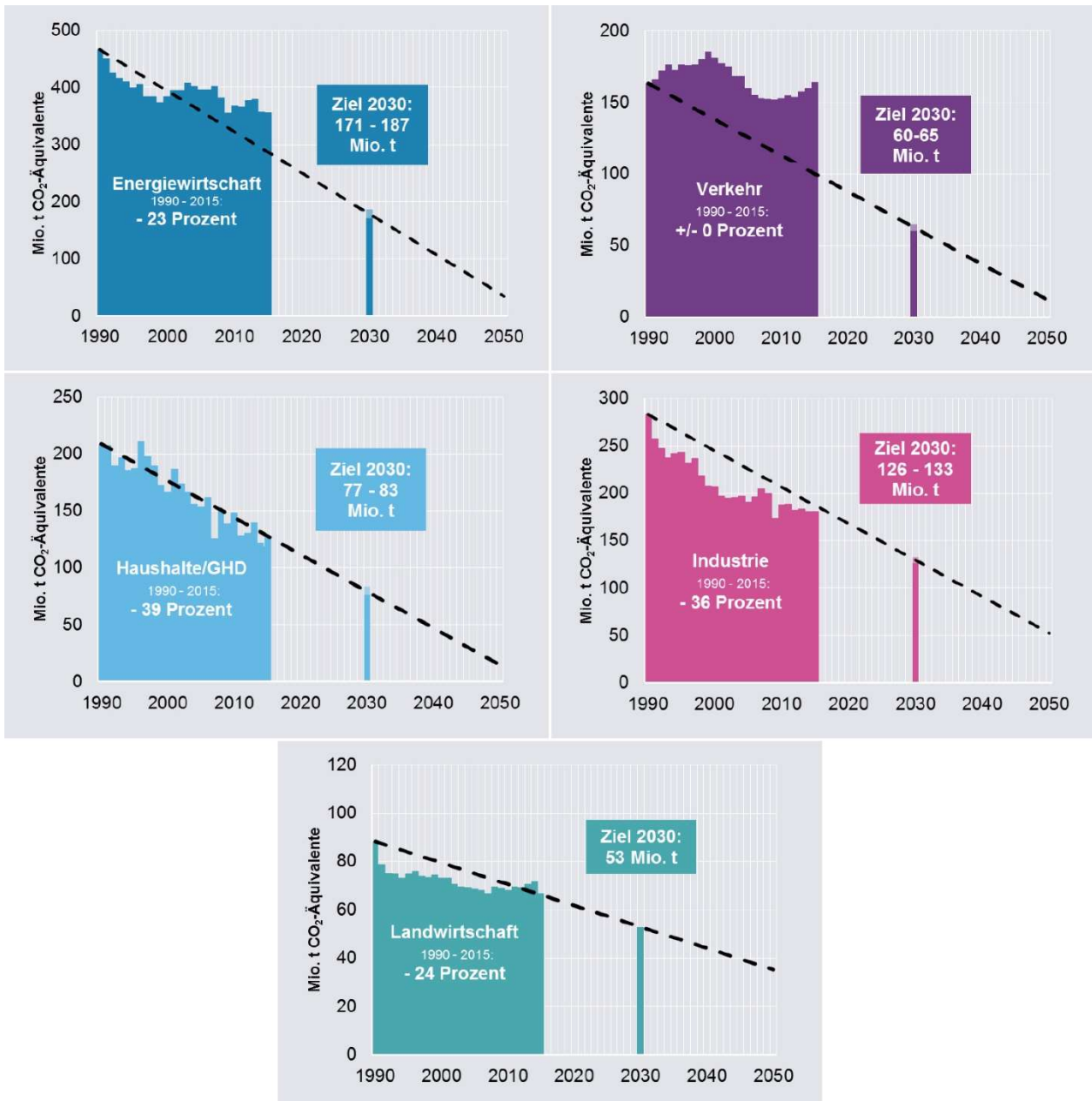


Abbildung 1: Emission von CO₂-Äquivalenten in unterschiedlichen Sektoren von 1990-2015 und Zielpfad bis 2050, Quelle: Nach Rosenkranz, G. (2016): Energiepolitische Zielsetzungen des Bundes und Klimaschutzplan 2050 (Vortrag)

1.2 ZIEL DER ARBEIT

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Vergleichswerkzeug erstellt, mit dem es möglich ist, bereits in der Planungsphase unterschiedliche Systemkonfigurationen einer Wasserstoffbetankungsanlage vom Erzeugungspfad bis hin zur Abgabe vollständig abzubilden. Hierzu müssen die benötigten Annahmeparameter identifiziert und schlussendlich wirtschaftliche und exergetische Vergleiche angestellt werden. Dazu werden drei exemplarische Gesamtsystemketten („Elektrolyse“, „Anlieferung 200 bar“ und „Anlieferung 500 bar“) aufgebaut, miteinander verglichen und die Auswirkungen von charakteristischen Werten dargestellt.

Dabei spielt neben dem generellen Unterschied bei der Herkunft des Wasserstoffs (Elektrolyse oder Anlieferung) insbesondere das Druckniveau des Transports (200-500 bar) bzw. der Speicherung an der Tankstelle (10-875 bar) eine Rolle. In vergleichender Darstellung werden die Szenarien bezüglich der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Investitionskosten, laufende Kosten) und der Energieentwertung durch die Tankstelle (exergetischer Wirkungsgrad) bezogen auf das Kilogramm abgegebenen Wasserstoffs angegeben. Ebenso wird im Rahmen der Ausgabe eine Extrapolation verschiedener Kostenanteile durchgeführt, um den Einfluss dieser auf die gesamten Kosten des komplexen Systems zu ermitteln.

So werden dem Planer des Gesamtsystems mit diesem Tool ein Werkzeug bereitgestellt, das es ermöglicht, eine Entscheidung für eine Systemkonfiguration einer Wasserstofftankstelle zu begründen. Der Aufbau des Tools wird so gewählt, dass eine weitere Spezifizierung der Anlage bzw. der Kosten jederzeit möglich ist.

2. GRUNDLAGEN

2.1 WASSERSTOFFINFRASTRUKTUR

Um eine Marktdurchdringung der Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. fuel cell electric vehicles, kurz: FCEVs) zu ermöglichen, muss eine leistungsfähige Infrastruktur aufgebaut werden. Bereits in den 1970ern gab es erste experimentelle Fahrzeuge, die mit Brennstoffzellenantrieb fuhren. Durch die erhöhten politischen Anforderungen an Fahrzeuge, in Bezug auf geringere Schadstoffemissionen und der weiterhin hohen Abhängigkeit von Ölimporten, wurden die Bemühungen zur Erforschung alternativer Antriebsarten in den letzten 20 Jahren immer weiter intensiviert. Durch verschiedene politische Ereignisse (z.B. Abgasskandal) rückte die Elektromobilität in den vergangenen Jahren immer mehr in den politischen, aber auch in den öffentlichen Fokus. Während sich batteriebetriebene Elektrofahrzeuge durch lange Ladezeiten und beschränkte Kapazitäten der Akkus langfristig eher für den Einsatz in urbanen Bereichen eignen, bieten FCEVs ein großes Potential im gesamten Verkehrssektor. [e-mobil BW 2013, S. 7]

Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge bieten, genau wie batteriebetriebene Fahrzeuge, die Chance den Antriebswechsel in Deutschland und Europa voranzubringen. Der Wasserstoff wird zumeist gasförmig bei 700 bar in einem im Fahrzeug verbauten Tank gespeichert. Das Konsumentenverhalten muss sich bei einer Wasserstoffbetankung kaum verändern, da der Betankungsvorgang einer Standardbetankung mit Diesel oder Benzin sehr ähnlich ist. Durch die festgelegten Betankungsprotokolle wird dem Konsumenten ermöglicht, sein Fahrzeug in kurzer Zeit vollzutanken und eine Reichweite von ca. 500 km (abhängig vom Fahrzeugmodell) zu erreichen. Die Entwicklung der Fahrzeuge ist bei einigen Herstellern bereits fester Bestandteil der Serienproduktion, wenngleich die Produktionszahlen ob der noch geringen Marktdurchdringung eher niedrig ausfallen. Bei der Fahrzeugtypenvarianz sind alle Modelle denkbar, die auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren existieren. Von kleinen PKWs über Limousinen (Toyota Mirai) und SUVs (Hyundai ix35, Hyundai Nexo) bis hin zu Lieferfahrzeugen (Renault HyKangoo) und LKWs (Nikola One) sind alle Arten von Fahrzeugen mit wasserstoffbetriebenem Brennstoffzellenantrieb möglich. Zusätzlich findet



Abbildung 2: Hyundai Nexo auf der Geneva International Motor Show 2018, Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geneva_International_Motor_Show_2018,_Le_Grand-Saconnex_\(1X7A1428\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geneva_International_Motor_Show_2018,_Le_Grand-Saconnex_(1X7A1428).jpg) (10.07.2018)

Wasserstoff als Kraftstoff bereits in Zügen, Bussen und Schiffen Anwendung. [Robinius et al. 2018, S. 10-12; e-mobil BW 2013, S. 7]

Der Bedarf an Elektrizität wird, unabhängig von der sich durchsetzenden Kombination der Antriebsmethoden, unweigerlich steigen. Sowohl bei brennstoffzellen- als auch bei batteriebasierten Lösungen besteht die Möglichkeit, den Wandel der Antriebsmethode direkt an den Ausbau erneuerbarer Energien zu koppeln. Wasserstoff kann bei der Sektorenkopplung jedoch einen Vorteil anbieten. So kann der erzeugte Strom mittels Elektrolyse direkt oder nahe der Energieanlage in Wasserstoff umgewandelt werden. Hierdurch stellt der Wasserstoff eine Option zur Lösung der Energiespeicherproblematik dar. Durch die Speicherung des Wasserstoffs, z.B. in Salzkavernen, ist es möglich saisonale Überproduktionen aufzufangen. In diesen Bereichen muss allerdings noch weitere Forschung betrieben werden, da die Umwandlung des Stroms zu Wasserstoff und zurück erhebliche Energieverluste mit sich bringt und somit im Vergleich zu batteriebetriebenen Fahrzeugen einen höheren, spezifischen Energiebedarf pro Kilometer bzw. Kilowattstunde aufweist. [Robinius et al. 2018, S. 10-12]

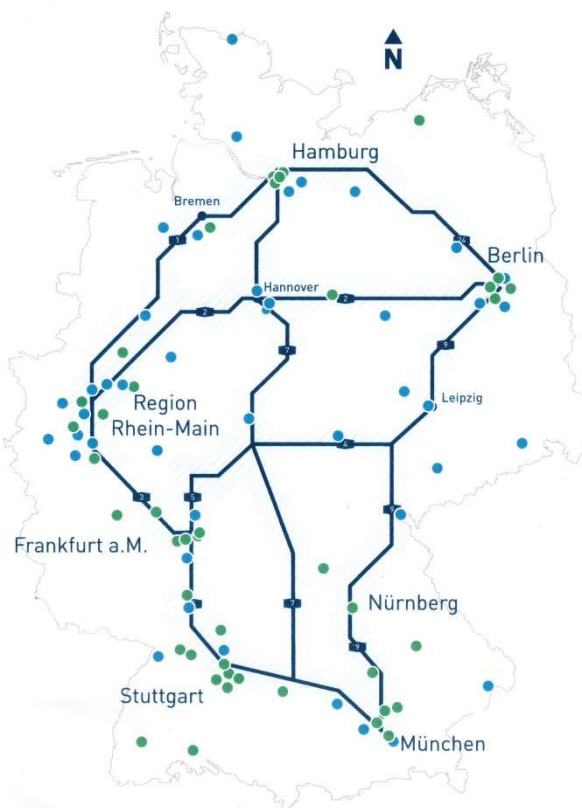


Abbildung 3: H2-Mobility Tankstellenstandorte, Quelle: H2-Mobility (2018): Netzplanung (Flyer)

Um der Wasserstofftechnologie eine langfristige Perspektive zu bieten, ist die Errichtung einer flächendeckenden Infrastruktur erforderlich. Besonders anfangs müssen politische Rahmenbedingungen geschaffen werden, um den Infrastrukturwandel zu unterstützen und voranzutreiben. Unabhängig von der geringen Anzahl an fahrenden FCEVs besteht ein Grundbedarf an Tankstelleninfrastruktur. Damit verbunden sind hohe Investitionen bei einer niedrigen Kundenzahl und somit ist eine Rendite in der Anfangsphase nicht realistisch zu

erwarten. Ende 2016 existierten weltweit 213 öffentliche Wasserstofftankstellen für etwa 2500 FCEVs. Diese Tankstellen verteilten sich primär auf Japan (45), die USA (33, davon 26 in Kalifornien) und Deutschland (30). In der Zwischenzeit sind die Zahlen der Wasserstofftankstellen stark angestiegen. Gab es in Deutschland Mitte Juni 2017 noch 30 Tankstellen, sind es mittlerweile (Stand: 09.06.2018) 43 eröffnete und 48 sich zwischen Planungs- und Bauphase befindende Tankstellen. In Deutschland ist ein privatwirtschaftlicher Zusammenschluss von OEMs (Original Equipment Manufacturer), Gasversorgern und Tankstellenbetreibern (H2-Mobility Deutschland GmbH & Co. KG) für den Großteil des Infrastrukturausbaus verantwortlich. Ziel der H2-Mobility ist es, bis Ende 2019 100 Wasserstoffstationen in Deutschland zu errichten und dabei die Ballungszentren und Autobahnkorridore Deutschlands ausreichend abzudecken (siehe Abbildung 3). In einer zweiten Phase soll die Zahl der Tankstellen in Abhängigkeit der verfügbaren Fahrzeuge auf bis zu 400 Stück erweitert werden. [Robinius et al. 2018, S. 4, 10, 12; Shell 2017, S. 51; H2-Mobility 2015; H2-Mobility 2018]

Beim Ausbau der Infrastruktur sind auch regionale Unterschiede zu berücksichtigen. So ist eine ausgebaute Infrastruktur in Japan für den japanischen Konsumenten ausreichend, da nur in Ausnahmefällen mit dem Auto in andere Länder gereist wird. In Deutschland ist hingegen nicht nur der Ausbau der eigenen Infrastruktur relevant, sondern auch die Situation in den Nachbarländern und dem Rest Europas. Dies erfordert einen starken Infrastrukturwandel, der jedoch dem ganzen Kontinent die Möglichkeit bietet nachhaltiger unabhängig von Energieimporten zu werden.

2.2 AUFBAU EINER WASSERSTOFFTANKSTELLE

Für den Benutzer der Tankstelle unterscheidet sich der Aufbau und Ablauf kaum zu einer herkömmlichen Tankstelle. Es wird mit dem Auto an eine Zapfsäule gefahren, die Füllkupplung entnommen und am Auto angeschlossen, um dann bis zum Abschluss der Betankung zu warten.

Auf rein technischer Ebene ist der Aufbau jedoch ein anderer. In Fragen der Herkunft des Wasserstoffs gibt es zwei Möglichkeiten. So kann der Wasserstoff direkt an der Tankstelle (engl. On-Site) produziert werden oder aber auf verschiedenen Arten angeliefert werden. Bei Transport, Verteilung und Handel des Wasserstoffs gibt es ungeklärte Fragestellungen, welche im Lauf der Marktdurchdringungsphase beantwortet werden müssen. Die Anlieferung erfolgt in Trailern, meist bei einem Druckniveau von etwa 200 bar aus regionalen Quellen. Eine Anlieferung bei einem Druckniveau von 500 bar ist derzeit noch kostenintensiv, bei größerer Produktionsrate der Speicher sinken die Kosten voraussichtlich. Langfristig ist die Distribution mittels Pipeline die aussichtsreichste Option, benötigt allerdings zunächst noch weitere Forschungen und schlussendlich hohe Investitionen, welche nur bei entsprechend großer Abnahme lohnend sind. [Robinius et al. 2018, S. 48, 57]

Bei Wasserstofftankstellen werden derzeit vier unterschiedliche Größenordnungen unterschieden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Klassifizierung der Tankstellengrößen, Quelle: Shell 2017, S.53, eigene Darstellung

Tankstellengröße	Tankstellenart	Max. Durchsatz pro Tag
XS (sehr klein)	Zumeist nicht kommerzielle Forschungsstationen	80 kg 100 Fahrzeuge
S (klein)	Kleine kommerzielle Wasserstoffstationen	212 kg 400 Fahrzeuge
M (mittel)	Mittlere kommerzielle Wasserstoffstationen	420 kg 800 Fahrzeuge
L (groß)	Große kommerzielle Wasserstoffstationen	1000 kg 1600 Fahrzeuge

Die Klassifizierung der Tankstellengrößen erfolgt nach der Festlegung der H2-Mobility und ist abhängig von der Anzahl der Betankungen und damit des Umsatzes an Wasserstoff. Zusätzlich sind auch Tankstellen der Größe XL (sehr groß) denkbar, zum aktuellen Zeitpunkt allerdings nicht praxisrelevant. Bei den Größen S und M ist ergänzend zu erwähnen, dass mit modularem Aufbau auch ein nachträglicher bedarfsbedingter Ausbau durch den Austausch einzelner Komponenten möglich ist. [Shell 2017, S. 53]

Größe und Typ der Tankstelle sind stark vom Standort der Tankstelle abhängig. Stationen mit kleinerem, konstantem Bedarf eignen sich langfristig auch sehr gut für On-Site-Produktion. In ländlicheren Gebieten mit einem hohen Bedarf (z.B. an Autobahnen) und in urbanen Gebieten ist langfristig die Versorgung via Pipeline oder großen Trailern unausweichlich. Heutige Wasserstoffstationen sind meist als zusätzliches Kraftstoffangebot an bereits existierenden Tankstellen realisiert und integriert. Für dieses Modell muss der Platz für alle benötigten Komponenten und Anlagen vorhanden sein. Auch die Anlieferung, Ausgabe und Lagerung von Wasserstoff, neben den anderen Kraftstoffen, muss ohne Sicherheitsrisiken realisierbar sein. Eine alleinstehende, neue Tankstelle stellt derzeit noch einen Ausnahmefall dar, da in diesem Fall auch zusätzliche Angebote wie Verkaufsflächen und Serviceleistungen zu berücksichtigen sind. Mobile Tankstellen sind zumindest in der Aufbauphase für abgelegene oder noch nicht erschlossene Gebiete eine Möglichkeit, um einen minimalen Grundbedarf an Wasserstoff abzudecken oder Tankstellen bei Wartungen oder einem Ausfall temporär zu ersetzen. Der Platzbedarf ist besonders in dichtbesiedelten, städtischen Gebieten ein entscheidender Faktor für die Auslegung der Tankstelle. [Qin/Brooker 2014, S. 4; Shell 2017 S. 51-53]

In der Tankstelle selbst sind Geräte und Anlagen zur Erzeugung oder Anlieferung des Wasserstoffs vorzusehen. Je nach Qualität des produzierten oder angelieferten Wasserstoffs sind Aufreinigungskomponenten einzuplanen, damit der Wasserstoff die in der SAE J2601 Reinheit besitzt. Wird der Wasserstoff mittels Elektrolyse produziert, so befindet sich der gasförmige Wasserstoff auf einem niedrigen Druckniveau und muss zunächst auf ein höheres verdichtet werden. Dieses entspricht in etwa einem bei der Anlieferung üblichen Druck von 200 bar. Von diesem Druck wird der Wasserstoff auf ein weiteres Zwischenniveau von etwa 500 bar verdichtet, ehe er auf einen Enddruck von ca. 875 bar verdichtet wird.

Vor und nach jeder der Verdichtungen ist es nötig, den Wasserstoff zwischenspeichern, um die unterschiedlichen Leistungen der Kompressoren auszugleichen. Das Speicherniveau von 875 bar ergibt sich, da meist eine Überströmbetankung durchgeführt wird. Bei dieser strömt der Wasserstoff mit einem erhöhten Druck in den Fahrzeugtank. Damit ein Füllgrad von 100% innerhalb von 3-5 Minuten erreicht werden kann, ist es nötig, dass der Wasserstoff einen deutlich höheren Druck als den Zieldruck von 700 bar hat. Anderenfalls würde sich eine Betankung über einen unendlich langen Zeitraum dem Füllgrad nur annähern. Eine mögliche Alternative hierzu ist eine Boosterbetankung. Hierbei kommt es nicht zu einer passiven, sondern einer aktiven Füllung des Tanks. In dieser Ausführung verdichtet der Hochdruckverdichter den Wasserstoff ohne Zwischenspeicherung und drückt ihn in den Fahrzeugtank hinein. Dadurch ist es nicht nötig auf ein Druckniveau von 875 bar zu verdichten und die Systemkomplexität sinkt erheblich. Ein Druck von 700 bis 725 bar ist ausreichend. Die eingesetzten Kompressoren können in unterschiedlichen Größen und Technologien ausgeführt werden. Des Weiteren sind Sicherheitsbauteile wie Überdruckventile, Wasserstoffsensoren, Ablasskamine etc. nötig. Mechanische Bauteile, wie die Verrohrung und Ventile sowie elektronische Messgeräte zur Kontrolle, sind ebenso elementarer Bestandteil des Tankstellenaufbaus. [Qin/Booker 2014, S. 1; e-mobil BW 2013, S. 26f.]

2.2.1 WASSERSTOFFVERSORGUNG

Der an einer Wasserstofftankstelle verfügbare Wasserstoff kommt heutzutage meist aus Off-Site-Herstellung und wird von Großlieferanten in Trailern angeliefert. Insgesamt werden mehr als 90% des in Deutschland verfügbaren Wasserstoffs mittels Dampfreformierung von Erdgas, partieller Oxidation von Mineralöl oder Kohlevergasung aus fossilen Energieträgern erzeugt. Da fossile Ressourcen langfristig begrenzt sind, ist die Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (auch: „grüner“ Wasserstoff) notwendig. Weltweit werden derzeit nur vier Prozent des Wasserstoffs aus Elektrolyse gewonnen, was primär an den höheren Energiekosten des Prozesses liegt. Um die Ziele des Klimaschutzplans einhalten zu können, ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff unausweichlich. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur die Erzeugung von grünem Wasserstoff erläutert. Wasserstoff kommt in der Natur nur in gebundener Form vor und muss daher aus chemischen Verbindungen wie Kohlenwasserstoffen oder Wasser gewonnen werden. Ein mögliches Verfahren hierzu ist die Elektrolyse. Die Technologie der Photokatalyse, bei der in Analogie zur Photosynthese aus Licht und Wasser Wasserstoff und Sauerstoff gewonnen werden, ist derzeit noch Gegenstand der Forschung, bietet für die Zukunft jedoch einige vielversprechende Ansätze. [e-mobil BW 2013, S. 33; Töpler/Lehmann 2017, S. 6, 10f., 210]

2.2.1.1 ELEKTROLYSE

Bei der Elektrolyse wird Wasser durch die Zufuhr von elektrischer Energie in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Elektrolyseure sind technologisch sehr eng an die Prinzipien unterschiedlicher Brennstoffzellentypen angelehnt und unterscheiden sich in der Art der Ladungsträger sowie den ablaufenden Prozessreaktionen. Marktreif und daher für diese Arbeit relevant sind aktuell die alkalische Elektrolyse (kurz: AEL), die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (kurz: PEM-Elektrolyse oder PEM) und die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse (engl. solid oxide electrolysis, kurz: SOE oder SOEC). In der nachfolgenden Tabelle 2 können die Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie die Vor- und Nachteile der relevanten Elektrolysearten nachvollzogen werden. [Töpler/Lehmann 2017 S.5, 8f., 210; Kurzweil/Dietlmeier 2015, S. 458]

Tabelle 2: Vergleich der alkalischen, der PEM- und der SOEC-Elektrolyse, Quelle: Eigene Darstellung

	AEL	PEM	SOEC
Zelltemperatur	40-240°C	20-100°C	700-1000°C
Lebensdauer	Stack: bis 90.000h System: 20-30a	Stack: 20.000h System: 10-20a	Stack: ca. 7.600h System: 4,5-5a
Einsatzbereich	Einsatz an größeren Tankstellen möglich	Derzeit noch für kleinere Tankstellen (an Vergrößerung wird gearbeitet)	Nicht verfügbar
Wartung	Generalüberholung nach 5-12 Jahren nötig (Austausch von Diaphragmen und Elektroden)	Einfache Wartung, sehr wartungsarm	Nicht verfügbar
Betrieb	Häufiges Ein- und Ausschalten fördert die Alterung	Einfacher, hochdynamischer Betrieb	Nicht verfügbar
Reife	Hoher Reifegrad und Zuverlässigkeit, am weitesten verbreitete Technik	Hoher Reifegrad und Zuverlässigkeit	Erste Tests kommerzieller Systeme
Eingangsstoffe	Strom und Wasser	Strom und Wasser	Strom und Dampf
Leistungsbereiche	400kW Systeme derzeit verfügbar, entspricht 120 kg H ₂ /d (5kW bis 3MW möglich)	Bis 150kW verfügbar, entspricht 64 kg H ₂ /d (Systeme bis 1,5 MW zeitnah verfügbar)	Zur Zeit Module bis 6kW, entspricht 10 kg H ₂ /d
Vorteile	Niedrige Ansprechzeiten (durch Gasreinigung und Peripherie limitiert) Ausgereifte Technologie mit hoher Langzeitstabilität Überlastfähig	Sehr niedrige Ansprechzeiten Hohe Stromdichte (4- bis 10-mal höher als bei AEL) Kompakter und einfacher Systemaufbau Über- und sehr gut teillastfähig Ökonomischer Betrieb bei höheren Drücken (>10 bar) (leichtere Speicherung)	Hohe Effizienz bei Energieumwandlung (im Vgl. zu Niedertemperatur-Elektrolysen) Keine teuren Edelmetallkatalysatoren Höhere Stromdichte als bei AEL möglich „Wirkungsgrade über 100% bezogen auf thermoneutrale Zellspannung“ (Töpler/Lehmann 2017, S. 220)

	AEL	PEM	SOEC
Nachteile	<p>Geringe Stromdichten</p> <p>Geringe Teillastbereiche</p> <p>Komplexer Systemaufbau</p> <p>Aufwendige Gasreinigung</p> <p>Korrosiver Elektrolyt</p>	<p>Teure Werkstoffe und Komponenten (bspw. PEM-Folien) und daher hohe Investitionskosten</p> <p>Leicht korrosive Umgebung</p>	<p>Geringe Lebensdauer (Forschung notwendig)</p> <p>Befindet sich noch im Labor- / Versuchsstadium</p> <p>Hohe Anlauf- und Lastwechselzeiten</p> <p>Wärmemanagement</p> <p>Stromdichten aktuell noch in niedrigeren Bereichen</p>

[Kurzweil/Dietlmeier 2015, S. 432, 445-447, 451, 453-455; Töpler/Lehmann 2017, S.9, 216, 218-220; e-mobil BW 2013, S. 34; Breikopf/Swider-Lyons 2017, S. 920; Klell et al. 2018, S. 87; Stolten 2010, S. 241]

2.2.2 WASSERSTOFFSPEICHERUNG

Der Wasserstoff wird auf dem Pfad durch die Tankstelle auf unterschiedlichen Druckniveaus zwischengespeichert, wofür Wasserstoffspeicher verschiedener Art und Ausführung notwendig sind. Meist werden „aufgrund der positiven Spannungsverteilung“ (Rosen 2018, S. 22) zylindrische Speicher (auch: Flaschen) eingesetzt. Kugelförmige Speicher würden sich ebenso eignen, finden jedoch wegen der aufwendigeren Herstellung in der Praxis kaum Anwendung. Entscheidend ist außerdem die Auswahl der eingesetzten Materialien. Da Wasserstoff an Metallen zu Adsorption und Dissoziation neigt und aufgrund seiner geringen Größe leicht in oder durch Materialien diffundiert, kommt es häufig zu Versprödungen des Materials (sog. Wasserstoffversprödung). Werkstoffe wie Aluminium und austenitische Stähle oder andere spezielle Legierungen zeigen eine geringe Wasserstoffversprödung und werden daher häufig eingesetzt. [Klell et al. 2018, S. 117; Rosen 2018, S. 22]

Allgemein wird zwischen vier verschiedenen Speichertypen unterschieden. Abbildung 4 gibt eine kurze Übersicht über die Speichertypen. Je höher die Speicherdrücke sind, desto komplexer wird der Aufbau der Flaschen. Bei hohen Drücken kommen Behälter zum Einsatz, welche mit verstärkenden Fasern umwickelt sind. Flaschen des Typs I sind Metallbehälter (häufig Chrom-Molybdän-Stahl) ohne Umwicklung. Sie bieten eine verlässliche Sicherheit und haben vergleichsweise geringe Kosten bei hohem Eigengewicht. Meist werden Typ I Flaschen in Bündeln mit einem Speicherdruck von bis zu 300 bar eingesetzt. Typ II Behälter sind ebenfalls aus Metall beschaffen, weisen im zylindrischen Teil des Behälters allerdings „unidirektional in Umfangsrichtung“ (Rosen 2018, S. 22) eine Faserumwicklung, meist aus Carbonfaser verstärktem Kunststoff, auf. Durch diese Umwicklung kann die Wandstärke und somit das Gewicht der Flaschen reduziert werden ohne Festigkeit und damit Sicherheit zu

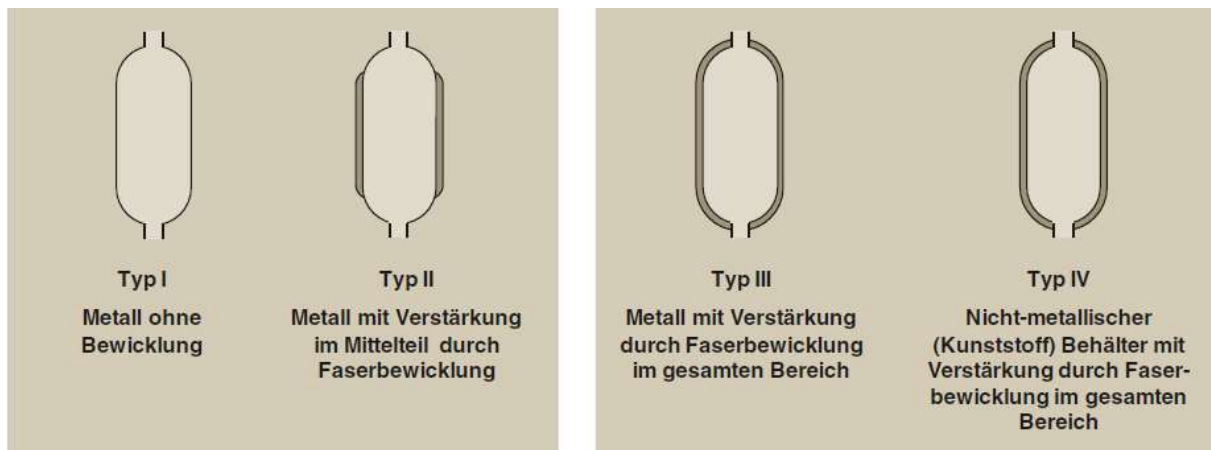


Abbildung 4: Vergleich der vier unterschiedlichen Speichertypen, Quelle: Töpler/Lehmann 2017, S. 89

verlieren. Die Festigkeit ist im Vergleich zu Typ I Behältern höher und erlaubt so höhere Nenndrücke. Daher werden Speicher des Typs II häufig im Hochdruckpfad (bis zu 1000 bar) an Wasserstofftankstellen eingesetzt.

Die Behälter der Typen III und IV sind vollständig mit Fasern umwickelt und weisen daher ein geringeres Gewicht auf. Des Weiteren erlauben sie höhere Energiedichten als reine Metallbehälter und kommen aufgrund dieser Tatsachen häufig bei mobilen Applikationen zum Einsatz. Während Typ III Flaschen einen metallischen Innenbehälter (auch Inliner oder kurz Liner) haben, zeichnet sich der Typ IV dank seines Liners aus Kunststoff durch ein noch geringeres Gewicht aus. Neben den Gewichtsvorteilen bringen Typ IV Speicher langfristig auch Kostenvorteile mit sich. Aufgrund dieser Vorteile sind Typ IV Behälter der bevorzugte Speichertyp bei Automobilanwendungen. Zusätzlich weisen sie eine bessere Zyklfestigkeit bei tiefen Temperaturen auf. Durch die bei Wasserstoffbetankungen auftretenden Temperaturen von -40°C ist die Zyklfestigkeit ein weiterer Vorteil der Typ IV Speicher. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Vor- und Nachteile der verschiedenen Speichertypen. [Klell et al. 2018, S. 117 f.; Rosen 2018, S. 22 f.; Töpler/Lehmann 2017, S. 88 f.]

Tabelle 3: Übersicht der Speichertypen und ihrer Unterschiede sowie Vor- und Nachteile, Quelle: Eigene Darstellung

	Speichertypen			
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Material	metallisch	metallisch	metallisch	nicht metallisch
Umwicklung	keine	im zylindrischen Bereich	im gesamten Bereich	im gesamten Bereich
Speicherdruck	meist bis 300 bar	bis zu 1000 bar	bis 500 bar	bis 700 bar
Gewicht	--	-	+	++
Temperaturbereich	++	+	-	-
Sicherheit	++	++	++	++
Kosten	+	-	-	-
Einsatzbereich	Stationäre Speicherung	Stationäre Speicherung	Mobile Anwendungen (z.B. Busse)	Automobilanwendungen

2.2.3 VERDICHTERTYPEN

Zur Verdichtung des Wasserstoffs auf die unterschiedlichen Druckniveaus gibt es verschiedene technologische Optionen. An die eingesetzten Verdichter (auch: Kompressoren) wird die Anforderungen gestellt, dass der Wasserstoff von niedrigen Drücken (ca. 10-35 bar) nach der Elektrolyse ein- oder mehrstufig auf bis zu 1000 bar verdichtet wird. Dabei darf es nicht zu Verunreinigungen des Wasserstoffs kommen, weshalb die Kompressoren schmiermittelfrei ausgelegt sein müssen. Des Weiteren müssen die eingesetzten Materialien wasserstoffverträglich und -undurchlässig sein, um Leckagen und damit Verluste zu verhindern. Die nachfolgenden Kapitel geben einen Überblick über die gängigen technologischen Möglichkeiten der Verdichtung. [e-mobil BW 2013, S. 35]

2.2.3.1 KOLBENVERDICHTER

Die bewährteste Methode der Verdichtung ist die Verdichtung mittels eines Kolbenkompressors. Bei diesem erfolgt die Kompression des Gases durch die Bewegung eines Kolbens. Wird der Kolben in eine Richtung bewegt, strömt das Gas in den Arbeitsraum. Bewegt er sich in die andere Richtung zurück, so wird das Einlassventil geschlossen und der Kolben drückt das Gas zusammen und dabei das Auslassventil auf. Der Förderstrom eines Verdichters kann durch parallele Kolben erhöht werden. Werden mehrere Kolben hintereinander verwendet, so kann ein höherer Enddruck erzielt werden und es wird von einer mehrstufigen Verdichtung gesprochen. Da Gase bei der Verdichtung gegensätzlich zu ihrem natürlichen Streben nach Expansion komprimiert werden, steigt neben dem Druck auch die Temperatur des Gases an. Daher ist es bei einem mehrstufigen Verdichter notwendig, das Gas nach jeder Stufe in einem Zwischenkühler abzukühlen. Des Weiteren wird durch die Abkühlung des Gases der Wirkungsgrad der Kompression und die Lebensdauer des Verdichters verbessert. Die bedeutendsten Einflussgrößen des Wirkungsgrades sind die Fördermenge und der Enddruck, welche auch die beiden limitierenden Faktoren des Kompressors sind. Weitere Einflussfaktoren auf den Betrieb des Verdichters sind die Hubzahl, die Auslegung der Kolbengeometrie und die Pleuellänge. Die gesamte Verdichteranlage besteht aus der Verdichtungseinheit inklusive des Kolbens, einer meist hydraulischen Antriebseinheit und weiteren peripheren Steuerungs- und Sicherheitskomponenten. Zur Verwendung von Kolbenverdichtern mit Wasserstoff wird die Öl- und Schmiermittelfreiheit zu Lasten eines höheren Dichtungsabriebs realisiert. [e-mobil BW, S. 35; Eifler et al. 2009, S 147; kompressor.one 2018]

2.2.3.2 MEMBRANVERDICHTER

Bei einem Membranverdichter wird, im Gegensatz zu einem Kolbenverdichter, kein Kolben, sondern eine meist metallische Membran zur Verdichtung verwendet. Auf einer Seite der Membran sitzt ein Kolben, welcher mit Hydrauliköl eine Saugbewegung ausführt. Durch diese wird die Membran in eine Richtung gewölbt und so auf der anderen Seite das Gas angesaugt, verdichtet und wieder aus dem System herausgeführt. Einer der Hauptvorteile des Membranverdichters ist der im Vergleich zum Kolbenverdichter nicht mehr vorhandene Dichtungsabrieb, da die Membran das Gas und das Hydrauliköl trennt und so die Funktion einer Kolbenringdichtung übernimmt. Zusätzlich zur Abriebfreiheit ist diese Verdichtertechnologie auch schmiermittelfrei ausführbar und nach außen leakagefrei. Der

Druckanstieg und der Enddruck sind bei einem Membranverdichter weniger limitiert als bei einem Kolbenverdichter, dafür ist die förderbare Menge stärker eingeschränkt. Membranverdichter eignen sich vor allem für einen Betrieb mit langen Intervallen und nicht für häufige Start-Stopp-Zyklen. [e-mobil BW 2013, S. 35; Hofer Hochdrucktechnik 2018]

2.2.3.3 IONISCHE VERDICHTER

Bei dieser Verdichtertechnologie handelt es sich um eine patentierte Eigenentwicklung der Firma Linde. Der Verdichter mit ionischer Flüssigkeit (kurz: Ionischer Verdichter) basiert in seinem Aufbau „auf der Nutzung mehrerer Flüssigkolben“ (e-mobil BW 2013, S. 36), welche die mechanischen Kolben eines Kolbenverdichters ersetzen. Die bewegliche Flüssigkeitssäule ist in zwei Zylindern miteinander verbunden und wird durch eine Pumpe hin und her bewegt. Steigt die Säule in einen Kolben an, läuft im anderen eine gegenteilige Bewegung ab. Die Firma Linde gibt an, dass die speziell entwickelte Flüssigkeit die Durchmischung des Wasserstoffs und der Flüssigkeit verhindert und so keine Verunreinigung des Wasserstoffs durch Flüssigkeitsdämpfe eintritt. Da außer der Pumpe keine weiteren nennenswerten bewegten Teile eingesetzt werden, reduziert sich der mechanische Verschleiß gegenüber dem Kolbenverdichter deutlich. Hierdurch steigt die Lebensdauer der Anlage an und Wartungen müssen nur in größeren Zyklen durchgeführt werden. Durch ihre besonderen Eigenschaften fungiert die ionische Flüssigkeit als Schmier- und Kühlmittel und reinigt das Gas bzw. Gasgemisch von Aerosolen, Schwebeteilchen oder anderen Partikeln. Die Eliminierung von Totvolumina und die wärmeabführende Wirkung der Flüssigkeit und der Prozessführung verringert den Energiebedarf des Verdichtungsprozesses und steigert so die Energieeffizienz. [e-mobil BW 2013, S. 36; Deacademic 2015; Linde 2017, S. 8]

2.2.3.4 ELEKTROCHEMISCHE VERDICHTER

Bei der elektrochemischen Kompression wird eine elektrochemische Zelle von der Anodenseite aus mit Wasserstoff versorgt und durch die Zufuhr elektrischer Energie der erforderliche Elektronenfluss angeregt. Die Wasserstoffprotonen wandern durch die Membran in einen abgedichteten Bereich. Indem sie mit den Elektronen rekombinieren können sie nicht zurücktransportiert werden und führen so zu einer Erhöhung des Druckes auf dieser Seite der Membran. Der Aufbau ähnelt dem einer PEM-Brennstoffzelle. Die Technologie der elektrochemischen Verdichter befindet sich noch im Entwicklungsstadium. Langfristig bietet sie aufgrund eines sehr guten Wirkungsgrades und geringeren Wartungskosten im Vergleich zu den etablierten Technologien große Vorteile. 2016 präsentierte und demonstrierte die Firma Nuvera einen elektrochemischen Verdichter und betankte mit diesem ein Brennstoffzellenfahrzeug. Im Gegensatz zu anderen Verdichtertechnologien werden bei einem elektrochemischen Verdichter keine bewegten Teile eingesetzt. Eine Verdichtung von mehreren hundert Bar ist bei „druckfester Auslegung auf der Kathodenseite“ (e-mobil BW 2013, S. 37) möglich. Die einstufige Verdichtung von einem atmosphärischen Ausgangsdruck bis zu einem Enddruck von 1000 bar ist laut dem Hersteller HyET umsetzbar. Aufgrund kaum auftretender kinetischer Verluste bei der Kompression ist der Wirkungsgrad höher als bei anderen Verdichtungsarten. Die Membran im Inneren der Zelle muss druckfest konstruiert sein, um den hohen Druckunterschieden bei der Verdichtung standhalten zu können. [e-mobil BW 2013, S. 37; HyET 2018; Nuvera 2016]

2.2.3.5 FLÜSSIGWASSERSTOFF-PUMPE

Die Flüssigwasserstoff-Pumpe (auch: Kryopumpe) kommt zum Einsatz, wenn der Wasserstoff an der Tankstelle flüssig gespeichert wird. Der benötigte Druck wird in der Flüssigphase aufgebaut, weswegen ein hoher Kompressionswirkungsgrad erreicht wird. Der gesamte Aufbau der Speicherung und Verdichtung ist wesentlich kompakter als bei der Verwendung von gasförmigem Wasserstoff. Zur Verflüssigung des Wasserstoffs sind jedoch Temperaturen von ca. 20 Kelvin nötig. Diese niedrigen Temperaturen haben zur Folge, dass der Wasserstoff nicht angesaugt werden kann. Die Konstruktion ist in zwei Kammern unterteilt, welche sich beide vollständig in der kalten Flüssigkeit befinden. In der ersten Kammer wird der gespeicherte flüssige Wasserstoff auf 6 bar verdichtet, um dann in der zweiten auf bis zu 900 bar verdichtet zu werden. Vor der Betankung muss die Temperatur in einem Verdampfer auf die im Betankungsprotokoll vorgeschriebene Temperatur von -40°C angehoben werden. Vorteilhaft bei Flüssigwasserstoff-Pumpen ist, dass sie ohne die Pumpe zu beschädigen einen Anteil gasförmiger Phasen fördern und so Boil-Off-Verluste (Verdampfungsverluste) zumindest teilweise nutzen können. Die Verdichtung selbst benötigt im Vergleich zu einem Gaskompressor weniger Platz, weniger Energie und kein Kühlsystem, zusätzlich ist sie günstiger und der Wartungsaufwand ist geringer. Außerdem eignet sich die Flüssigspeicherung gut für große Betankungsanlagen. Allerdings ist ein hoher energetischer Aufwand nötig, um den Wasserstoff zu verflüssigen. Die Boil-Off-Verluste sind bei kleineren Anwendungen zu groß und die entstehenden energetischen Verluste (ca. ein Drittel der gespeicherten Energie) können nicht kompensiert werden. Da nahezu alle Wasserstofftankstellen mit Verdichtern für gasförmigen Wasserstoff ausgestattet sind, wird die Speicherung, Verdichtung und Nutzung von Flüssigwasserstoff im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt. [e-mobil BW 2013, S. 36; Linde 2015, S. 9]

2.2.4 KÜHLUNG UND DISPENSER

Der verdichtete und gespeicherte Wasserstoff an einer Tankstelle kann auf Stufen von 350 und 700 bar abgegeben werden. Während die 350 bar Betankung aktuell der Standard für große Transportfahrzeuge wie Busse oder Züge ist, hat sich die 700 bar Betankung im Bereich der Brennstoffzellen-PKW durchgesetzt und wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit im Fokus stehen. Um eine solche Betankung durchzuführen, wird bei der Betankung elektronisch ein Betankungsprotokoll implementiert, welches so bestimmte Betankungsparameter regeln, auswerten und anpassen kann. Bei der Betankung mit Wasserstoff wird dieses Protokoll von dem internationalen Standard SAE J2601 geregelt. Ziel dieses Standards ist es, eine sichere und schnelle Betankung des Fahrzeugs durchführen zu können. So ist vorgesehen, dass mit einer Betankungszeit von 3-5 Minuten ein Füllgrad von 90-100% des Tankvolumens erreicht wird. [e-mobil BW 2013, S. 22, 38; SAE International 2010]

Neben der Betankungsprozedur sind in der SAE J2601 auch weitere Sicherheitsprozeduren angegeben. So wird zu Beginn eines jeden Betankungsvorgangs ein Druckstoß durchgeführt, mit welchem das im Tank befindliche Restvolumen ermittelt wird, damit die tankstellenseitige Software die Parameter für die Betankung festlegen kann. Des Weiteren wird vorgeschrieben, dass der maximale Druck des Wasserstoffs nicht über 875 bar liegen

darf und zum Zeitpunkt des Austritts an der Zapfpistole in einem Temperaturbereich von -33°C bis -40°C liegen muss. Die Fahrzeugtanks haben senkrecht zur Carbonfaser eine sehr schlechte Wärmeleitfähigkeit, weshalb nahezu keine Wärmeabgabe nach außen erfolgt und sich die eingetragene Wärme aus der Kompression des Wasserstoffs im Tank summiert. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen ist es notwendig, den Wasserstoff vor der Abgabe an das Fahrzeug herunter zu kühlen. [e-mobil BW 2013, S. 38; SAE International 2010]

Bei der Vertankung von gasförmigem Wasserstoff wird diese Kälte von einer Kältemaschine bereitgestellt. Damit die Kälte bei Bedarf an den Wasserstoff abgegeben werden kann, wird sie meistens in einem Kältespeicher zwischengespeichert. Hierzu wird ein Kältemedium verwendet, welches die Kälte transportiert. Auf den Wasserstoff übertragen wird sie über einen Wärmetauscher. Eine häufige technische Lösung für den Wärmetauscher ist die Fertigung eines soliden Aluminiumblocks mit integrierten Rohren. Dieser Block wird dauerhaft auf der notwendigen Temperatur von -40°C gehalten. Im Betankungsfall durchfließt der Wasserstoff die innenliegenden Rohre und kühlt ab. Vorteil dieser Technologie ist die dauerhafte Verfügbarkeit der Kälte und die Druckstabilität des Wärmetauschers. Nachteilig sind die hohen Kälte- und somit Energieverluste und der damit verbundene hohe Aufwand, den Aluminiumblock dauerhaft auf die notwendige Temperatur von -40°C zu kühlen. [e-mobil BW 2013, S. 38]

Alternativ besteht die Möglichkeit einen Plattenwärmetauscher einzusetzen. Dieser bietet aufgrund seiner Bauweise den Vorteil, dass er deutlich kompakter als der Aluminiumblock und auch bei höherem Bedarf gut nutzbar ist. Bei Einsatz eines Plattenwärmetauschers muss die Kälte nur auf einem niedrigeren Temperaturniveau vorgehalten werden. Im Gegenzug benötigt der Wärmetauscher eine Vorlaufzeit und kann die erforderliche Kälte nicht sofort zur Verfügung stellen. Außerdem treten konstruktionsbedingte Defizite bei Dichtigkeit und Festigkeit auf. [e-mobil BW 2013, S. 22, 38; SAE International 2010; Pfaff 2018, S. 251]

Als Dispenser wird die eigentliche Wasserstoffabgabeeinrichtung bezeichnet. Diese besteht aus der Zapfsäule sowie der Füllkupplung inklusive Schlaucheinheit und Abreißsicherung. Während die Füllkupplung ein normiertes Bauteil ist, ist die Auslegung der Bedienelemente und Benutzerschnittstellen tankstellen- oder herstellerabhängig sehr unterschiedlich. So wird an manchen Tankstellen eine große Ähnlichkeit zu Erdgaszapfsäulen angestrebt und an anderen bewusst eine andere Lösung präsentiert, um die beiden Technologien klar voneinander abzugrenzen. Auch wegen der derzeitigen Förderungssituation im Bau von Tankstellen, bei der die errichteten Tankstellen meist in einzelnen Förderprojekten oder stark kundenorientiert gebaut werden, ergeben sich besonders im Bereich der Dispenser große Unterschiede zwischen den Tankstellen. [e-mobil BW, S. 39]

3. ENTWICKLUNG EINES TOOLS ZUR SIMULATION EINER WASSERSTOFFBETANKUNGSANLAGE

Das entwickelte und in den folgenden Kapiteln genauer erläuterte Vergleichswerkzeug (auch: Tool) dient zur Simulation einer Wasserstoffbetankungsanlage und gibt eine Hilfestellung in der Planung und Auslegung einer solchen Anlage. Das Tool wurde auf den in Kapitel 2 geschilderten Grundlagen aufgebaut und gibt dem Nutzer einen Überblick über die Kosten und den Energieverbrauch der Tankstelle. Es wird eine vergleichende Analyse verschiedener Konfigurationen einer Tankstelle durchgeführt und so kann die Kostenstruktur in der Planungsphase berücksichtigt werden. Zur Bedienung wird vorausgesetzt, dass der Benutzer sich intensiv mit der Thematik, sowie der Bedienungsanleitung und den darin erläuterten Parametern auseinandergesetzt hat. Die im Tool im Tabellenblatt „Bedienungsanleitung“ eingefügte Anleitung setzt sich zusammen aus der eigentlichen Bedienungsanleitung (Kapitel 4) und der Erklärung der Parameter und Datensätze (Kapitel 3.2). Konzipiert wurde das Tool zur Verwendung mit Microsoft Excel (Version 2013 oder neuer), da es sich um ein weit verbreitetes Tabellenkalkulationsprogramm handelt.

3.1 VORAUSSETZUNGEN DES TOOLS

Das Tool dient der Abschätzung von wirtschaftlichen und exergetischen Parametern einer Wasserstofftankstelle. Reale, dynamische Lastprofile sind nicht abbildbar, weshalb bei den Komponenten immer durchschnittliche, minimale oder maximale Lasten angenommen werden. Welche Modi und Lastprofile zu Grunde gelegt sind, wird in den Erklärungen zu den einzelnen Tabellenblättern weiter ausgeführt.

Um den aktuellen Stand der Technik der Wasserstoffinfrastruktur abzubilden, ist das Tool für Wasserstoffbetankungsanlagen ausgelegt, welche ausschließlich gasförmigen und keinen verflüssigten Wasserstoff verwenden. Eine Gleichzeitigkeit von Betankungsvorgängen mit zwei Zapfsäulen ist nicht vorgesehen, da es keine ausreichend belastbaren praktische Erfahrungen hierzu gibt. Das Tool ist dazu konzipiert, dem Benutzer mit den vorgeschlagenen Datensätzen einen Überblick darüber zu verschaffen, welche unterschiedlichen Faktoren zu berücksichtigen sind. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit eigene Parameter zu ergänzen und so einzelne Komponenten in höheren Detailstufen zu simulieren.

Die genannten Bedingungen und die Basis-Datensätze liegen auch den Berechnungen und Auswertungen zu Grunde. Alle Berechnungen dienen dem Ziel, dem Benutzer einen Gesamtüberblick zu geben und vergleichende Ergebnisse zu präsentieren. Wie sich die Werte im Einzelnen berechnen ist, ebenfalls den Beschreibungen der einzelnen Tabellenblätter zu entnehmen.

Wasserstoffdichte

Viele der im Tool angewandten Berechnungen benutzen den Stoffwert der Wasserstoffdichte. Diese ist bei Wasserstoff stark temperatur- und druckabhängig. Abbildung 5 zeigt die Temperaturverteilung in liegenden Tanks, abhängig von der Einströmrichtung (Melideo et al. 2017). Dies ist exemplarisch nur einer der Einflussfaktoren

auf die inhomogene Temperaturverteilung in den Tanks und zeigt, dass eine genaue Aussage über die Temperaturen bzw. die Temperaturverteilung im Tank nicht ohne weiteres möglich ist. Daher wird im weiteren Verlauf für die Dichte vereinfachend der Literaturwert von $0,0899 \text{ kg/Nm}^3$ (Töpler/Lehmann 2017, S. 5) verwendet.

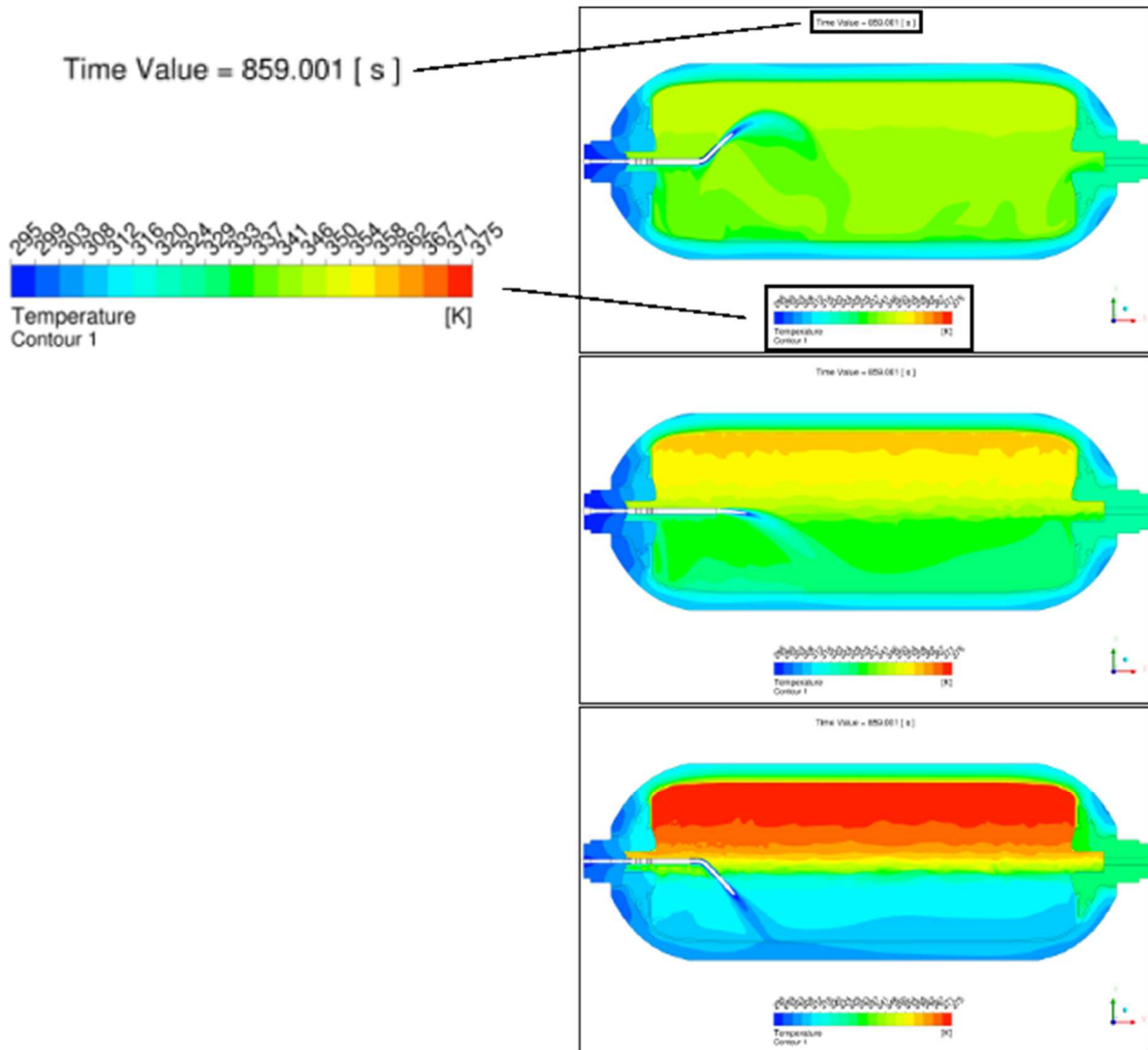


Abbildung 5: Temperaturverteilung in flachliegenden Speichern nach 859s abhängig von der Einströmrichtung, Quelle: Nach Melideo et al. 2017

Kompressionsfaktor

Neben der Wasserstoffdichte wird für die Berechnungen auch der dimensionslose Kompressionsfaktor Z (auch: Kompressibilitätsfaktor oder Realgasfaktor) von Wasserstoff verwendet. Der Kompressionsfaktor ermöglicht die Annäherung der Berechnung an das Realgasverhalten. Bei einem Druck von 1,013 bar hat Wasserstoff einen Wert von eins. Steigt der Druck des Gases an ist der Wert größer als eins. Das heißt, dass die Dichte von Wasserstoff langsamer ansteigt als der Druck. Mittels der Formel

$$Z = \frac{p \cdot V}{n \cdot R \cdot T}$$

kann der Kompressionsfaktor berechnet werden. In dieser Arbeit wird er, abhängig vom jeweiligen Druck durch eine Interpolation zwischen den in Tabelle 4 angegebenen Wertepaaren berechnet. Ebenso kann der errechnete, interpolierte Anstieg des Kompressionsfaktors in den entsprechenden Druckbereich nachvollzogen werden. [Klell et al. 2018, S. 48; Linde 2013]

Tabelle 4: Kompressionsfaktor bei verschiedenen Drücken und Anstieg des Kompressionsfaktors in den Druckbereichen, Quelle: Nach Linde (2013), eigene Darstellung

Kompressionsfaktor H2		Anstieg Kompressionsfaktor			
Druck [bar]	Kompressionsfaktor	Druckbereich [bar]		Schrittgröße	Offset
1,013	1	1,013	50	0,00065	1
50	1,032	50	150	0,00066	1,032
100	1,065	150	250	0,00068	1,098
150	1,098	250	350	0,0007	1,166
200	1,132	350	600	0,00072	1,236
250	1,166	600	700	0,00073	1,416
300	1,201	700	800	0,00071	1,489
350	1,236	800	900	0,00072	1,56
400	1,272	900	1000	0,0007	1,632
500	1,344				
600	1,416				
700	1,489				
800	1,56				
900	1,632				
1000	1,702				

Mengenberechnung

Das Tool verwendet die Wasserstoffdichte und den Kompressionsfaktor zur Berechnung von Wasserstoffmengen in Behältern oder aber von Wasserstoffmassenströmen. Die Berechnung der Menge erfolgt mit dem Kompressionsfaktor und

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

als Darstellung des allgemeinen Gasgesetzes. Wird diese Formel nach der Gaskonstante und der Temperatur $R \cdot T$ umgestellt und für das Volumen V

$$V = \frac{m}{\rho}$$

sowie für die Stoffmenge n

$$n = \frac{m}{M}$$

eingesetzt, so ergibt sich die Formel:

$$R \cdot T = \frac{p \cdot M}{\rho}$$

Mit der Formel für den Kompressionsfaktor und der Formel für die Stoffmenge n , ergibt sich

$$Z = \frac{p_1 \cdot V \cdot M}{m \cdot R \cdot T}$$

als neue Berechnungsformel. Wird diese Formel nun zur Masse m umgestellt und

$$R \cdot T = \frac{p_2 \cdot M}{\rho}$$

eingesetzt, ergibt sich für die Masse die Berechnungsformel:

$$m = \frac{p_1 \cdot V \cdot \rho}{p_2 \cdot Z}$$

Im gesamten Tool werden die Massen und Massenströme mit dieser Formel berechnet.

[Binnewies et al. 2016, S. 7, 183, 186; Klell et al. 2018, S. 46]

3.2 AUFBAU DES TOOLS

Der Aufbau der Anwendung ist modular gestaltet, um möglichst viele Konfigurationen einer Betankungsanlage simulieren zu können. Im Rahmen der Bedienung des Tools sind an vielen Stellen Parameter eingeführt, welche mit zunehmender Erfahrung des Anwenders für vertiefende Vergleiche genutzt werden können. Bei ersten Planungen können diese Parameter auch auf null gesetzt, so dass auch bei fehlenden Parameterwerten grundsätzliche Ergebnisse erzielt werden können. Damit bietet das Tool eine große Bandbreite von Anwendungen, die auf verschiedenen Ebenen und Detailstufen der Planung simuliert und verglichen werden können.

Auf dem ersten Tabellenblatt „Übersicht“ können die gewünschte Ausgangskonfiguration und die zentralen, bestimmenden Parameter festgelegt werden. Je nach gewählter Konfiguration wird der exemplarische Systempfad angezeigt (siehe Abbildung 6) und es stehen dem Benutzer alle relevanten Tabellenblätter zur Verfügung. Zur Wahl der Konfiguration stehen der Systempfad „Elektrolyse“ sowie die Pfade „Anlieferung 200 bar“ und „Anlieferung 500 bar“ zur Verfügung.



Abbildung 6: Exemplarischer Systempfad „Elektrolyse“ mit Übersicht der Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung

Die wählbaren Konfigurationen richten sich nach der Art bzw. dem Druck der Wasserstoffherzeugung / -anlieferung. Nach Festlegung der Konfiguration kann der Nutzer alle verwendeten Komponenten genauer spezifizieren. Hierzu gehören neben den allgemeinen Informationen zum Betrieb der Komponente, auch die Angaben zu den Wirtschafts- und den Verbrauchsparametern. Der Aufbau der einzelnen Tabellenblätter kann in Abbildung 7 nachvollzogen werden.

Im Bereich „Rahmendaten“ (1) können die allgemeinen Betriebsinformationen der Komponente eingegeben werden. Der Abschnitt „Platz- & Wartungsangaben“ (2) beinhaltet die allgemeinen Parameter zu Größenangaben und Wartung. Unter „Allgemeine Informationen“ (4) kann der Benutzer die vorhandenen Datensätze ausfüllen und/oder eigene Parameter hinzufügen. Die Einträge werden in vier unterschiedliche Kategorien eingeteilt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht der Kategorien zur Einteilung der Daten und Parameter; Quelle: Eigene Darstellung

p	Parameter; der eingetragene Wert wird in einer folgenden Rechnung verwendet oder dient nur der Information
L	Laufend; der eingetragene Wert gehört zu den „Laufenden Kosten“
F	Fix; der eingetragene Wert gehört zu den „Fixkosten“
I	Investition; der eingetragene Wert ist eine Investition

Wird ein Eintrag mit der Kategorie L, F oder I versehen, so taucht er in der dazugehörigen Spalte (5) auf. Hier werden die entsprechenden Einträge automatisch auf die ausgewählte

Datum	Bearbeiter	Projektname
-------	------------	-------------



- Elektrolyse
- Anlieferung 200 bar
- Anlieferung 500 bar
- HD-Speicherung

Tankstellendaten			Rahmenbedingungen		
Name	Wert	Einheit	Name2	Wert3	Einheit4
Durchgeführte Betankungen		Bet. / d	Strompreis		€/kWh
Ø-vertankte Menge		kg / Bet.	Grundstückspreis		€/m ²
Benötigte H ₂ -Menge		kg / d	Nutzungsdauer der Tankstelle		a
Produzierbare H ₂ -Menge		kg / d	Gewünschte Ausgabeinheit		
Speicherbare H ₂ -Menge		kg	H ₂ -Abgabepreis		€/kg
Nutzbare H ₂ -Speichermenge		kg			

Abbildung 8: Screenshot des Tabellenblatts „Übersicht“, Quelle: Eigene Darstellung

Benötigte H₂-Menge [kg/d]

Ein errechneter Wert, der angibt, welche Menge an Wasserstoff pro Tag an der Tankstelle abgegeben wird und damit auch die Menge, die mindestens pro Tag angeliefert oder produziert werden muss.

$$\text{Benötigte Menge} = \text{Betankungen pro Tag} \times \text{durchschnittlich vertankte Menge}$$

Strompreis [€/kWh]

Gibt die Kosten in Euro an, welche pro Kilowattstunde verbrauchter Arbeit anfallen. Muss vom Benutzer eingetragen werden, da sich die komponentenspezifischen Stromkosten hieraus errechnen.

Grundstückspreis [€/m²]

Ist ein einzutragender notwendiger Wert, der zur Berechnung der Grundstückskosten herangezogen wird.

Nutzungsdauer der Tankstelle [a]

Ein einzutragender notwendiger Wert, der angibt, wie viele Jahre die Tankstelle voraussichtlich genutzt wird. Dieser Wert wird in verschiedenen Berechnungen der Ausgabe verwendet.

Gewünschte Ausgabeinheit [-]

Mit diesem Wert kann der Benutzer wählen, in welcher Einheit (€/h, €/d oder €/a) die Kosten auf den Tabellenblättern der Komponente angezeigt werden sollen.

Abgabepreis [€/kg]

Gibt den Preis an, welchen der Verbraucher an der Tankstelle pro Kilogramm getanktem Wasserstoff zahlen muss.

3.2.1.2 ALLGEMEINE PARAMETER

Die folgenden Parameter finden sich, wenn nicht anders angegeben, auf allen Komponenten / Tabellenblättern wieder. Es werden zuerst die Eingabewerte beschrieben und dann die berechneten Ergebniswerte.

Länge, Breite, Höhe [m]

Beschreibt die vom Benutzer zusammengerechnete tatsächliche gesamte Länge bzw. Breite der Komponenten. Diese Werte werden zur Berechnung des Flächenbedarfs benötigt. Für die Höhe ist die maximale Höhe der jeweiligen Komponenten einzutragen. Der Wert der Höhe dient ausschließlich der Information des Nutzers.

Bsp.: Hat der Elektrolysecontainer Maße von 6m x 2m x 2,70m ($l \times b \times h$) und ein zusätzliches Gasbündel eine Grundfläche von 1m x 1m und eine Höhe von 2,30m, so ist eine Höhe von 2,70m sowie entweder eine Länge von 7m und eine Breite von 2m oder eine Länge von 6m und eine Breite von 3m anzugeben.

Platzfaktor

Ist ein zusätzlicher Wert zur Berücksichtigung eines weiteren, nicht exakt bezifferbaren Platzbedarfes einer Komponente. Hierzu zählen bspw. Sicherheitsabstände und Platz zur Manövrierbarkeit.

Gewicht [kg]

Beschreibt das Gesamtgewicht der Komponente, inklusive der zur berücksichtigenden Peripherie. Dieser Wert dient dem Nutzer zur Information.

Jährliche Wartungskosten [€/a]

Die jährlichen Wartungskosten geben an, welche Kosten pro Jahr für Wartung anfallen. Ausgenommen sind Wartungen, deren Wartungszyklen größer als ein Jahr sind. Diese sind in den Kosten der gesonderten Wartungsintervalle 1-5 berücksichtigt. (Gilt für alle Tabellenblätter außer den Speichern.)

Wartungsintervalle 1-5

In den Wartungsintervallen kann der Benutzer nicht jährliche Wartungen berücksichtigen und die entsprechenden Wartungszyklen eintragen. Die eingetragenen Werte werden bei den Wartungskosten 1-5 berücksichtigt. (Dies gilt nicht für die Tabellenblätter „Speicher“.)

Wartungskosten 1-5 [€/Xa]

Dieser Parametersatz stellt die wartungsintervallabhängigen Kosten dar, die für Wartungen mit Wartungszyklen größer als ein Jahr anfallen. Wird im Wartungsintervall 1 eine fünf eingegeben, so wird bei den Wartungskosten die Anzeige „Wartung alle 5 Jahre“ angezeigt. Die Einheit wird, in diesem Beispiel automatisch in €/5a angezeigt und die Kosten können eingetragen werden. Dieser Wert wird in der Auswertung der Wartungskosten nur in den entsprechenden Jahren (bspw. alle fünf Jahre) verwertet. Auf dem Tabellenblatt selbst wird

er auf ein Jahr heruntergerechnet und mit in die Summe der laufenden Kosten eingerechnet. (Dies gilt nicht für die Tabellenblätter „Speicher“.)

Gasverrohrung [€]

Beschreibt die Kosten, die nötig sind, um die Komponente an das Gesamtsystem anzubinden.

Genehmigung [€]

Bietet die Möglichkeit, jene Kosten zu berücksichtigen, die für die Genehmigung der Komponente notwendig sind.

Aufstellung [€]

Berücksichtigt alle anfallenden Kosten zur Aufstellung der Komponente inklusive des Transports. (Dies gilt nicht für das Tabellenblatt „Anlieferung“.)

Inbetriebnahme [€]

Bezeichnet die Kosten, die zur Inbetriebnahme inklusive der Montage nötig sind. (Dies gilt nicht für die Tabellenblätter „Speicher“ und „Anlieferung“.)

Abschreibungsdauer [a]

Gibt die Dauer an, über welche die Komponente abgeschrieben werden soll. Wird zur Berechnung der Abschreibung benötigt.

Restwert [€]

Beschreibt den buchhalterischen Wert, welchen die Komponente am Ende der Abschreibungsdauer noch besitzt. Wird zur Berechnung der Abschreibung benötigt.

Zinssatz [%]

Beschreibt den Prozentsatz, mit welchem die gesamten Investitionskosten der Komponente finanziert werden. Wird zur Berechnung der Finanzierung benötigt.

Finanzierungsdauer [a]

Gibt die Dauer an, über welche die Finanzierung der Komponente laufen soll. Wird zur Berechnung der Finanzierung benötigt.

Überwachung [€/a]

Gibt die zu berücksichtigenden Kosten an, die mit der Überwachung der Komponenten zu tun haben. Hierunter fallen bspw. Fernüberwachungskosten. (Dies gilt nicht für die Tabellenblätter „Speicher“ und „Anlieferung“.)

Störungen [€/a]

Bietet dem Benutzer die Möglichkeit eventuell auftretende Störungen einzukalkulieren. (Dies gilt nicht für die Tabellenblätter „Speicher“.)

Sonstige Investitionskosten [€], Sonstige Fixkosten [€/Zeiteinheit] und Sonstige Laufende Kosten [€/Zeiteinheit]

Unter den Punkten „Sonstige Investitionskosten“ [€], „Sonstige Fixkosten“ und „Sonstige Laufende Kosten“ (beide in €/h, €/d oder €/a) können pauschale, nicht näher differenzierbare Beträge zusammengefasst und eingetragen werden.

Zusammenfassende Summen

Im Bereich „Zusammenfassung“ finden sich die Summen der Investitionskosten [€], der Fixkosten und der laufenden Kosten (beide in €/h, €/d oder €/a). Diese Werte dienen dem Nutzer zu Übersicht.

Stickstoffverbrauch [m³/h] und Formiergasverbrauch [m³/h]

Ist das verbrauchte Gasvolumen pro Stunde. Dieser Wert dient dem Benutzer als Einschätzung wie viel Stickstoff bzw. Formiergas (Inertgas mit definiertem Anteil Wasserstoff, um die Zelle bei Start- und Stoppvorgängen zu schützen) benötigt wird und somit, ob ein Bündelkauf oder eine Bündelmiete für den Nutzer sinnvoller ist. Benötigen mehrere Komponenten einen Anschluss an eine Stickstoffquelle, so hat der Benutzer die Wahl, die Kosten in einer Komponente zu berücksichtigen oder die Kosten auf die betroffenen Komponenten aufzuteilen. (Dies gilt auch für den Wert „Formiergasverbrauch“.)

Stickstoffbündel [€]

Wird dieser Wert verwendet, sieht der Benutzer den Kauf eines oder mehrerer Bündel vor. Benötigen mehrere Komponenten einen Anschluss an eine Stickstoffquelle, so hat der Benutzer die Wahl, die Kosten in einer Komponente zu berücksichtigen oder die Kosten auf die betroffenen Komponenten aufzuteilen. (Dies gilt auch für den Wert „Formiergasbündel“.)

Stickstoffbündelmiete [€/a]

Dieser Wert wird verwendet, wenn der Benutzer nicht den Kauf, sondern die Miete von Flaschenbündeln vorsehen möchte. Benötigen mehrere Komponenten einen Anschluss an eine Stickstoffquelle, so hat der Benutzer die Wahl, die Kosten in einer Komponente zu berücksichtigen oder die Kosten auf die betroffenen Komponenten aufzuteilen. (Dies gilt auch für „Formiergasbündelmiete“)

Flächenbedarf [m²]

Gibt an, wie viel Fläche die Komponente inklusive ihrer Peripherie benötigt. Ergibt sich aus der Länge, der Breite und dem Platzfaktor. Dieser Wert wird zur Berechnung der Grundstückskosten benötigt.

Bei Speichern werden Länge und Breite nur für eine Einheit angegeben und mit der Anzahl der Bündel multipliziert.

$$\text{Fläche} = \text{Länge} \times \text{Breite} \times (\text{Anzahl}) \times \text{Platzfaktor}$$

Abschreibung [€/a]

Errechnet die lineare Abschreibung, die jährlich über die Abschreibungsdauer zu entrichten ist:

$$\text{Abschreibung} = \frac{\text{Investitionskosten} - \text{Restwert}}{\text{Abschreibungsdauer}}$$

Finanzierung [€/a]

Stellt die Kosten dar, die jährlich zur Finanzierung der Komponente (Tilgung + Zinsen) anfallen. Zur Berechnung dieses Wertes wird die Excel-Funktion RMZ (Regelmäßige Zahlungen) verwendet. Diese verwendet den angegebenen Zinssatz, die Finanzierungsdauer und die gesamten Investitionskosten, welche in diesem Fall die Darlehenssumme darstellt.

$$\text{Finanzierung} = \text{RMZ}(\text{Zinssatz}; \text{Finanzierungsdauer}; \text{Investitionskosten})$$

Stromkosten [€/a]

Die Stromkosten geben die Kosten an, welche die jeweilige Komponente bei ihrer angegebenen Leistung und den Betriebsstunden bzw. der Laufzeit verursachen. Dies gilt für die Stromkosten des Elektrolysesystems, des Gefrierschutzes, des Druckluftkompressors und der Motoren und Rückkühler der Verdichter. Eine Ausnahme stellen die Stromkosten der Kältemaschine dar. Diese errechnen sich bei Nutzung zweier unterschiedlicher Wärmetauscherarten aus dem höheren Wert der Betriebsstunden der beiden Wärmetauscher.

$$\text{Stromkosten} = \text{Leistung} \times \text{Strompreis} \times \text{Betriebsstunden} / \text{Laufzeit}$$

3.2.1.3 ARBEITSBLATT „ELEKTROLYSE“

Der Reiter „Elektrolyse“ (Abbildung 9) bietet die Möglichkeit das vorgesehene Elektrolysesystem zu spezifizieren. Hierzu kann der Benutzer zwischen unterschiedlichen Arten der Elektrolyse auswählen. Es stehen folgende Parameter zur Verfügung:

Rahmendaten		Platz- & Wartungsangaben		Zusammenfassung	
Elektrolyseart	PEM	Länge [m]		Gewünschte Ausgabereinheit	€/a
Betriebsstunden [h/a]		Breite [m]		Investment oder Finanzierung	
Ausgangsdruck H ₂ [bar]		Höhe [m]		Summe "Investitionskosten" [€]	
Volumenstrom [m ³ /h]		Platzfaktor		Summe "Laufende Kosten" [€/a]	
Produzierbare H ₂ -Menge [kg/d]		Flächenbedarf [m ²]		Summe "Fixkosten" [€/a]	
Überlastfähigkeit [%]		Gewicht [kg]			
Überlaststunden [h]		Wartungsintervall 1 [a]			
H ₂ -Qualität [%]		Wartungsintervall 2 [a]			
		Wartungsintervall 3 [a]			
		Wartungsintervall 4 [a]			
		Wartungsintervall 5 [a]			

Zelle Einfügen Zelle Löschen

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Elektrolyseeinheit									
Gasverrohrung									
Genehmigung									
Aufstellung									
Inbetriebnahme									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Ø-Leistung Elektrolysesystem									
Anschlussleistung Elektrolysesystem									
Stromkosten Elektrolysesystem									
Wasserhärtegrad									
Wasserverbrauch									
Wasserkosten									
Wasserverbrauchskosten									
Abwassermenge									
Abwasserkosten									
Abwasserverbrauchskosten									
Ø-Leistung Gefrierschutz									
Laufzeit Gefrierschutz									
Stromkosten Gefrierschutz									
Druckluftkompressor									
Ø-Leistung Druckluftkompressor									
Stromkosten Druckluftkompressor									
Ø-Leistung sonstige Systeme									
Stromkosten sonstige Systeme									
Jährliche Wartung									
Stickstoffverbrauch									
Stickstoffbündel									
Stickstoffbündelmiete									
Formiergasverbrauch									
Formiergasbündel									
Formiergasbündelmiete									
Überwachung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 9: Screenshot des Tabellenblatts „Elektrolyse“, Quelle: Eigene Darstellung

Betriebsstunden [h/a] und Laufzeit Gefrierschutz [h/a]

Erforderliche Eingabe der gesamten Betriebsstunden des Elektrolyseurs. Auf diesen Wert beziehen sich die Berechnungen der Stromkosten der Teilkomponenten. Für den Gefrierschutz ist ein eigener Wert einzutragen, da die Laufzeit in der Praxis stark variiert und von den Betriebszeiten der Elektrolyse sowie den lokalen Wetterverhältnissen abhängt.

Ausgangsdruck H₂ [bar]

Gibt den Druck an, mit dem der Wasserstoff vom Elektrolysesystem an die nachfolgende Komponente abgegeben wird. Dieser Wert wird zur Berechnung der produzierbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Volumenstrom [m³/h]

Ist der Volumenstrom mit dem der Wasserstoff bei angegebenem Ausgangsdruck an die nachgeschaltete Komponente weitergegeben wird. Dieser Wert wird zur Berechnung der produzierbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Überlastfähigkeit [%] und Überlaststunden [h]

Die Überlastfähigkeit bezeichnet prozentual die Leistung, mit der das System über der angegebenen maximalen Leistung betrieben werden kann. Ein nicht überlastfähiges System hat einen Wert von 100%. Die Überlaststunden geben die Dauer an, mit der das System aufeinanderfolgend bei Überlast betrieben werden kann. Diese Werte dienen dem Benutzer als Erinnerung zur Berücksichtigung erhöhter Leistungen bei vorgesehenem Überlastbetrieb.

Bsp.: Bei einer Überlastfähigkeit von 125% und 8 Überlaststunden kann ein 100kW System für acht Stunden mit einer Leistung von 125kW betrieben werden.

Wasserstoffqualität [%]

Beschreibt die Qualität des Wasserstoffs, den das Elektrolysesystem abgibt. Dieser Wert dient der Information des Benutzers. Nach dem Betankungsstandard SAE J2601 ist exakt vorgeschrieben, welche und wie viel Verunreinigungen im Wasserstoff auftreten dürfen. In Deutschland wird diese Bedingung durch einen Reinheitsgrad des Wasserstoffs von 99,999 prozentigem Wasserstoff (auch: 5.0) erfüllt. Ist dies nicht der Fall, muss gegebenenfalls noch eine externe Aufreinigung vorgesehen werden.

Elektrolyseeinheit [€] und Druckluftkompressor [€]

Gibt den Investitionsbetrag des gesamten Elektrolyseurs an. Bei bestimmten Elektrolyseuren kann es nötig sein, einen externen Druckluftkompressor bereit zu stellen. Die Kosten für den externen Druckluftkompressor werden in einem separaten Wert berücksichtigt.

Wasserhärtegrad [°dH]

Gängige Angabe der Wasserhärte. Dient dem Benutzer zur Verdeutlichung, dass die Qualität des verwendeten Wassers einen Einfluss auf eingesetzte Geräte haben kann. Je schlechter die Qualität des Wassers, desto höher werden beispielsweise die Wartungskosten, da die Filter in der Wasseraufbereitung häufiger getauscht werden müssen.

Wasserverbrauch [l/h] und Abwassermenge [l/h]

Verbrauch an Wasser, den das Elektrolysesystem während des Betriebs hat. Die Abwassermenge gibt je nach Abrechnungsmodus des Wasserversorgers im Einsatzgebiet entweder die Menge des Abwassers an, die aus dem System abgeführt wird, oder aber die pauschale prozentuale Menge vom Wasserverbrauch, welche vom Versorger berechnet wird. Diese Werte werden zur Berechnung der Wasserverbrauchs- bzw. Abwasserkosten benötigt.

Wasserkosten [€/m³] und Abwasserkosten [€/m³]

Geben die Kosten an, welche für den Wasserverbrauch und die Abwassermenge pro 1m³ anfallen. Aus diesen Werten berechnen sich die entsprechenden Verbrauchskosten.

Anschlussleistung Elektrolysesystem [kW]

Stellt die Leistung dar, welche für den Anschluss des gesamten Elektrolysesystems vorgesehen werden muss. Dieser Wert dient dem Benutzer als Information zur Berücksichtigung etwaiger, erhöhter Anschluss- und Aufstellungskosten.

Ø-Leistung Elektrolysesystem [kW], Gefrierschutz [kW] und Druckluftkompressor [kW]

Diese Datensätze geben die durchschnittlichen Leistungen an, welche im Betrieb von der jeweiligen Komponente verbraucht wird. Aus diesen Werten berechnen sich die Stromkosten der jeweiligen Komponente.

Produzierbare H₂-Menge [kg/Zeiteinheit]

Gibt die erzeugte Wasserstoffmenge an, die das Elektrolysesystem in einer wählbaren Zeiteinheit (Stunde, Tag oder Jahr) produzieren kann. Berechnet sich aus dem angegebenen Volumenstrom, der Wasserstoffdichte, dem Kompressionsfaktor (bei angegebenen Ausgangsdruck) und den Betriebsstunden:

$$\text{Produzierte Menge} = \frac{\text{Volumenstrom} \times \text{Dichte}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Betriebsstunden}$$

Wasserverbrauchskosten [€/a] und Abwasserverbrauchskosten [€/a]

Diese Datensätze errechnen die Kosten, welche für den Wasserverbrauch und die Abwassermenge anfallen. Sie ergeben sich aus den jeweiligen Verbräuchen, den Kosten und den Betriebsstunden des Elektrolyseurs.

$$\text{Verbrauchskosten} = \frac{\text{Verbrauch}}{1000 \text{ l/m}^3} \times \text{Kosten} \times \text{Betriebsstunden pro Jahr}$$

3.2.1.4 ARBEITSBLATT „ANLIEFERUNG“

Der Reiter „Anlieferung“ (Abbildung 10) bietet die Möglichkeit die Belieferung der Tankstelle mit Wasserstoff zu spezifizieren. Hierzu stehen dem Nutzer folgende Datensätze zur

Rahmendaten			Platz- & Wartungsangaben			Trailernutzungsdaten			Zusammenfassung	
Benötigte H ₂ -Menge	[kg/a]		Länge	[m]		Distanz zur H ₂ -Quelle	[km]		Gewünschte Ausgabereinheit	€/a
Benötigte Lieferungen	[-/a]		Breite	[m]		Ø-Fahrtgeschwindigkeit	[km/h]		Investment oder Finanzierung	
H ₂ -Liefertemperatur	[°C]		Höhe	[m]		Befüll- & Entladedauer	[h]		Summe "Investitionskosten"	[€]
H ₂ -Lieferdruck	[bar]		Platzfaktor			Dauer einer Fahrt	[h]		Summe "Laufende Kosten"	€/a
Min. Restdruck	[bar]		Platzbedarf	[m ²]		Gesamte Fahrtendauer	[h/a]		Summe "Fixkosten"	€/a
Speicherkapazität	[Liter]		Gewicht	[kg]		Gesamte Strecke	[km/a]			
Angelieferte H ₂ -Menge	[kg/Trailer]		Wartungsintervall 1	[a]						
Nutzbare H ₂ -Menge	[kg/Trailer]		Wartungsintervall 2	[a]						
Wasserstoffpreis	€/kg		Wartungsintervall 3	[a]						
			Wartungsintervall 4	[a]						
			Wartungsintervall 5	[a]						

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Trailerkosten									
Anzahl Trailer									
Anschaffung Trailer									
Kosten pro Lieferung									
Lieferungskosten									
LKW-Miete									
Fahrergehalt									
Fahrerkosten									
Wasserstoffkosten									
Genehmigung									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Spritverbrauch									
Spritpreis									
Sprinkosten									
Maut									
KFZ-Steuer									
Versicherung									
Jährliche Wartung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 10: Screenshot des Tabellenblatts „Anlieferung“, Quelle: Eigene Darstellung

Verfügung:

H₂-Liefertemperatur [°C]

Beschreibt die Temperatur, mit welcher der Wasserstoff angeliefert wird. Dieser Wert weist den Benutzer darauf hin, dass der Lieferdruck temperaturabhängig ist.

H₂-Lieferdruck [bar]

Gibt den Druck an, mit dem der Wasserstoff bei der entsprechenden Temperatur geliefert wird. Dieser Wert wird zur Berechnung der angelieferten und der nutzbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Min. Restdruck [bar]

Ist entweder der Druck, der aus konstruktionstechnischen Gründen mindestens im Trailer verbleiben muss, oder aber der Druck, welcher aufgrund des Ansaugdrucks des nachgeschalteten Kompressors nicht unterschritten werden darf. Dieser Wert wird zur Berechnung der nutzbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Speicherkapazität [Liter]

Stellt das Volumen dar, welches der Trailer insgesamt transportieren kann. Dieser Wert wird zur Berechnung der angelieferten und der nutzbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Wasserstoffpreis [€/kg]

Der Wasserstoffpreis ist der Preis, den der Tankstellenbetreiber an den Gaslieferanten pro Kilogramm Wasserstoff zahlen muss. Dieser Wert wird zur Berechnung der Wasserstoffkosten benötigt.

Distanz zur H₂-Quelle [km]

Gibt die Distanz zwischen der Wasserstoffquelle und der zu beliefernden Tankstelle an. Dieser Wert wird zur Berechnung der insgesamt zurückgelegten Strecke benötigt.

Ø-Fahrgeschwindigkeit [km/h]

Bezeichnet die angenommene durchschnittliche Geschwindigkeit, mit der der LKW die Strecke von der Tankstelle zur Quelle und zurück bewältigt. Für nahegelegene Quellen kann in der Regel eine Geschwindigkeit von 50 km/h angenommen werden, für weiter entfernte Quellen 70 km/h. Aus diesem Wert errechnet sich die Fahrtendauer.

Befüll- & Entladedauer [h]

Beschreibt einerseits die Zeit, welche benötigt wird, um den Trailer an der Quelle mit Wasserstoff zu füllen und andererseits die Zeit, die es braucht, um den Wasserstoff aus dem Trailer in den tankstellenseitigen Speicher zu füllen. Letztere ist nur relevant für den Fall, dass ein externer Versorger die Lieferungen übernimmt und der Trailer nicht an der Tankstelle abgestellt wird. Dieser Wert wird zur Berechnung der Fahrtendauer benötigt.

Trailerkosten [€], Anzahl der Trailer und Anschaffung Trailer [€]

Die Trailerkosten stellen den Kaufpreis eines Trailers dar. Dieser Wert wird zur Berechnung der Kosten zur Anschaffung der Trailer benötigt. Ist der Bedarf der Tankstelle so hoch oder die Quelle zu weit entfernt, so dass mehr als ein Trailer angeschafft werden muss, kann bei der Anzahl eine Zahl größer als eins eingetragen werden. Dieser Wert wird zur Berechnung der Kosten zur Anschaffung der Trailer benötigt. Die Anschaffungskosten ergeben sich aus den Kosten pro Trailer und der Anzahl.

Kosten pro Lieferung [€]

Wird der Wasserstoff von einem externen Versorger angeliefert, können mit diesem Wert die reinen Kosten der einzelnen Lieferung berücksichtigt werden. Dieser Wert wird zur Berechnung der Lieferungskosten benötigt.

LKW-Miete

Entscheidet sich der Nutzer gegen die Anschaffung von eigenen Trailern, so ist es unter Umständen nötig, mit diesem Wert die Kosten zur Miete eines LKWs, bzw. der Sattelzugmaschine zu berücksichtigen.

Fahrergehalt [€/a]

Beschreibt die Kosten, welche aufgrund des Gehalts des Fahrers anfallen. Wird ein externer Versorger beauftragt, entstehen keine zusätzlichen Kosten durch die Anstellung eines Fahrers. Muss allerdings ein Fahrer beauftragt oder fest angestellt werden, so ist das Jahresgehalt des Fahrers hier vorzusehen. Dieser Wert wird zur Berechnung der Fahrerkosten benötigt.

Spritverbrauch [l/100km]

Gibt den Spritverbrauch an, der zur Eigenversorgung mit Wasserstoff vorzusehen ist. Wird die Tankstelle von einem Versorger beliefert ist dieser Wert null. Dieser Wert wird zur Berechnung der Spritkosten benötigt, falls der Wasserstofftransport mit eigenen Trailern erfolgt.

Spritpreis [€/l]

Ist der Preis, den der getankte Sprit pro Liter kostet. Dieser Wert wird zur Berechnung der Spritkosten benötigt.

Mautsatz [ct/km]

Wird die Tankstelle selbstversorgt, so fallen in Deutschland LKW-Mautkosten pro Kilometer an, welche hier vorzusehen sind. Aus diesem Wert errechnen sich die Mautkosten.

KFZ-Steuer [€/a]

Beschreibt die Summe der KFZ-Steuer, die pro Jahr an den Staat zu entrichten ist. Bei externer Versorgung ist dieser Wert null.

Versicherung [€/a]

Bezeichnet die Summe, die an Versicherung für den Trailer pro Jahr zu entrichten ist. Bei externer Versorgung ist dieser Wert null.

Benötigte H₂-Menge [kg/a]

Beschreibt die Menge an Wasserstoff, welche pro Jahr benötigt wird. Sie ergibt sich aus den eingestellten Betankungen pro Tag und der vertankten Menge pro Betankung. Dieser Wert wird zur Berechnung der Anzahl der benötigten Lieferungen verwendet.

$$\text{Benötigte Menge} = \text{Betankungen pro Tag} \times \text{Menge pro Betankung} \times 365 \frac{\text{Tage}}{\text{Jahr}}$$

Angelieferte H₂-Menge [kg/Trailer]

Gibt die Menge Wasserstoff an, die pro Trailer angeliefert wird.

$$\text{Angelieferte Menge} = \frac{\text{Speicherkapazität pro bar} \times \text{Lieferdruck}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Dichte}$$

Nutzbare H₂-Menge [kg/Trailer]

Im Gegensatz zur angelieferten Menge stellt dieser Wert die nutzbare Menge unter Berücksichtigung des minimalen Restdrucks dar.

$$\text{Nutzbare Menge} = \text{Angelieferte Menge} - \frac{\text{Speicherkapazität pro bar} \times \text{Min. Restdruck}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Dichte}$$

Benötigte Lieferungen [1/a]

Gibt an, wie viele Lieferungen bei der gewählten Trailerkonfiguration und Wasserstoffbedarf nötig sind, um die Tankstelle ausreichend zu versorgen. Errechnet sich aus der benötigten und der im Trailer nutzbaren Wasserstoffmenge und wird zur Berechnung der Fahrtendauer pro Jahr verwendet. Der Wert wird immer auf die nächste ganze Zahl aufgerundet.

$$\text{Benötigte Lieferungen pro Jahr} = \frac{\text{Benötigte Menge pro Jahr}}{\text{Nutzbare Menge pro Trailer}}$$

Dauer einer Fahrt [h]

Errechnet die Dauer der Fahrt zur Quelle inklusive der Be- und Entladung. Dieser Wert wird für die Berechnung der gesamten Fahrtendauer benötigt.

$$\text{Dauer einer Fahrt} = \frac{\text{Distanz} \times 2}{\text{Geschwindigkeit}} + \text{Befüll- \& Entladedauer}$$

Gesamte Fahrtendauer [h/a]

Gibt die gesamte Dauer an, die der Trailer pro Jahr unterwegs ist. Ergibt sich aus der Fahrtendauer und der Anzahl an Lieferungen pro Jahr.

$$\text{Gesamte Dauer} = \text{Dauer einer Fahrt} \times \text{Anzahl Lieferungen}$$

Gesamte Strecke [km/a]

Gibt die gesamte Strecke an, die der Trailer pro Jahr zurücklegt. Errechnet sich aus der Distanz zur Quelle und der Anzahl an Lieferungen pro Jahr. Dieser Wert wird zur Berechnung der Sprit- und Mautkosten verwendet.

$$\text{Gesamte Strecke} = 2 \times \text{Distanz} \times \text{Anzahl Lieferungen}$$

Lieferungskosten [€/a]

Die Lieferungskosten geben die Kosten an, welche für die Anzahl der Lieferungen pro Jahr anfallen.

$$\text{Lieferungskosten} = \text{Kosten pro Lieferung} \times \text{Anzahl an Lieferungen}$$

Fahrerkosten [€/a]

Dieser Wert errechnet sich aus dem Jahresgehalt des Fahrers und der gesamten Fahrtendauer pro Jahr und gibt somit die anteiligen Fahrerkosten pro Jahr an. Arbeitszeiten, Wochenenden und Urlaubstage des Fahrers werden berücksichtigt, indem das Jahresgehalt auf 1648 Arbeitsstunden pro Jahr bezogen wird.

$$\text{Fahrerkosten} = \left(\frac{\text{Fahrergehalt pro Jahr}}{1648 \frac{\text{Arbeitsstunden}}{\text{Jahr}}} \right) \times \text{Fahrtendauer pro Jahr}$$

Wasserstoffkosten [€/a]

Errechnen sich aus der benötigten Wasserstoffmenge pro Jahr und dem Preis, der an den Wasserstoffversorger zu zahlen ist.

$$\text{Wasserstoffkosten} = \text{Benötigte Menge} \times \text{Wasserstoffpreis}$$

Spritkosten [€/a]

Berechnet die Kosten, die pro Jahr aufgrund des Spritverbrauches anfallen. Errechnet sich aus dem Spritverbrauch, dem Spritpreis und der zurückgelegten Strecke pro Jahr:

$$\text{Spritkosten} = \left(\frac{\text{Verbrauch}}{100\text{km}} \right) \times \text{Spritpreis} \times \text{Strecke pro Jahr}$$

Maut [€/a]

Beschreibt die gesamten Kosten, die für die Maut pro Jahr zu entrichten sind. Ergibt sich aus dem Mautsatz und der zurückgelegten Strecke im Jahr:

$$\text{Maut} = \left(\frac{\text{Mautsatz}}{100\text{km}} \right) \times \text{Strecke pro Jahr}$$

3.2.1.5 ARBEITSBLÄTTER „SPEICHER“

Im Folgenden werden die Parameter und Datensätze vorgestellt, welche auf den Datenblättern der vier unterschiedlichen Speicher eingestellt bzw. eingegeben werden können. Abbildung 11 zeigt den Aufbau dieser Tabellenblätter.

Rahmendaten		Platzangaben		Zusammenfassung	
Flaschentyp		Länge [m]		Gewünschte Ausgabereinheit	€/a
Max. zulässiger Betriebsdruck [bar]		Breite [m]		Investment oder Finanzierung	
Speicherdruck [bar]		Höhe [m]		Summe "Investitionskosten"	[€]
Min. Restdruck [bar]		Platzfaktor		Summe "Laufende Kosten"	[€/a]
Anzahl Speicherbündel		Flächenbedarf [m ²]		Summe "Fixkosten"	[€/a]
Anzahl Flaschen pro Bündel		Gewicht pro Bündel [kg]			
Speicherbare H ₂ -Menge [kg]		Flascheninhalt [Liter]			
Nutzbare H ₂ -Menge [kg]					

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a			Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4	
Bündelkosten										
Anschaffung Bündel										
Gasverrohrung										
Genehmigung										
Aufstellung										
Spülungskosten pro Bündel										
Gesamtspülungskosten										
Abschreibungsdauer										
Restwert										
Abschreibung										
Finanzierungsdauer										
Zinssatz										
Finanzierung										
Prüffrist										
Prüfkosten pro Bündel										
Bitte Prüffrist eingeben										
Jährliche Wartung										
Sonstige Laufende Kosten										
Sonstige Fixkosten										
Sonstige Investments										

Abbildung 11: Screenshot der Tabellenblätter „Speicher“, Quelle: Eigene Darstellung

Flaschentyp

Beschreibt den Typus, den die vorgesehenen Flaschen haben (siehe Kapitel 2.2.2).

Max. zulässiger Betriebsdruck [bar]

Dient dem Benutzer zur Information, welches der maximale zulässige Druck in den eingesetzten Flaschen ist.

Speicherdruck [bar]

Ist der Druck, bei welchem der Wasserstoff im Normalfall vorgehalten werden soll. Beim Niederdruckspeicher (bis 35 bar) ergibt sich der Speicherdruck aus dem Ausgangsdruck der Elektrolyse. Bei den Speichern für die beiden mittleren (bis 200 bar und bis 500 bar) und das hohe Druckniveau (bis 1000 bar), wird der Speicherdruck durch den Enddruck des vorgeschalteten Kompressors vorgegeben. Der Wert wird jeweils zur Berechnung der speicherbaren und der nutzbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Min. Restdruck [bar]

Gibt den Druck an, welcher minimal im Speicher verbleiben muss. Wird, außer beim Hochdruckspeicher, durch den minimalen Ansaugdruck des nachgeschalteten Kompressors vorgegeben. Beim Hochdruckspeicher ist der Wert vom Benutzer einzutragen und entspricht dem Wert, den der Tank nach einem Betankungsvorgang hat. Dieser Wert wird jeweils zur Berechnung der nutzbaren Wasserstoffmenge benötigt.

Anzahl Speicherbündel und Anzahl Flaschen pro Bündel

Vom Benutzer anzugebende Anzahl der vorgesehenen Speicherbündel bzw. der Einzelflaschen pro Bündel. Diese Werte werden zur Berechnung der speicherbaren und nutzbaren Mengen verwendet. Die Anzahl der Speicherbündel wird zusätzlich zur Berechnung des Flächenbedarfs, den Anschaffungskosten der Bündel und den Spülungskosten benötigt.

Flascheninhalt [Liter]

Ist der Wert, der angibt, welches Wasserstoffvolumen in einer Flasche gespeichert werden kann. Wird zur Berechnung der speicherbaren und der nutzbaren Menge benötigt.

Bündelkosten [€]

Beschreibt die Kosten, die für den Kauf eines Bündels anfallen. Wird zur Berechnung der Bündelanschaffungskosten benötigt.

Spülungskosten pro Bündel [€] und Gesamtpülungskosten [€]

Da die Wasserstoffspeicher in der Regel vom Hersteller mit Stickstoff vorgefüllt geliefert werden, ist es nötig, die Flaschen mit Wasserstoff zu spülen bis die nötige Wasserstoffreinheit erreicht wird. Die Spülungskosten geben die Kosten an, die für die Spülung pro Bündel anfallen, während der Wert der Gesamtpülungskosten die Anzahl der Bündel berücksichtigt.

$$\text{Gesamtp\u00fclungskosten} = \text{Anzahl B\u00fcndel} \times \text{Sp\u00fclungskosten pro B\u00fcndel}$$

Pr\u00fcffrist [a]

Ist das f\u00fcr die unterschiedlichen Speicher vorzusehende Wartungsintervall. Die Pr\u00fcffrist beschreibt den Zyklus, in dem die Speicher den gesetzlich vorgeschriebenen Pr\u00fcfungen unterzogen werden m\u00fcssen. Dieser Wert wird zur Berechnung der Pr\u00fcfungskosten ben\u00f6tigt.

Pr\u00fcfkosten pro B\u00fcndel [€] und Pr\u00fcfkosten alle X Jahre [€/Xa]

Die Pr\u00fcfkosten pro B\u00fcndel geben an, wie viel es kostet ein B\u00fcndel pr\u00fcfen zu lassen. Diese Kosten beinhalten neben der eigentlichen Pr\u00fcfung auch alle zus\u00e4tzlichen Kosten, wie bspw. Transport und erneute Sp\u00fclung der Speicher. Der Parameter „Pr\u00fcfkosten alle X Jahre“ ber\u00fccksichtigt zus\u00e4tzlich die Anzahl der B\u00fcndel.

$$\text{Pr\u00fcfkosten} = \text{Anzahl B\u00fcndel} \times \text{Pr\u00fcfkosten pro B\u00fcndel}$$

Speicherbare H₂-Menge [kg]

Gibt die Wasserstoffmenge an, die insgesamt im entsprechenden Speicher vorgehalten werden kann. Ergibt sich aus der Anzahl der B\u00fcndel, der Anzahl Flaschen pro B\u00fcndel, dem Volumen pro Flasche und dem Speicherdruck.

$$\text{Speicherbare Menge} = \frac{\text{B\u00fcndelvolumen pro bar} \times \text{Speicherdruck}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Dichte}$$

Nutzbare H₂-Menge [kg]

Berechnet die Wasserstoffmenge des Speichers an, welche unter Ber\u00fccksichtigung des minimalen Restdrucks tats\u00e4chlich nutzbar ist.

$$\text{Nutzbare Menge} = \text{Speicherbare Menge} - \frac{\text{B\u00fcndelvolumen pro bar} \times \text{Restdruck}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Dichte}$$

Anschaffungskosten aller B\u00fcndel [€]

Gibt die gesamten Kosten an, die f\u00fcr die Anschaffung der B\u00fcndel anfallen. Ergibt sich aus der Anzahl der B\u00fcndel und den B\u00fcndelkosten.

$$\text{Anschaffung} = \text{Anzahl} \times \text{B\u00fcndelkosten}$$

3.2.1.6 ARBEITSBLÄTTER „VERDICHTER“

Nachfolgend werden die einzutragenden und berechneten Werte der Reiter „Verdichter“ (Abbildung 12) vorgestellt.

Rahmendaten		Platz- & Wartungsangaben			Zusammenfassung	
Verdichtungsart	Kolben	Länge	[m]		Gewünschte Ausgabereinheit	€/a
Betriebsstunden	[h/a]	Breite	[m]		Investment oder Finanzierung	
Min. Ansaugdruck	[bar]	Höhe	[m]		Summe "Investitionskosten"	[€]
Ansaugdruck	[bar]	Platzfaktor			Summe "Laufende Kosten"	[€/a]
Enddruck	[bar]	Flächenbedarf	[m ²]		Summe "Fixkosten"	[€/a]
Ansaugleistung	[m ³ /h]	Gewicht	[kg]			
Geförderte H ₂ -Menge	[kg/h]	Wartungsintervall 1	[a]			
		Wartungsintervall 2	[a]			
		Wartungsintervall 3	[a]			
		Wartungsintervall 4	[a]			
		Wartungsintervall 5	[a]			

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Verdichtereinheit									
Schallschutzhaube									
Rückkühler									
Gasverrohrung									
Genehmigung									
Aufstellung									
Inbetriebnahme									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
φ-Motorleistung									
Max. Motorleistung									
Stromkosten Motor									
φ-Leistung Rückkühler									
Stromkosten Rückkühler									
Jährliche Wartung									
Stickstoffverbrauch									
Stickstoffbündel									
Stickstoffbündelmiete									
Überwachung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 12: Screenshot der Tabellenblätter „Verdichter“, Quelle: Eigene Darstellung

Min. Ansaugdruck [bar]

Ist der minimale Druck, bei welchem der Kompressor noch betrieben werden kann. Dieser Wert stellt gleichzeitig auch den minimalen Restdruck bei vorgeschalteten Speichern dar.

Ansaugdruck [bar]

Gibt den Druck an, mit welchem der Wasserstoff in den Kompressor eintritt. Da dieser Wert im Betrieb stark variiert, sollte entweder der maximale oder ein mittlerer Ansaugdruck angenommen werden. Dieser Wert wird zur Berechnung der geförderten Wasserstoffmenge benötigt.

Enddruck [bar]

Beschreibt den Druck, auf den der Kompressor den Wasserstoff verdichten soll. Dieser Wert ist gleichzeitig auch der Speicherdruck nachgeschalteter Speicher.

Ansaugleistung [m³/h]

Bezeichnet den Volumenstrom, welcher bei gewähltem Enddruck während der Verdichtung zu erwarten ist. Dieser Wert wird zur Berechnung der geförderten Wasserstoffmenge benötigt.

Verdichtereinheit [€], Schallschutzhaube [€] und Rückkühler [€]

In diesen Werten sind die Kaufpreise der Verdichtereinheit, des Rückkühlers und einer eventuell verwendeten Schallschutzhaube vorzusehen. Die Verdichtereinheit umfasst neben dem Verdichter auch die notwendigen Nebenaggregate (z.B. hydraulische Antriebseinheit).

Ø-Motorleistung [kW] und Ø-Leistung Rückkühler [kW]

Die Motorleistung gibt die durchschnittliche Leistung an, mit der der Kompressor abhängig vom Ansaugdruck den Wasserstoff verdichtet. Die durchschnittliche Leistung des Rückkühlers gibt den Leistungsbedarf an, den der Rückkühler während der Verdichtung hat. Aus beiden Werten errechnen sich die jeweiligen Stromkosten.

Max. Motorleistung [kW]

Beschreibt die maximale Leistung, die der Motor zu liefern im Stande ist. Dieser Wert dient dem Benutzer als Anhaltspunkt für die in den Aufstellungskosten eventuell zu berücksichtigende Anschlussleistung.

Geförderte H₂-Menge [kg/h]

Berechnet die Menge an Wasserstoff, die pro Stunde vom Kompressor verdichtet wird. Ergibt sich aus der Ansaugleistung und dem Ansaugdruck.

$$\text{Geförderte Menge} = \frac{\text{Ansaugleistung}}{\text{Kompressionsfaktor}} \times \text{Dichte}$$

3.2.1.7 ARBEITSBLATT „KÜHLUNG & DISPENSER“

Die letzten Komponenten jeder Simulation sind die Kühlung und der Dispenser der Tankstelle. Die möglichen Werte und Datensätze (Abbildung 13) werden nachfolgend erläutert.

Kühlleistung [kW]

Bezeichnet für beide Wärmetauscher die thermische Leistung, die nötig ist, um die Betankung bei -40°C durchzuführen. Dieser Wert dient dem Benutzer als Information zur Dimensionierung der Kältemaschine.

Max. H₂-Durchfluss [kg/min]

Gibt den maximalen Volumenstrom an, mit dem der Wasserstoff durch die beiden Wärmetauscher fließen kann. Da der Durchfluss der Wärmetauscher mindestens dem der Füllkupplung entsprechen muss, dient dieser Wert dem Nutzer als Überprüfungsinformation.

H₂-Durchfluss Füllkupplung [kg/min]

Der Durchfluss der Füllkupplung stellt den Wert dar, welcher während einer Betankung pro Minute maximal an das Fahrzeug überführt werden darf. Bei standardisierten 700 bar Betankungen entspricht dieser Wert 1,2 kg/min. Mit diesem Wert errechnen sich die

Rahmendaten		Platz- & Wartungsangaben			Zusammenfassung	
Wärmetauscherarten	Block	Länge	[m]		Gewünschte Ausgabeeinheit	€/a
Betriebsstunden I	[h/d]	Breite	[m]		Investment oder Finanzierung	
Kühlleistung I	[kW]	Höhe	[m]		Summe "Investitionskosten"	[€]
Max. H ₂ -Durchfluss I	[kg/h]	Platzfaktor			Summe "Laufende Kosten"	[€/a]
Betriebsstunden II	[h/d]	Flächenbedarf	[m ²]		Summe "Fixkosten"	[€/a]
Vorlaufzeit Wärmetauscher II	[min]	Gewicht	[kg]			
Kühlleistung II	[kW]	Wartungsintervall 1	[a]			
Max. H ₂ -Durchfluss II	[kg/h]	Wartungsintervall 2	[a]			
H ₂ -Durchfluss Füllkupplung	[kg/min]	Wartungsintervall 3	[a]			
Max. zulässiger H ₂ -Druck	[bar]	Wartungsintervall 4	[a]			
Max. H ₂ -Temperatur (Eingang)	[°C]	Wartungsintervall 5	[a]			
Max. H ₂ -Temperatur (Ausgang)	[°C]					

Zelle Einfügen Zelle Löschen

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Kältemaschine									
Wärmetauscher I									
Wärmetauscher II									
Gasverrohrung									
Genehmigung									
Aufstellung									
Inbetriebnahme									
Dispenser									
Füllkupplung (700 bar)									
Abreißsicherung (700 bar)									
Schlaucheinheit (700 bar)									
Halterung für Kupplung (700 bar)									
Füllkupplung (350 bar)									
Abreißsicherung (350 bar)									
Schlaucheinheit (700 bar)									
Halterung für Kupplung (700 bar)									
Füllkupplung (350 bar)									
Abreißsicherung (350 bar)									
Schlaucheinheit (350 bar)									
Halterung für Kupplung (350 bar)									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Ø-Leistung Kältemaschine									
Anschlussleistung Kältemaschine									
Stromkosten Kältemaschine									
Jährliche Wartung									
SPS-Programmierung									
Überwachung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 13: Screenshot des Tabellenblatts „Kühlung & Dispenser“, Quelle: Eigene Darstellung

Betriebsstunden des Plattenwärmetauschers.

Max. zulässiger H₂-Druck [bar]

Ist der maximale zulässige Druck mit dem der Wasserstoff in die beiden Wärmetauscher eintreten darf. Kann dem Nutzer einen Anhaltspunkt geben, welcher Enddruck der vorgeschalteten Verdichtung maximal erzeugt werden darf.

Max. H₂-Temperatur [°C]

Bezeichnet die beiden maximalen Temperaturen am Eingang und am Ausgang der beiden Wärmetauscher. Soll dem Nutzer einen Hinweis darauf geben, dass das Temperaturverhalten vor der Kühlung überwacht werden muss.

Kältemaschine [€], Wärmetauscher [€], Dispenser [€] und Betankungskomponenten [€]

In diesen Datensätzen können die Investitionskosten der Kältemaschine, der beiden Wärmetauscher, des Dispenser inklusive der Zapfsäule und der verschiedenen Betankungskomponenten eingetragen werden. Die Betankungskomponenten werden differenziert in Füllkupplung, Abreißsicherung, Schlaucheinheit und Halterung der Füllkupplung.

Ø-Leistung Kältemaschine [kW]

Gibt die durchschnittliche elektrische Leistung an, mit der die Kältemaschine betrieben werden muss, um die benötigte Kälteleistung zur Verfügung zu stellen. Dieser Wert wird zur Berechnung der Stromkosten der Kältemaschine benötigt.

Anschlussleistung Kältemaschine [kW]

Ist die Leistung, die insgesamt zum Anschluss der Kältemaschine vorzusehen ist. Dient dem Nutzer als Anhaltspunkt für die Kosten der Aufstellung (z.B. zusätzliche Kosten durch Verlegung größerer und teurerer Kabel).

SPS-Programmierung [€]

In den Kosten der SPS-Programmierung sind die Kosten vorzusehen, die nötig sind um die Steuerungseinheit der Wasserstoffabgabe zu programmieren. Diese Kosten entstehen aufgrund der komplexen Struktur und Unterschiedlichkeit der vorgegebenen und eventuell zusätzlich vorzusehenden Betankungsprotokolle.

Betriebsstunden [h/d]

Diese Datensätze beschreiben die Betriebsstunden der beiden Wärmetauscher. Wird die Kühlung des Wasserstoffs durch einen Aluminiumblock vorgesehen, so muss die Kälte rund um die Uhr bereitgestellt werden und die Betriebsstunden liegen bei 24 h/d. Bei einem Plattenwärmetauscher errechnen sich die Betriebsstunden aus der vertankten Menge, der Durchflussrate der Füllkupplung, der Vorlaufzeit und der Anzahl der Betankungen pro Tag.

$$\text{Betriebsstunden} = \left(\frac{\text{Vertankte Menge}}{\text{Durchflussrate Kupplung}} + \text{Vorlaufzeit} \right) \times \text{Anzahl Betankungen pro Tag}$$

3.3 AUSGABE DES TOOLS

Zur Auswertung der eingegebenen Daten und Parameter führt das Tool verschiedene Berechnungen aus, welche nachfolgend genauer vorgestellt werden. Die Ausgabe des Tools ist für einen Druck auf DIN A4 Papier optimiert, weshalb im weiteren Verlauf auch häufig die entsprechende Seitennummer genannt wird. Diese Ausgabeseiten sind vom Aufbau her immer gleich strukturiert, um eine Vergleichbarkeit einzelner Simulationen herzustellen können die Seiten vom Nutzer nicht verändert werden. Eine Kopfzeile mit individuellen Informationen (Datum, Bearbeiter, Simulationsname; vom Benutzer auf dem Tabellenblatt „Übersicht“ einzutragen) wird automatisch erstellt und eingefügt.

Druckt der Anwender seine Ergebnisse aus, so erhält er acht einzelne Seiten. Seite 1 gibt dem Anwender einen Überblick über die eingegebenen Rahmenbedingungen und die Konfiguration der Tankstelle. Zusätzlich werden die summierten jährlichen Kosten des ersten Jahres zusammengefasst. Auf Seite 2 werden die Kosten aufgeschlüsselt nach einzelnen Anteilen entsprechend der Kennwerte angegeben.

Der wichtigste Kennwert ist der Parameter „Gesamten Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff“. Dieser Wert stellt die kilogrammspezifischen Kosten des Wasserstoffs dar und ist ein häufig gewählter Vergleichswert in der Fachliteratur. Berechnet wird dieser Wert über folgende Formel:

$$\text{Spezifische Kosten} = \frac{\text{Summe der Investitionskosten, Fixkosten und laufenden Kosten}}{\text{Gesamte vertankte Wasserstoffmenge über Nutzungsdauer}}$$

Des Weiteren stehen dem Anwender die anteiligen Kosten an diesem Wert, mit unterschiedlichen Bezügen zur Verfügung. Unter anderem wird der Wert bezogen auf die

- Investitionskosten
- Fixkosten
- Laufenden Kosten
- Tankstellenkosten
- Stromkosten

angegeben. Ergänzend wird die exergetische Entwertung des Wasserstoffs durch die Tankstelle ausgegeben. Ebenfalls auf der zweiten Seite finden sich Auswertungen zu Nutzungsgraden der einzelnen Komponenten. Diese sind bei Veränderung von Eingangsparametern durch den Benutzer von besonderer Bedeutung und zeigen, ob bspw. bei einer Erhöhung der Betankungsanzahl einzelne Komponenten überlastet sind (Tabelle 6).

Seite 3 zeigt dem Nutzer drei Diagramme des Wasserstoffpreises bei Veränderung einzelner Kosten, Komponenten und Kostenanteile. Diese Veränderungswerte können vom Nutzer auf Seite 1 vorgegeben werden. Die angezeigten Diagramme sind extrapolierte Entwicklungen der spezifischen Kosten. Sie sollen aufzeigen, bei welchen Komponenten oder Anteilen der Tool-Anwender Verbesserungen vornehmen kann. Seite 4 gibt sowohl einen optischen als auch einen tabellarischen Ausblick auf die genauen Wartungskosten in jedem Jahr über die gesamte Nutzungsdauer. Es ist anzufügen, dass Wartungskosten, die zyklisch im letzten Jahr

der Nutzungsdauer anfallen würden, nicht berücksichtigt werden, da diese in der Praxis nur in Ausnahmefällen durchgeführt werden.

Tabelle 6: Darstellung der prozentualen Auslastung im Tool, Quelle: Eigene Darstellung

Komponente	Auslastung
Elektrolyse	0,00%
Anlieferung	0,00%
ND-Speicher	0,00%
ND-Verdichter	0,00%
1. MD-Speicher	0,00%
MD-Verdichter	0,00%
2. MD-Speicher	0,00%
HD-Verdichter	0,00%
HD-Speicher	0,00%
Kühlung & Dispenser	0,00%

Auf der fünften Seite werden die exakten, fixen und laufenden Kosten im jeweiligen Jahr optisch dargestellt. Zusätzlich werden die laufenden Kosten kumuliert unter Berücksichtigung eines durch den Benutzer festzulegenden inflationären Faktors ausgegeben. Zur Berücksichtigung der linearen Abschreibungskosten wird ihre Entwicklung in zwei Diagrammen dargestellt. An der graphischen Darstellung kann der Nutzer erkennen, ob die gewählten Abschreibungsdauern geeignet sind oder eine Anpassung vorgenommen werden sollte.

Die letzten beiden Seiten (S. 7 und 8) geben dem Nutzer einen Überblick über die Entwicklung der spezifischen Kosten bei Veränderung der Anzahl der Betankungen pro Tag. Auf Seite 7 sind die spezifischen Kosten pro Betankung und auf Seite 8 pro Kilogramm Wasserstoff angegeben. Die X-Achsen der angezeigten Diagramme werden bei Start der Auswertung automatisch auf eine bestimmte Anzahl der Betankungen limitiert. Wird die Konfiguration „Elektrolyse“ ausgewählt, so ist die produzierte Tagesmenge der Elektrolyse der begrenzende Faktor. Soll jedoch die Anlieferung von Wasserstoff vorgesehen werden, ist auch eine höhere als die vorgesehene Anlieferungsmenge möglich. Durch Festlegung des auf Seite 1 der Auswertung zur Verfügung stehenden Faktors kann der Nutzer bestimmen, um welches Vielfache die voreingestellte Anzahl der Betankung multipliziert werden soll. Das Diagramm wird mit Starten der Auswertung automatisch für diesen Maximalwert berechnet. Tabelle 7 zeigt eine Übersicht über die Inhalte der einzelnen Ausgabeseiten.

Tabelle 7: Übersicht der Seiteninhalte der jeweiligen Ausgabeseite, Quelle: Eigene Darstellung

Ausgabeseite	Seiteninhalte
Seite 1	Einstellbare Faktoren und Überblick über gewählte Tankstelle
Seite 2	Tabellen mit Ergebnisse, Auslastungen, Kosten
Seite 3	Diagramm des Wasserstoffpreises bei Veränderung einzelner Kostenanteile
Seite 4	Diagramm und Tabelle der Wartungskosten
Seite 5	Diagramme Fixkosten pro Jahr, Laufende Kosten pro Jahr und Summe der kumulierten laufenden Kosten pro Jahr
Seite 6	Diagramme der Entwicklung der Abschreibungskosten pro Jahr
Seite 7	Diagramm und Tabelle der Kosten pro Betankung
Seite 8	Diagramm und Tabelle des H ₂ -Preises pro Kilogramm

4. BEDIENUNGSANLEITUNG

Die Bedienungsanleitung gibt dem Nutzer Informationen dazu, wie das Tool vollständig genutzt werden kann. Die Tabellenblätter „Übersicht“, „Ausgabe“ und „Bedienungsanleitung“ stehen jederzeit zur Verfügung. Die Berechnungen und Auswahlmöglichkeiten nutzen sowohl die Funktionen des Programms Microsoft Excel, als auch die Funktionen des Programms Visual Basic. Beim Öffnen der Datei kann es sein, dass eine automatisch Meldung angezeigt wird und die Erlaubnis zur Verwendung von Makros (externe Inhalte) manuell erteilt werden muss. Zur leichteren Bedienung sind nur Zellen anwählbar, die vom Benutzer verändert werden können. Mit Ausnahme der Bereiche „Allgemeine Informationen“ (dort sind die Zellen weiß oder grau hinterlegt) sind Zellen, in denen eine Benutzereingabe erfolgen soll, blau hinterlegt. Eine vollständige Simulation kann in die drei Phasen „Eingabe der Rahmendaten“, „Konfiguration der Komponenten“ und „Ausgabe“ eingeteilt werden.

Phase 1: Eingabe der Rahmendaten

Zunächst sind auf dem Tabellenblatt „Übersicht“ die Rahmendaten der Tankstelle festzulegen. Die dort einzugegebenen Parameter

- Nutzungsdauer der Tankstelle
- Anzahl der Betankungen pro Tag
- Ø-vertankte Menge

sind fundamental für die weiteren Berechnungen. Außerdem ist in dieser Übersicht die gewünschte Grundkonfiguration der Tankstelle hinsichtlich der Wasserstoffversorgung auszuwählen. Hierzu stehen dem Nutzer drei Buttons und ein Dropdown-Menü zur Verfügung. Es kann zwischen den Konfigurationen

- Elektrolyse
- Anlieferung 200 bar
- Anlieferung 500 bar

gewählt werden. Je nach Auswahl stehen dem Benutzer die relevanten Tabellenblätter, namentlich die einzelnen Komponenten, zur Verfügung. Insgesamt sind zehn Komponenten theoretisch verfügbar (Tabelle 8).

Wird die Variante „Elektrolyse“ gewählt, so stehen dem Benutzer neun zusätzliche Tabellenblätter zur Verfügung, in denen die entsprechenden Komponenten konfiguriert werden können. Bei der Auswahl „Anlieferung 200 bar“ sind es sieben und bei „Anlieferung 500 bar“ fünf Komponenten. Zusätzlich besteht in jedem Szenario die Option, über das vorhandene Dropdown-Menü zwischen den Prozessen „HD-Speicherung“ (Hochdruckspeicherung) und „Reine Boosterbetankung“ umzuschalten. Bei der Auswahl „Reine Boosterbetankung“ wird das Tabellenblatt „HD-Speicher“ ausgeblendet.

Tabelle 8: Übersicht über die zur Verfügung stehenden Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung

Komponenten	Konfigurationen		
	„Elektrolyse“	„Anlieferung 200 bar“	„Anlieferung 500 bar“
Elektrolyse	✓	X	X
Anlieferung	X	✓	✓
ND-Speicher (Niederdruckspeicher)	✓	X	X
ND-Verdichter (Niederdruckverdichter)	✓	X	X
1. MD-Speicher (1. Mitteldruckspeicher)	✓	✓	X
MD-Verdichter (Mitteldruckverdichter)	✓	✓	X
2. MD-Speicher (2. Mitteldruckspeicher)	✓	✓	✓
HD-Verdichter (Hochdruckverdichter)	✓	✓	✓
HD-Speicher (Hochdruckspeicher)	✓	✓	✓
Kühlung & Dispenser	✓	✓	✓

Phase 2: Konfiguration der Komponenten

Nach Festlegung der tankstellenbezogenen Parameter (Nutzungsdauer der Tankstelle, Anzahl der Betankungen pro Tag und \emptyset -vertankte Menge) können die einzelnen Komponenten spezifiziert werden. Die Tabellenblätter der einzelnen Komponenten sind in die Bereiche „Rahmendaten“, „Platz- & Wartungsangaben“, „Trailernutzungsdaten“ (nur bei Anlieferung), „Zusammenfassung“ und „Allgemeine Informationen“ unterteilt. Unter „Rahmendaten“ sind vom Benutzer die wichtigsten Betriebsinformationen zur Komponente einzugeben. Unter „Allgemeine Informationen“ sind bereits verschiedene Datensätze mit Bezeichnung, Kategorie und Einheiten vorgegeben. Diese können vom Benutzer durch Eingabe eines Wertes verwendet, oder auf null gesetzt werden. Lediglich auswählbare Zellen sind vom Nutzer veränderbar und weiß hinterlegt.

Möchte der Benutzer eigene Datensätze hinzufügen, so kann er dies über den Button „Zeile einfügen“ tun. Durch einen Klick auf den Button wird eine neue Zeile angefügt, in welche die Daten eingetragen werden können. Mit einem Klick auf den Button „Zeile löschen“ kann die Zeile wieder entfernt werden. Rechts neben dem Bereich „Allgemeine Informationen“ findet sich eine sortierte Auflistung der entstehenden Kosten, aufgeteilt nach Kategorie. Zur Auswahl stehen die Kategorien „P“ (Wert zur weiteren Berechnung), „F“ (Fixkosten), „L“ (Laufende Kosten) und „I“ (Investitionskosten). Im Bereich „Zusammenfassung“ findet der Nutzer eine Summierung der jeweiligen Kosten und muss die Auswahl treffen, ob entstehende Investitionskosten mit oder ohne Finanzierung kalkuliert werden sollen.

Phase 3: Ausgabe

Hat der Nutzer alle notwendigen Komponenten spezifiziert, so kann er auf dem Tabellenblatt „Ausgabe“ über den dortigen Button die Auswertung starten. Die Aufteilung der Ausgabe ist für einen Ausdruck von DIN A4 Seiten optimiert. Auf Seite 1 findet der Benutzer eine Zusammenfassung der gewählten Konfigurationsparameter. Außerdem müssen die für die Auswertung benötigten Faktoren

- Preissteigerungsfaktor
- Faktor „Anzahl Betankungen“
- Veränderungsfaktor 1
- Veränderungsfaktor 2
- Veränderungsfaktor 3

eingetragen werden. Mit Anklicken des Buttons „Auswertung starten“ werden die Berechnungen durchgeführt, die Diagramme und Tabellen aktualisiert und dem Druckbereich eine Kopfzeile hinzugefügt. Die Auswertung kann durch Veränderung der Parameter der Komponenten oder der Ausgabefaktoren und anschließendem Anklicken des Buttons „Auswertung starten“ verändert werden. Zum Vergleich wird empfohlen, sich die entsprechenden Seiten der Ausgabe vorher auszudrucken oder die Datei mit neuem Namen zu speichern.

5. ANWENDUNG DES TOOLS

Bei der Anwendung des Tools werden, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, drei vergleichende Szenarien angewendet bzw. Simulationen durchgeführt. Die drei Szenarien „Anlieferung 200 bar“ (Szenario 1), „Elektrolyse“ (Szenario 2) und „Anlieferung 500 bar“ (Szenario 3) werden im Folgenden vorgestellt.

Zur Vergleichbarkeit der Szenarien werden für die Tankstelle zunächst die gleichen Ausgangsparameter angenommen. So wird die Tankstelle für fünf Betankungen pro Tag, eine durchschnittliche Betankungsmenge von 3,85 kg H₂ und eine Nutzungsdauer von 15 Jahren ausgelegt. Der Wasserstoff soll für den in Deutschland festgelegten Dieselequivalenzwert von 9,50 €/kg H₂ (Shell 2018) verkauft werden. Die anfallenden Investitionskosten werden mit einem Zinssatz von 1,5% selbstfinanziert. Außerdem werden bei gleichen verwendeten Komponenten dieselben Werte angenommen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Eine Ausnahme stellt der zweite Mitteldruckspeicher im dritten Szenario dar. Dieser wurde der 500 bar Anlieferung entsprechend angepasst. Das heißt, dass der Speicher den Trailer abbildet und im Vergleich zu den Szenarien 1 und 2 erheblich größer ist. Außerdem bildet der im Szenario 3 „Anlieferung 500 bar“ eingesetzte Hochdruckverdichter eine einstufige Variante des bei den Szenarien 1 und 2 eingesetzten zweistufigen Mittel- und Hochdruckverdichters ab.

Szenario 1 „Anlieferung 200 bar“ bildet den derzeitigen Standardfall einer Wasserstofftankstelle ab. In diesem Fall wird der benötigte Wasserstoff von einem Gaslieferanten bei einem Druckniveau von 160 bar zu einem Einkaufspreis von 7 €/kg angeliefert und in einem ersten Mitteldruckspeicher zwischengespeichert. Über einen zweistufigen Verdichter wird der Wasserstoff zuerst in einem zweiten Mitteldruckspeicher bei 500 bar und schlussendlich in einem Hochdruckspeicher bei 875 bar gespeichert. Die verwendeten Werte beruhen überwiegend auf eigenen Erfahrungswerten oder auf vom „Zentrum für BrennstoffzellenTechnik“ zur Verfügung gestellten Daten.

Das zweite Szenario bildet eine Tankstelle mit einer On-Site-Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse ab. Die Elektrolyse ist auf eine bedarfsabhängige Betriebsstundenanzahl von 8.000 Stunden pro Jahr ausgelegt. Der produzierte Wasserstoff wird in einem Niederdruckspeicher, zwei Mitteldruckspeichern und einem Hochdruckspeicher auf einem jeweiligen Druckniveau von 35 bar, 200 bar, 500 bar und 875 bar gespeichert. Für die Niederdruckverdichtung kommt ein einstufiger Kolbenverdichter zum Einsatz. Für beide weiteren notwendigen Verdichtungen wird derselbe zweistufige Kolbenkompressor wie in Szenario 1 zu Grunde gelegt. Die Werte in diesem Beispiel beruhen ebenfalls auf Erfahrungswerten oder auf zur Verfügung gestellten Daten des „Zentrum für BrennstoffzellenTechnik“.

Szenario 3 gibt einen Zukunftsausblick und vergleicht, ob ein Druckniveau von 500 bar bei der Anlieferung sinnvoller ist als ein Niveau von 200 bar. Der Wasserstoffpreis wird mit 8,10 €/kg vorgesehen. Der Preis unterscheidet sich zu dem aus Szenario 1, da zum einen ein höheres Druckniveau vorherrscht und so mehr Wasserstoff transportiert werden kann, zum anderen jedoch die Kosten für den Betreiber der Wasserstoffquelle höher sind. Da der Trailer in diesem Szenario gleichzeitig den zweiten Mitteldruckspeicher darstellt, kann der

Trailer nicht von der Tankstelle entfernt werden ohne den größten Teil des Wasserstoffvorrats zu entziehen. Die Tankstelle stünde so gegebenenfalls unversorgt dar. Daher ist die Anschaffung von zwei Trailern vorgesehen. Wie bereits beschrieben, ist der vorgesehene Hochdruckverdichter eine einstufige Variante, des Verdichters aus den Szenarien 1 und 2. Da es für dieses Szenario keine belastbaren Praxiswerte gibt, stellen die verwendeten Werte und Daten überwiegend gezielte Annahmen dar. Teilweise beruhen sie auf von Herstellern oder auf vom „Zentrum für BrennstoffzellenTechnik“ zur Verfügung gestellten Daten. Es ist zu erwähnen, dass die laufenden Kosten in den Szenarien 1 und 3 stark durch den Wasserstoffpreis beeinflusst werden. Dies ist ein Wert, der im Praxisfall zwischen dem Tankstellenplaner und dem Gaslieferanten verhandelt werden muss und von der Abnahmemenge des Wasserstoffs abhängt. Die Ausgabeseiten der drei Szenarien sind in den Anhängen 1 bis 3 zu finden.

Die Auswertungen erfolgen ausschließlich über die durch das Tool zur Verfügung gestellten Funktionen bzw. Ausgabeseiten. Ziel der Auswertung ist es, einen Überblick über die Wirtschaftlichkeit der drei gewählten Szenarien zu geben und Kostentreiber zu identifizieren. Ein weiteres Ziel ist es herauszufinden, ob und unter welchen Bedingungen ein wirtschaftlicher Betrieb der Tankstelle möglich ist. Gleichzeitig ermöglicht die Auswertung eine konkrete Bezifferung der exergetischen Entwertung des Wasserstoffs. Dies geschieht, indem die verrichtete Arbeit in Kilowattstunden pro Kilogramm vertanktem Wasserstoff angegeben wird. In dieser Arbeit wird außerdem der exergetische Wirkungsgrad bezogen auf den Heizwert (früher auch als unterer Heizwert bezeichnet) von Wasserstoff berechnet.

$$\eta = \frac{H_u - x}{H_u}$$

Der Heizwert wird immer dann verwendet, wenn der Wasserstoff im nachfolgenden Prozess in thermische, mechanische oder elektrische Energie umgewandelt wird. Für Wasserstoff beträgt er 33,3 kWh/kg. Der Heizwert stellt die im Stoff enthaltene Energie dar. [Klell et al. 2018, S. 85, 111; Eifler et al. 2009, S. 251]

6. VERGLEICH UND DISKUSSION DER SIMULATIONSERGEBNISSE

In den folgenden Kapiteln (6.1 bis 6.3) werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Szenarien vorgestellt. Es wird sowohl auf die explizit in den Abbildungen dargestellten Werte als auch auf die nur auf den vollständigen Ausgabeseiten (Anhänge 1-3) nachvollziehbaren Werte Bezug genommen. Anschließend folgt in Kapitel 6.4 der Vergleich und die Diskussion der vorgestellten Ergebnisse.

6.1 ERGEBNISSE DES 1. SZENARIOS: „ANLIEFERUNG 200 BAR“

Bei Szenario 1 „Anlieferung 200 bar“ sind insgesamt drei unterschiedliche Speicherstufen und ein zweistufiger Kompressor nötig. Auffällig ist, dass die laufenden Kosten der Anlieferung selbst am höchsten sind. Sie machen zwei Drittel der gesamten jährlichen laufenden Kosten aus. Da die Tankstelle durch einen Lieferanten beliefert wird, fallen für die Anlieferung keine Investitionen oder Fixkosten an. Die gemieteten oder gebuchten Leistungen sind alle abhängig von der vertankten Menge Wasserstoff und fallen daher unter die laufenden Kosten. Im Gegensatz dazu fallen bei den Speichern keine laufenden Kosten an. Alle drei benötigten Speicherstufen werden gekauft, finanziert und abgeschrieben. Laufende Kosten fallen jedoch nicht an, da die Anschaffung und auch die Prüfung oder jährliche Wartung der Speicher unabhängig von der Nutzung sind. Die Kühlung verursacht im Verhältnis geringe laufende Kosten von ca. 9.500€/a. Auffällig ist allerdings, dass etwa 81% der laufenden Kosten durch die Stromkosten der Kältemaschine verursacht werden. Insgesamt ergeben sich bei der gewählten Konfiguration spezifische Kosten von 29,55€/kg H₂ (Tabelle 9).

Tabelle 9: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 1, Quelle: Eigene Darstellung

Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	29,55	€ / kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,63	€ / kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	17,07	€ / kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	11,84	€ / kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	7,00	€ / kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	22,55	€ / kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	113,76	€ / Betankung
Stromkosten pro Jahr	14.034,14	€ / a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	11,37	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	2,00	€ / kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	67,85	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	20,05	€ / kg H ₂

Da die Summe der Fixkosten aufgrund der hohen Finanzierungskosten des Verdichters und der Speicher größer ist als die Summe der laufenden Kosten, machen diese mit 17,07€ den

größten Anteil der Kosten pro Kilogramm Wasserstoff aus. Von 11,84€, die die laufenden Kosten pro Kilogramm Wasserstoff ausmachen, fallen 7€ auf den Wasserstoffpreis der Anlieferung. Insgesamt erzeugt die Tankstelle anlagenspezifische Kosten von 22,55€/kg H₂. Dies führt zu Mehrkosten von ca. 67% pro verkauftem Kilogramm. Durch eine verbrauchte Arbeit von 11,37 kWh pro vertanktem Kilogramm, ergibt sich ein exergetischer Wirkungsgrad von 65,86%.

$$\eta = \frac{33,3 \frac{kWh}{kg} - 11,37 \frac{kWh}{kg}}{33,3 \frac{kWh}{kg}} = 0,6586$$

Wird der Wirkungsgrad von einem Maximum von 100% abgezogen, ergibt sich eine exergetische Entwertung des Wasserstoffs um 34,14%. Der eingesetzte Verdichter ist mit beiden Stufen zu ca. 42% ausgelastet, während die Kühlung durch die Auslegung als Aluminiumblock-Kältespeicher 24 Stunden pro Tag auf -40°C gehalten werden muss und somit eine Auslastung von 100% aufweist. Durch die Veränderung des Einflusses der anteiligen Kosten fällt auf, dass das größte Einsparpotential bei den Fixkosten liegt. Auf die einzelnen Komponenten bezogen finden sich diese Einsparpotentiale bei der Wasserstoffanlieferung und dem Verdichter wieder.

Wartungskosten fallen jährlich vor allem durch den Kompressor an. Dieser macht über zwei Drittel dieser Kosten aus. Im fünften und zehnten Jahr werden die Wartungskosten um ein Vielfaches erhöht, da die Speicher der gesetzlich vorgeschriebenen Prüfung unterzogen werden müssen. Im zehnten Jahr steigen die Wartungskosten ausgehend von einem Grundwert (jährliche Wartungskosten) von 17.250€ auf einen Wert von 63.250€. Die jährlichen Fixkosten bleiben konstant bis nach dem zehnten Jahr die Finanzierung aller Komponenten abgeschlossen ist. Die Fixkosten sinken nach ab dem elften Jahr um ca. 90.000€ ab und bleiben danach wieder konstant. Die Kosten pro Betankung und pro Kilogramm sinken mit steigender Anzahl der Betankungen. Mit einer Verdopplung von fünf

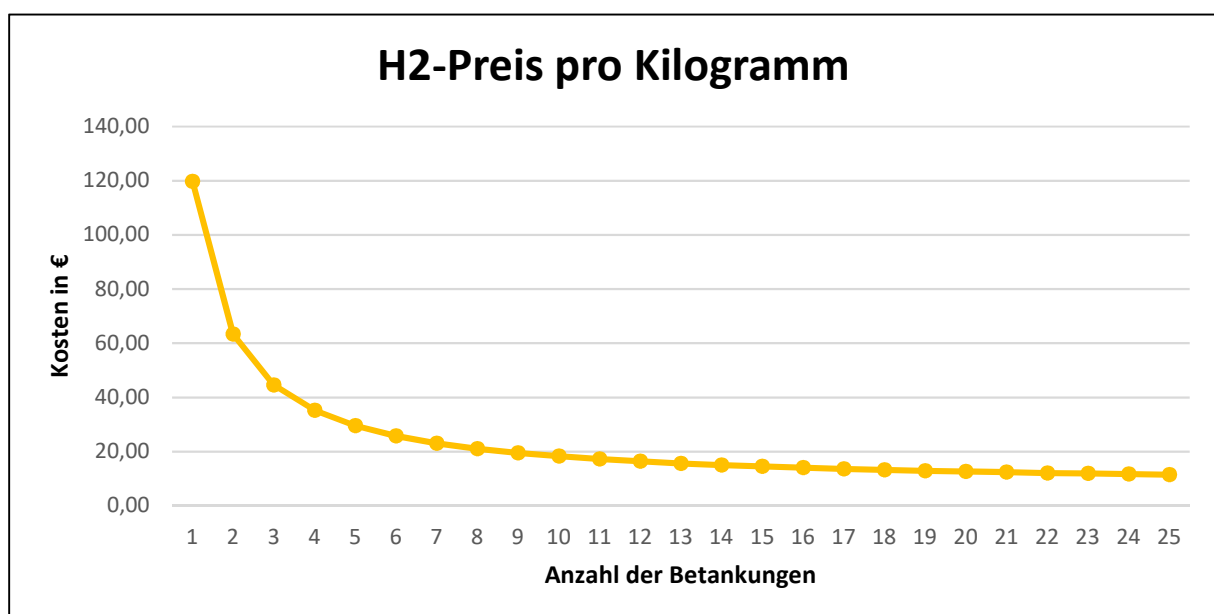


Abbildung 14: Entwicklung des H₂-Preises pro Kilogramm bei steigender Anzahl der Betankungen im Szenario 1, Quelle: Eigene Darstellung

auf zehn Betankungen pro Tag könnten die Kosten pro Kilogramm um knapp 30% reduziert werden (Abbildung 14). Bei einem zugrunde gelegten Verbrauch von ca. 800g Wasserstoff pro 100km Reichweite (ADAC 2017), ergeben sich bei den voreingestellten fünf Betankungen pro Tag Kosten von 23,64€/100km.

6.2 ERGEBNISSE DES 2. SZENARIOS: „ELEKTROLYSE“

Im 2. Szenario wird der Wasserstoff durch eine PEM-Elektrolyse an der Tankstelle erzeugt. Aufgrund des Ausgangsdrucks der Elektrolyse (35 bar) ist es nötig, den Wasserstoff auf vier unterschiedlichen Druckniveaus zwischen zu speichern. Vom Niederdruck auf das untere Mitteldruckniveau wird er von einem einstufigen Kolbenverdichter verdichtet. Für die beiden weiteren Verdichtungen wird derselbe zweistufige Kompressor aus Szenario 1 eingesetzt. Da die Elektrolyse im laufenden Betrieb einen hohen Strombedarf hat, machen ihre Kosten drei Viertel der gesamten jährlichen laufenden Kosten aus. Wie im vorangegangenen Szenario 2 auch, verursachen die Speicher keine laufenden Kosten. Die Fixkosten verteilen sich gleichmäßig auf die verschiedenen Komponenten. Lediglich die Elektrolyse hat, verursacht durch ihre höheren Investitionskosten, einen größeren Anteil von etwa 25% an den gesamten Fixkosten.

Tabelle 10: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 2, Quelle: Eigene Darstellung

Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	50,44	€ / kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,66	€ / kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	30,64	€ / kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	19,13	€ / kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	0,00	€ / kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	50,44	€ / kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	194,19	€ / Bet.
Stromkosten pro Jahr	96.947,77	€ / a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	78,56	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	13,80	€ / kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	81,17	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	40,94	€ / kg H ₂

Tabelle 10 zeigt die errechneten Kennwerte der Simulation. Die spezifischen Wasserstoffkosten von 50,44€/kg H₂ ergeben sich zu ca. 40% aus den laufenden Kosten und zu ca. 60% aus den Fixkosten. Da der Wasserstoff On-Site produziert wird und somit keine Wasserstoffkosten an einen Lieferanten zu zahlen sind, stellen die spezifischen Kosten auch gleichzeitig die Tankstellenkosten pro Kilogramm dar. Mit ca. 79 kWh/kg H₂ übersteigt die verbrauchte Arbeit den Energiegehalt des Wasserstoffs deutlich. Sowohl der Niederdruckverdichter, als auch der Mitteldruck- und Hochdruckverdichter sind zu knapp

45% ausgelastet. Die Elektrolyse hat mit 91% eine hohe Auslastung. Aus den erhaltenen Werten lässt sich bei Veränderung dieser Werte sehen (siehe Abbildung 15), dass die größten Einsparpotentiale in der Optimierung der Elektrolyse liegen. Dies lässt sich auch dadurch feststellen, dass die jährlich anfallenden Stromkosten nahezu deckungsgleich mit den jährlichen Finanzierungskosten sind.

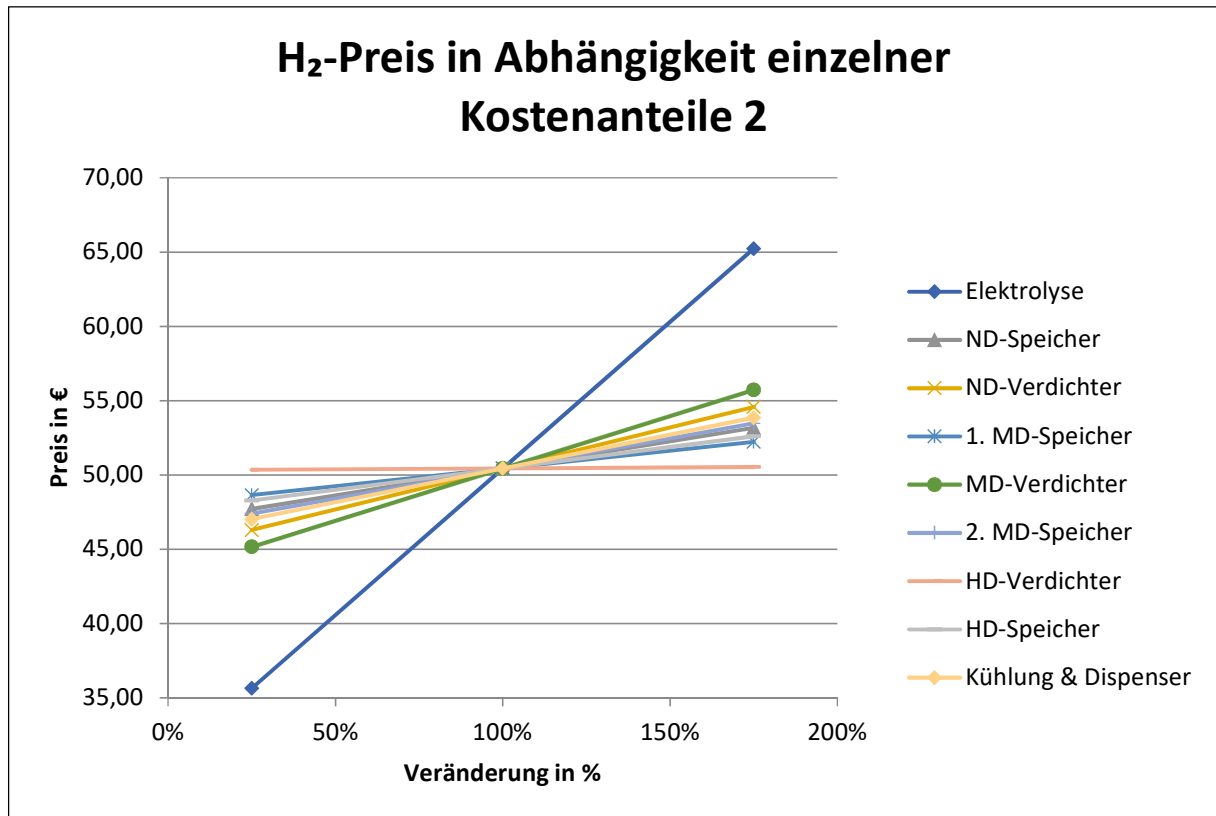


Abbildung 15: Veränderung des H₂-Preises in Abhängigkeit einzelner Komponentenkosten, Quelle: Eigene Darstellung

Die Wartungskosten steigen im zehnten Jahr besonders stark an, da der Nieder- und der erste Mitteldruckspeicher geprüft werden müssen. Bei der nötigen Anzahl der Bündel summieren sich die Gesamtkosten der Wartung auf ca. 110.000€. Die jährlichen Wartungskosten liegen bei ca. 39.000€. Im selben Jahr reduzieren sich die Fixkosten durch die endende Finanzierung von 268.000€ jährlich auf 108.000€. Die laufenden Kosten bleiben über die gesamte Nutzungsdauer hinweg auf einem Niveau um 200.000€. Da die Abschreibungszeiten der Bündel der beiden unteren Druckniveaus auf 20 Jahre angelegt sind, haben diese am Ende der Laufzeit noch einen buchhalterischen Restwert von 28.000€.

Die gewählte Elektrolyse ist so ausgelegt, dass sie den nötigen Tagesbedarf an Wasserstoff gerade decken kann. Sie bietet in diesem Szenario daher kein Potential, die Kosten pro Kilogramm mit steigender Anzahl der Betankungen pro Tag zu reduzieren. Es ergeben sich Kosten von 40,35€/100km.

6.3 ERGEBNISSE DES 3. SZENARIOS: „ANLIEFERUNG 500 BAR“

Szenario 3 bildet eine Tankstelle ab, welche mit 500 bar Trailern beliefert wird. Da immer ein Trailer an der Tankstelle stehen bleibt, ist dieser zeitgleich auch der zweiten Mitteldruckspeicher der Tankstelle. Der einstufige Kompressor verdichtet den Wasserstoff auf 875 bar. Außer diesen Komponenten sowie den Hochdruckspeichern, der Kühlung und dem Dispenser sind keine weiteren Komponenten nötig.

Tabelle 11: Ergebnisse der Kennwertberechnung im Szenario 3, Quelle: Eigene Darstellung

Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	70,36	€ / kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,41	€ / kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	46,21	€ / kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	23,73	€ / kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	8,10	€ / kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	62,26	€ / kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	270,87	€ / Bet.
Stromkosten pro Jahr	8.854,35	€ / a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	7,17	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	1,26	€ / kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	86,50	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	60,86	€ / kg H ₂

Sowohl bei den laufenden als auch bei den Fixkosten macht die Anlieferung in diesem Szenario den größten Teil der Kosten aus. Anteilig an den Fixkosten sind es 78% und an den laufenden Kosten 73%. Die Fixkosten ergeben sich vor allem aus den hohen Investitionskosten der beiden Trailer. Die laufenden Kosten werden primär durch die Einkaufskosten des Wasserstoffs verursacht. Es ergeben sich spezifische Kosten von 70,36 €/kg H₂, überwiegend verursacht durch die Fixkosten (siehe Tabelle 11). Exergetisch erfolgt an der Tankstelle eine Entwertung des Wasserstoffs um 21,53%. Dies ergibt sich aus der Differenz von 100% und dem berechneten exergetischen Wirkungsgrad.

$$\eta = \frac{33,3 \frac{kWh}{kg} - 7,17 \frac{kWh}{kg}}{33,3 \frac{kWh}{kg}} = 0,7847$$

Sowohl die Auslastung der Trailer als auch die des Verdichters zeigt deutlich, dass die Komponenten nur in geringem Maße ausgenutzt werden. So wird der Hochdruckverdichter nur zu 1,42% des Jahres genutzt. Die reine Fahr- und Beladezeit der Trailer macht eine Auslastung von 0,44% des Jahres aus.

Bei Veränderung einzelner Kostenanteile stellt sich heraus, dass die Fixkosten der Anlieferung die größten Faktoren der Preissteigerung sind. Abbildung 16 zeigt, dass die Tankstellenkosten, welche die Finanzierungskosten beinhalten, ein großes Potential besitzen, um die spezifischen Kosten zu reduzieren.

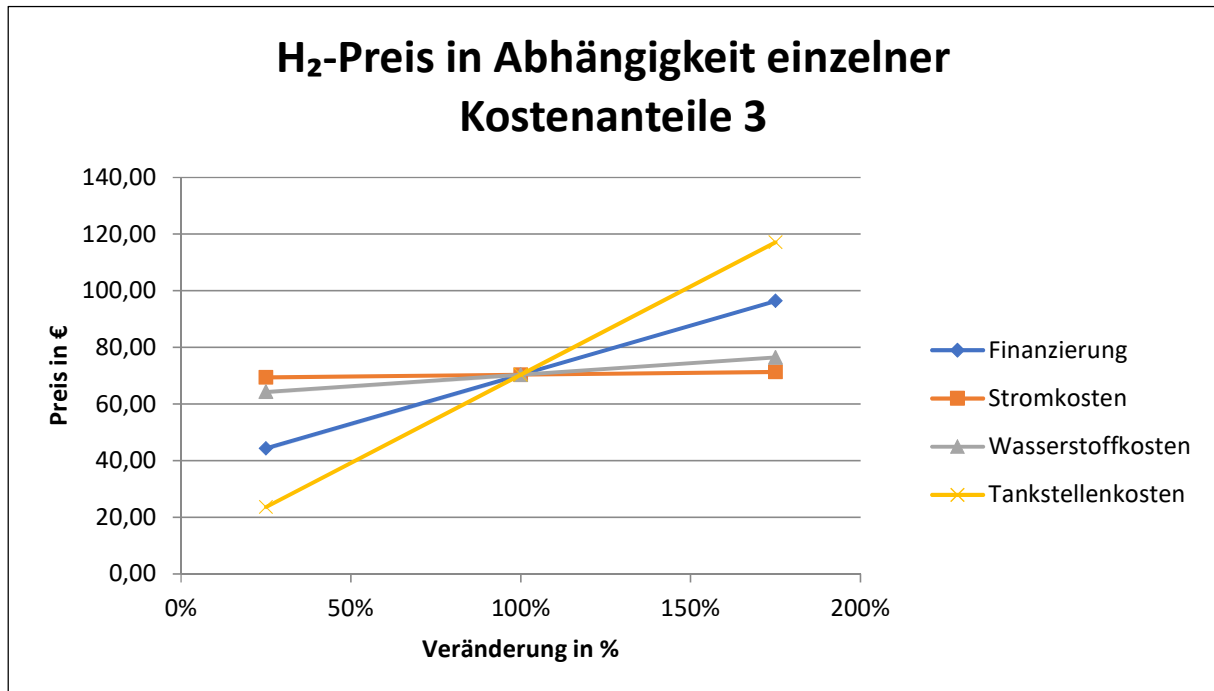


Abbildung 16: Veränderung des H₂-Preises in Abhängigkeit einzelner Kostenanteile, Quelle: Eigene Darstellung

Die auf den Trailern verbauten Typ IV Speicher werden in Fünf-Jahres-Zyklen geprüft und verursachen daher im fünften und zehnten Jahr deutlich erhöhte Wartungskosten. Diese steigen auf 65.000€ im zehnten Jahr im Vergleich zu durchschnittlichen Wartungskosten von unter 19.000€ pro Jahr. Die Fixkosten bleiben vor und nach Ablauf der Finanzierungsdauer konstant. Während der ersten zehn Jahren liegen sie bei ca. 485.000€, danach bei 240.000€ pro Jahr. Die laufenden Kosten bleiben, wie schon bei den anderen beiden Szenarien, über die Laufzeit hinweg annähernd konstant.

Die Kosten pro Kilogramm Wasserstoff reduzieren sich bei einer Verdoppelung der Betankungen pro Tag um 44% (siehe Abbildung 17). Bei fünf Betankungen pro Tag ergeben sich Kosten von 56,29€ pro 100 km.

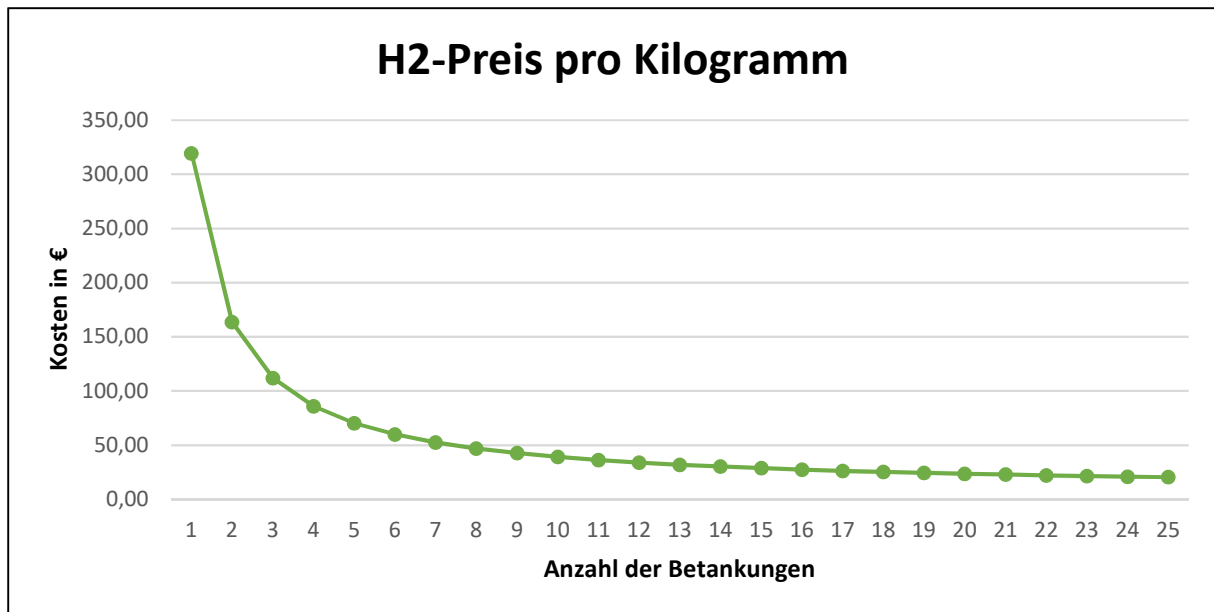


Abbildung 17: Entwicklung des H₂-Preises pro Kilogramm bei steigender Anzahl der Betankungen im Szenario 3, Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 12: Überblick über relevante Werte der drei Szenarien, Quelle: Eigene Darstellung

Werte	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Spezifische Kosten pro kg bei 5 Betankungen pro Tag [€/kg H ₂]	29,55	50,44	70,36
Verbrauchte Arbeit pro kg [kWh/kg H ₂]	11,37	78,56	7,17
Exergetische Entwertung des Wasserstoffs [%]	34,14	-	21,53
Anlagenspezifische Kosten pro kg [€/kg H ₂]	22,55	50,44	62,26
Wasserstoffkosten pro 100 km [€/100km]	23,64	40,35	56,29

6.4 DISKUSSION DER SZENARIEN

Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich deutlich, dass eine niederfrequentierte Wasserstofftankstelle unter den angegebenen Bedingungen in keinem der drei Szenarios wirtschaftlich betrieben werden kann. Szenario 1, welches den Standardaufbau einer aktuellen Tankstelle zeigt, stellt sich unter diesen Voraussetzungen jedoch hinsichtlich der Kosten und der exergetischen Entwertung als das geeignetste Szenario heraus.

Wird vorausgesetzt, dass Nutzungszahlen der Wasserstofftankstellen steigen ist eine Betankungszahl von fünf Betankungen pro Tag langfristig nicht realistisch. Wird zusätzlich von einer weiter ansteigenden Zahl verfügbarer FCEVs ausgegangen, so sind auch die Anforderungen an einzelne Tankstellen deutlich höher. Steigt die Anzahl der Betankungen auf 50 pro Tag, so muss die Tankstelle in Szenario 1 bereits 395 mal pro Jahr beliefert werden, während die Tankstelle im Szenario „Anlieferung 500 bar“ 75 Lieferungen benötigt. Reduzieren sich die Kosten bei der 200 bar Anlieferung um 63% auf einen Wert von 10,75€/kg H₂, so sinken sie bei der 500 bar Anlieferung um 79% auf einen Preis von

14,70€/kg H₂. Abbildung 18 zeigt vergleichend die Entwicklung des Wasserstoffpreises pro Kilogramm bis zu einer Anzahl von 25 Betankungen pro Tag. Es wird erkenntlich, dass sich trotz der hohen Preisdifferenz bei niedrigen Betankungszahlen, der Preis des Wasserstoffs im Szenario „Anlieferung 500 bar“ dem aus dem Szenario „Anlieferung 200 bar“ annähert.

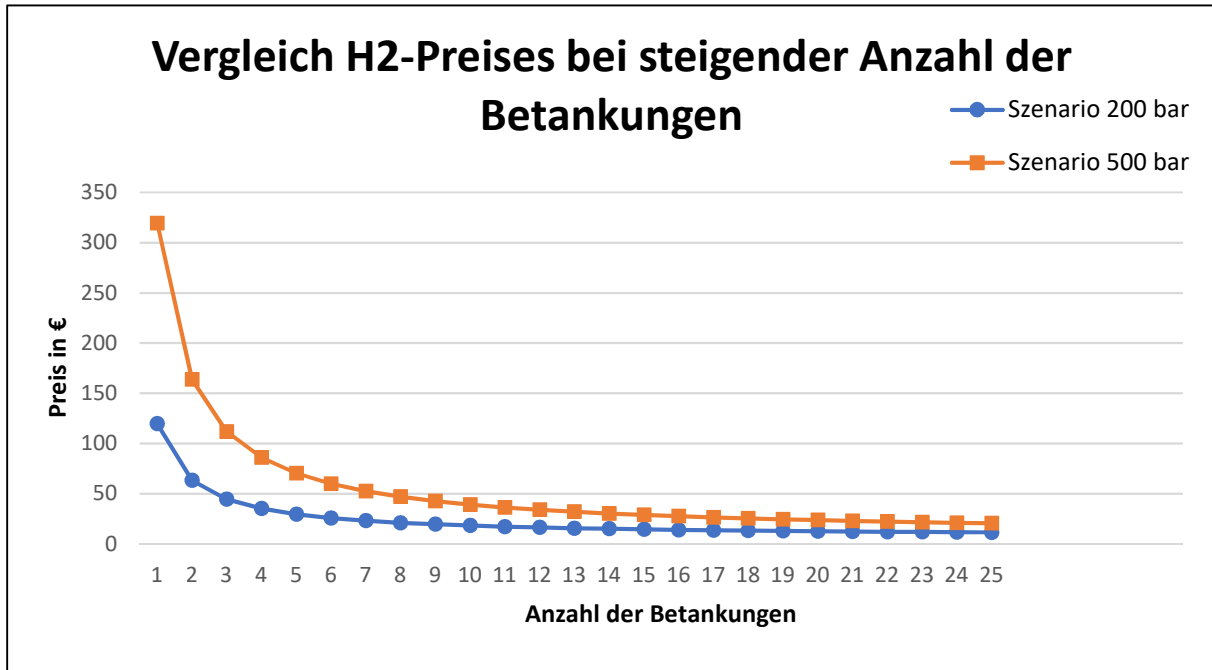


Abbildung 18: Vergleich der Entwicklung des H₂-Preises in den Szenarien 1 und 3 bei steigender Anzahl der Betankungen, Quelle: Eigene Darstellung

Bei einem weiteren Anstieg der täglichen Betankungen auf 250 steigt die Zahl der täglichen Anlieferung bei der Tankstelle aus Szenario 1 auf einen Wert von 1974 Lieferungen pro Jahr. Dies entspricht mehr als fünf Lieferungen pro Tag. Da sie zu mehreren Unterbrechungen des laufenden Betriebs pro Tag führen würde, ist diese Anzahl der Anlieferung in der Praxis nicht umsetzbar. Andere Aspekte, wie bspw. die Auslastung der Straßen etc., sind ebenfalls noch zu berücksichtigen. Die Kosten entwickeln sich in diesem Beispiel zwar auf einen Wert von 9,08 €/kg, gleichzeitig steigt die im Tool angezeigte Auslastung des voreingestellten Mittel- und Hochdruckverdichters jedoch auf über 2100%. Dieser Wert ist unrealistisch und zeigt dem Anwender, dass eine Anpassung der Eingabeparameter nötig ist. Es müssten mehrere parallele und/oder größere Verdichter vorgesehen werden, wodurch die Kosten wieder ansteigen würden. Die Tankstellenkosten pro Kilogramm Wasserstoff lägen ohne Vergrößerung der Verdichterstufen bei 2,08 €/kg.

Steigen die Betankungen im dritten Szenario auf einen Wert von 250 pro Tag an, so stellen sich bei 372 Lieferungen pro Jahr Kosten von 9,75 €/kg H₂ ein. Die Auslastung des Hochdruckverdichters läge mit ca. 71% immer noch in einem technisch umsetzbaren Bereich. Ergänzend zeigt sich allerdings in der Auslastung der Trailer ein weiteres erhebliches Einsparpotential. Diese Auslastung liegt für zwei Trailer bei einem Wert von ca. 10% pro Trailer. Da eine Anschaffung von zwei Trailern mit erheblichen Investitionskosten verbunden ist, ist sie in für eine einzelne Tankstelle unrealistisch bzw. nicht ökonomisch. Wird eine Traileranzahl von 1,05 (bei einem Betrieb von mehreren Tankstellen) angenommen, so

reduzieren sich die Tankstellenkosten auf 1,34 €/kg und es ergeben sich spezifische Kosten von 9,44 €/kg H₂.

Sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 3 zeigt sich, dass die Tankstellenkosten mit steigender Anzahl der Betankungen immer weiter sinken. Es muss zwar berücksichtigt werden, dass das Tool an dieser Stelle nur Tendenzen angibt und bei entsprechender Vergrößerung der vertankten Menge auch größere und teurere Speicher und Verdichter vorgesehen werden müssen, aber die gezeigte Tendenz ist eindeutig. Es fällt auf, dass die Tankstellenkosten mit steigender Anzahl der täglichen Betankungen zwar sinken, die gesamten Kosten des Kilogramms Wasserstoff allerdings asymptotisch auf den Einkaufspreis des Wasserstoffs zulaufen. Im zuvor beschriebenen Fall von 250 Betankungen pro Tag macht der Einkaufspreis 77% (Szenario 1) bzw. 83% (Szenario 3) der gesamten Kosten pro Kilogramm aus. Bei größerer Skalierung der Wasserstoffproduktion und Verdichtung an der Quelle ist es wahrscheinlich, dass die Kosten für den Produzenten sinken werden und somit auch der Einkaufspreis für den Tankstellenbetreiber günstiger wird.

Im Szenario 2 „Elektrolyse“ zeigt sich, dass eine Verdopplung der Elektrolyse bei gleichbleibender Anzahl der Betankungen einen Anstieg der spezifischen Kosten um ca. 4% verursacht. Die erhöhte Elektrolyse bietet allerdings die Möglichkeit, die tägliche Betankungszahl zu verdoppeln. Wird die Kostenentwicklung bei dieser Verdopplung betrachtet, so lässt sich feststellen, dass die spezifischen Kosten auf einen Wert von 32,56 €/kg sinken. Es zeigt sich, dass sich die On-Site-Produktion bei einer hochfrequentierten Tankstelle lohnen könnte, besonders in Gebieten, in denen eine Versorgung via Trailer oder Pipeline nicht sinnvoll oder möglich ist. Die exergetische Entwertung des Wasserstoffs an der Tankstelle ist bei On-Site-Produktion immer höher als bei der Anlieferung. Entscheidend ist, dass das Tool an dieser Stelle nur die Entwertung an der Tankstelle berücksichtigt. In den Szenarien 1 und 3 wird die Produktion des Wasserstoffs und somit die Entwertung ausgelagert und findet an der Quelle statt. Die exergetische Entwertung des Wasserstoffs im Szenario „Elektrolyse“ wird nicht betrachtet, da die Vergleichbarkeit zu den anderen beiden Szenarien nicht gegeben ist. Um einen vollständigen Vergleich durchzuführen, muss die komplette Ökobilanz der Systemketten betrachtet werden. Ökobilanzen beziehen die gesamte exergetische Entwertung mit ein und berücksichtigen somit auch die Entwertung an der Quelle.

Werden die einzelnen Komponenten betrachtet, so fällt auf, dass bei den meisten Komponenten unabhängig von der Art der Wasserstoffherkunft Optimierungspotentiale vorhanden sind. Die verschiedenen Speicher fallen besonders durch hohe Prüfkosten auf. Diese sind durch Transport, Spülung und der eigentlichen Prüfung ein Kostenfaktor. Bei der Prüfung kann es zu Beschädigungen der Speicher kommen. Daher müssen eventuelle Kosten zum Austausch einzelner Gasflaschen ebenfalls berücksichtigt werden. Die Spülung der Speicher stellt ein weiteres Problem dar. Je nach Konstruktion einer Speichereinheit (z.B. als Bündel oder Container) werden die Flaschen in einer aufrechten Lage montiert. Da die Flaschen mit Stickstoff getestet werden, ist es nötig, sie vor Verwendung an der Tankstelle mit Wasserstoff zu spülen. In der Regel werden diese Flaschen jedoch nicht durchströmt, sondern es befindet sich nur an einer Seite ein Anschluss, durch welchen der Wasserstoff eingeströmt wird. Während Flaschen der Typen I und II mit einer Vakuumpumpe auf einen

geringen Restdruck entleert werden können, kommt es vor allem bei Typ IV Flaschen zu konstruktionsbedingten Hindernissen. Diese dürfen nach erstmaliger Erreichung eines Mindestdrucks nicht wieder unter diesen Druck entspannt werden und können daher nicht leergezogen werden. Dieser Mindestdruck begründet sich durch die sonst auftretenden Delamination der Speicherschichten. Aufgrund dieser Einschränkungen ist es nicht möglich genau zu bestimmen, nach welcher Anzahl an Spülvorgängen die nötige Wasserstoffreinheit gewährleistet ist. Die Kosten für diese Spülvorgänge können daher stark variieren und sind nur schwer zu kalkulieren.

Komponente	Kosten pro speicherbarem kg H ₂	Kosten pro nutzbarem kg H ₂
Elektrolyse	-	-
ND-Speicher	3.032,70 €	3.549,48 €
ND-Verdichter	-	-
1. MD-Speicher	587,62 €	946,34 €
MD-Verdichter	-	-
2. MD-Speicher	936,27 €	1.159,14 €
HD-Verdichter	-	-
HD-Speicher	1.710,69 €	5.451,96 €
Kühlung & Dispenser	-	-

Abbildung 19: Screenshot der Übersicht über die Kosten pro speicher- und nutzbarem Kilogramm H₂, Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 19 ist erkennbar, dass die Kosten pro speicher- und nutzbarem Kilogramm Wasserstoff je nach Speicherstufe stark variieren. Bei niedrigeren Drücken kann noch eine große Ausnutzung der Speicherkapazitäten erreicht werden. Diese Ausnutzung hängt stark vom minimalen Ansaugdruck des nachgeschalteten Kompressors ab. Auffällig ist, dass besonders die Hochdruckspeicher eine enorme Diskrepanz zwischen den Kosten pro speicherbarem Kilogramm Wasserstoff und den Kosten pro nutzbarem Kilogramm Wasserstoff aufweisen. Dies ist damit zu begründen, dass der Wasserstoff bei 875 bar gespeichert, jedoch bei einer normalen Überströmbetankung maximal auf einen Druck von 700 bar reduziert wird. Somit verbleiben 700 bar des Wasserstoffs ungenutzt in den Hochdruckspeichern. Diese Problematik könnte in der Zukunft durch reine Boosterbetankungen gelöst werden. Bei Boosterbetankungen (siehe Seite 8) wird der Wasserstoff in den Fahrzeugtank hinein verdichtet. Zwar müssen hierfür spezielle Kompressoren an der Tankstelle vorgesehen werden, die Hochdruckspeicher, der derzeit noch an den Tankstellen im Einsatz sind, können jedoch eingespart werden. So müsste zum einen weniger Zusatzenergie in die Verdichtung des Wasserstoffs investiert werden und zum anderen würde erheblich weniger, nicht nutzbarer Wasserstoff an der Tankstelle gelagert werden.

Die einzusetzenden Verdichter sind stark von der Auslastung und Auslegung der Tankstelle abhängig. Da in den simulierten Szenarien von einer niedriger frequentierten Tankstelle ausgegangen wird, sind Kolbenkompressoren die geeignete Wahl. Gerade Membrankompressoren sind nicht für kurze Nutzungsdauern geeignet. Diese

Voraussetzungen ändern sich bei einem Anstieg der Betankungen pro Tag. Für diese Fälle gilt es erneut zu evaluieren, welcher Kompressortyp am besten geeignet ist. Hierzu sind genauere Werte zu anderen Verdichterarten nötig. Besonders für ionische Verdichter ist es nicht möglich, exakte belastbare Werte zu erhalten.

Bei der Kühlung des Wasserstoffs zeigt sich, dass ein Großteil der laufenden Kosten durch die Stromkosten verursacht wird. Dies liegt an der Verwendung eines Aluminiumblocks als Kältespeicher mit integriertem Wärmetauscher. Durch die dauerhafte Bereitstellung der Kälte wird rund um die Uhr Strom verbraucht. Besonders bei Tankstellen mit einer kleinen Anzahl an Betankungen pro Tag könnte von einem Umstieg auf Plattenwärmetauscher profitiert werden. Es müsste dann im Betankungsfall zwar eine deutlich größere Leistung bereitgestellt werden. Bei einer Auslastung von unter 2% (bei fünf Betankungen pro Tag) wäre dies im Vergleich zum Aluminiumblock-Kältespeicher die geeignetere Variante. Langfristig sind weitere Untersuchungen durchzuführen, ob der Wasserstoff bei der Betankung tatsächlich auf -40°C herunter gekühlt werden muss. Ließe sich etwa durch spezielle Tankprozeduren, bspw. durch eine Betankung mit konstanter Druckdifferenz, der Wärmeeintrag in den Fahrzeugtank verringern, so wäre eine Kühlung in diesem Ausmaß nicht nötig. Ein weiterer Untersuchungsgegenstand könnte hierbei die Senkung des Druckniveaus im Fahrzeugtank sein. Dies hätte zwar geringere Reichweiten zur Folge, diese könnten allerdings durch Weiterentwicklungen der Brennstoffzellenfahrzeuge kompensiert werden.

7. FAZIT

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, ein Vergleichswerkzeug zu entwickeln, welches es dem Anwender ermöglicht, bereits in der Planungsphase Informationen über die zu erwartenden Kosten und Energieverbräuche der Tankstelle zu erhalten. Hierzu wurde auf Basis der Literaturrecherche ein modularer Aufbau der Tankstelle entwickelt, um die unterschiedlichen Konfigurationsmöglichkeiten abzubilden. Außerdem wurden die Simulationsergebnisse in nachvollziehbaren und vergleichbaren Kennwerten zusammengefasst. Die gewählte Struktur des Tools ermöglicht dem Nutzer, die Tankstelle sowohl vor als auch während der Planungsphase genauer zu differenzieren und Einflussfaktoren zu ermitteln. Das Tool bietet die Möglichkeit durch mehrere vergleichende Simulationen die größten Optimierungspotentiale offenzulegen, um so bereits in der Planungsphase Anpassungen vorzunehmen zu können.

Nach Erstellung des Tools wurden drei exemplarische Szenarien simuliert und verglichen. Insbesondere wurden die spezifischen Kosten pro vertanktem Kilogramm sowie zusätzlich die exergetische Entwertung des Wasserstoffs betrachtet.

Ausblick

Durch die Auswertung der Szenarien und der weiterführenden Vergleiche zeigt sich, dass es unter bestimmten Voraussetzungen (bspw. bei erhöhter Anzahl der täglichen Betankungen) möglich sein könnte, eine Wasserstofftankstelle wirtschaftlich zu betreiben. Die Auswahl der Konfiguration ist stark abhängig von unterschiedlichen Faktoren. Die Anzahl der Betankungen pro Tag sowie die Wahl der Wasserstoffquelle sind die beiden einflussreichsten Faktoren. Bei niedrigfrequentierten Tankstellen ist ein ökonomischer Betrieb unter realistischen Bedingungen nicht zu erwarten.

Die in den beschriebenen Szenarien dargestellten Konfigurationen sind Vereinfachungen sehr komplexer Systeme. So sind beispielweise die Energieverluste während einer Betankung maximiert, da davon ausgegangen wird, dass der vertankte Wasserstoff ausschließlich aus dem Hochdruckspeicher entnommen wird. Für eine genauere Planung ist es daher unabdingbar, weitere vergleichende Simulationen durchzuführen. Die weiterführenden Vergleiche sollten unter Blickpunkten wirtschaftlicher und exergetischer Veränderungen durchgeführt werden. Das heißt, dass die Szenarien bspw. eine Tankstelle mit maximierten Anlagenkosten, eine Tankstelle mit minimierten Anlagenkosten oder Tankstellen mit minimierten und maximierten Verbräuchen der einzelnen Komponenten abbilden sollten.

Es lässt sich jedoch feststellen, dass die durch Extrapolation gegebenen Tendenzen ein großes Potential in der Konzeption von Wasserstofftankstellen zeigen. Unter realistischer Weiterentwicklung der Technologie auf allen Ebenen sind wirtschaftliche und exergetische Optimierungen möglich. So erscheint es realistisch, die hohe kapitale Bindung der Hochdruckspeicher durch Boosterbetankungen zu umgehen.

Abschließend ist zu sagen, dass die Wasserstoffmobilität derzeit von technischen und politischen Faktoren stark limitiert wird. Für eine nachhaltige Entwicklung der Technologie

ist es nicht nur notwendig, die technischen Optimierungspotentiale der einzelnen Systemkomponenten auszuschöpfen, sondern parallel auch die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für einen Infrastrukturwandel zu schaffen. Besonders in der Politik ist ein Umdenken erforderlich, um so einen Strukturwandel in Fragen der Antriebstechnologie herbeizuführen und die Markteinführung neuer Technologien zu ermöglichen. Gesellschaftlicher Wandel muss politisch unterstützt sein. Ohne Impulse wird und kann kein nachhaltiger Wandel im Verkehrssektor stattfinden und die Einhaltung der Klimaschutzziele 2050 ist fraglich.

Technologisch sind besonders die hohen Anschaffungskosten der FCEVs für den Verbraucher und die hohen Investitionskosten für den Ausbau der Infrastruktur für die Tankstellenbetreiber abschreckende Faktoren. Die öffentliche Förderung und Subvention ist daher genauso wichtig wie die technisch optimierte Planung der Wasserstoffinfrastruktur, um die gesteckten Ziele zu Erreichen.

QUELLENVERZEICHNIS

- ADAC (2017): ADAC Autotest. Toyota Mirai, [online]
<[https://www.adac.de/ext/itr/tests/Autotest/AT5568 Toyota Mirai/Toyota Mirai.pdf](https://www.adac.de/ext/itr/tests/Autotest/AT5568_Toyota_Mirai/Toyota_Mirai.pdf)>,
[26.06.2018]
- Binnewies, M.; Finze, M.; Jäckel, M.; Schmidt, P.; Willner, H.; Rayner-Canham, G. (2016):
Allgemeine und Anorganische Chemie., 3. Aufl., Heidelberg: Springer Spektrum
- Breitkopf, C.; Swider-Lyons, K. (2017): *Springer Handbook of Electrochemical Energy*, Berlin:
Springer-Verlag
- Deacademic (2015): Ionischer Verdichter, [online]
<<http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/2418688>> [10.06.2018]
- Eifler, W.; Schlücker, E.; Spicher, U.; Will, G. (2009): *Küttner Kolbenmaschinen.
Kolbenpumpen, Kolbenverdichter, Brennkraftmaschinen*, 7. Aufl., Wiesbaden:
Vieweg+Teubner
- Europäische Kommission (2018): Pariser Übereinkommen, [online]
<https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de>
- e-mobil BW (Hrsg.) (2013): *Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität.
Entwicklungsstand und Forschungsbedarf*. Stuttgart, e-mobil BW GmbH.
- Hofer Hochdrucktechnik (2018): Membrankompressoren. Merkmale im Überblick, [online]
<<https://www.hofer-hochdrucktechnik.de/produkte/membrankompressoren/merkmale/>>
[10.06.2018]
- HyET (2018): The new standard. HyET HCS 100 electrochemical compressor, [online]
<<http://hyet.nl/hydrogen/>> [09.06.2018]
- H2-Mobility (2018): H₂ tanken. Wasserstoffmobilität beginnt jetzt, [online]
<<https://h2.live/tankstellen>> [09.06.2018]
- H2-Mobility (2015): H₂-Mobility Broschüre, [online]
<https://h2.live/pdf/H2M_Broschuere_WEB_A5_2017-06-01.pdf> [09.06.2018]
- Klell, M.; Eichseder, H.; Trattner, A. (2018): *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung,
Speicherung, Anwendung*, 4. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kompressor.one (2018): Funktionsweise Kolbenkompressor, [online]
<<http://www.kompressor.one/07-seiten/5140-kolbenkompressor.php>> [10.06.2018]
- Kurzweil, P.; Dietlmeier, O. (2015): *Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren,
Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Grundlagen*, Wiesbaden: Springer Vieweg
- Linde (2013): Rechnen Sie mit Wasserstoff. Die Datentabelle, [online] <http://www.linde-gas.at/internet.lg.lg.aut/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110550_169419.pdf> [29.04.2018]

- Linde (2015): Die treibende Kraft. Mit Linde Wasserstoffprojekte realisieren, [online] <https://www.the-linde-group.com/internet.global.thelindegrou.global/de/images/00299_LG_Wasserstoff_Broschuere_218x305_DE_72_2MB16_233488.pdf?v=3.0> [10.06.2018]
- Melideo, D.; Baraldi, D.; De Miguel Echevarria, N.; Acosta Iborra, B. (2017): Effects of the Injector Direction on the Temperature Distribution during Filling of Hydrogen Tanks, [online] <https://www.hysafe.info/wp-content/uploads/2017_papers/115.pdf> [27.05.2018]
- Nuvera (2016): Nuvera Demonstrates Electrochemical Hydrogen Compressor for Premiere Fueling Event, [online] <<https://www.nuvera.com/blog/nuvera-demonstrates-electrochemical-hydrogen-compressor-for-premiere-fueling-event>> [09.06.2018]
- Pfaff, M. (2018): *Schiffsbetriebstechnik. Nachschlagewerk und Ratgeber*, Wiesbaden: Springer Fachmedien
- Qin, Nan; Brooker, Paul (2014): Hydrogen Fueling Stations Infrastructure, [online] <<http://fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/fsec-cr-1986-14.pdf>> [08.06.2018]
- Robinius, M.; Linssen, J.; Grube, T.; Reuß, M.; Stenzel, P.; Syranidis, K.; Kuckertz, P.; Stolten, D. (2018): *Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen fueling and Electric Charging of Vehicles*. Jülich: Schriften des Forschungszentrums Jülich.
- Rosen, P. (2018): *Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern. Thermische und geometrische Optimierung für die automobile Anwendung*, Wiesbaden: Springer Fachmedien
- SAE International (Hrsg.) (2010): *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*, Standard J2601, USA: SAE International
- Shell (Hrsg.) (2017): *Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft? Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H₂*. Hamburg, Shell Deutschland Oil GmbH
- Shell (2018): Wieviel kostet die Betankung?, [online] <<https://www.shell.de/energie-und-innovation/mobilitaet/wasserstoff.html>> [26.06.2018]
- Stolten, D. (2010): *Hydrogen and Fuel Cells. Fundamentals, Technologies and Applications*, 1. Aufl., Weinheim: Wiley-VCH Verlag
- Töpler, J.; Lehmann, J. (2017): *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven*, 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angaben der Quelle kenntlich gemacht.

Duisburg, 17.07.2018

ANHÄNGE

ANHANG 1: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 1 „ANLIEFERUNG 200 BAR“	IX
ANHANG 2: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 2 „ELEKTROLYSE“	X
ANHANG 3: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 3 „ANLIEFERUNG 500 BAR“	XI
ANHANG 4: ABBILDUNG ÜBERSICHT	VII
ANHANG 5: ABBILDUNG ELEKTROLYSE	VIII
ANHANG 6: ABBILDUNG ANLIEFERUNG	IX
ANHANG 7: ABBILDUNG SPEICHER	X
ANHANG 8: ABBILDUNG VERDICHTER	XI
ANHANG 9: ABBILDUNG KÜHLUNG & DISPENSER	XII

ANHANG 1: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 1 „ANLIEFERUNG 200 BAR“

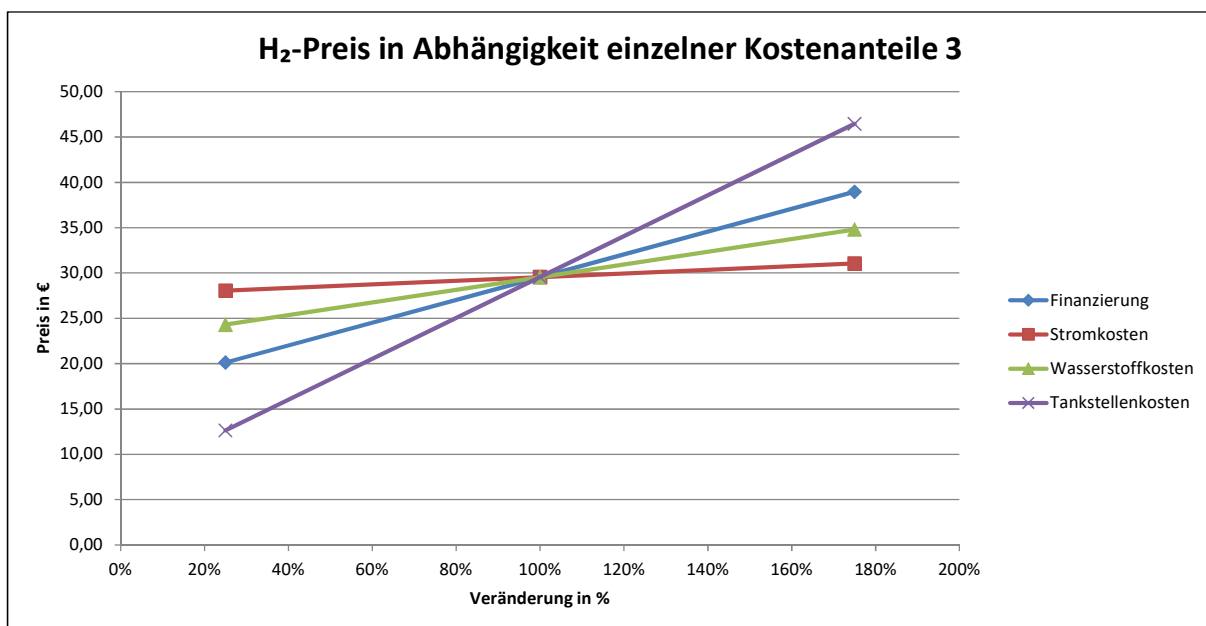
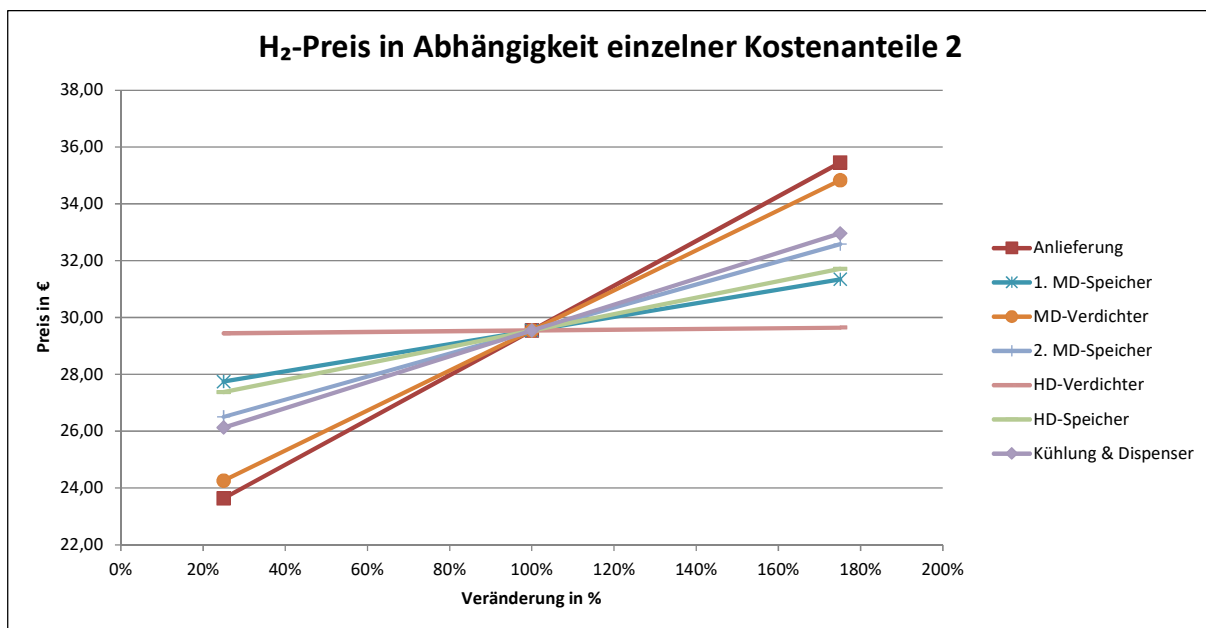
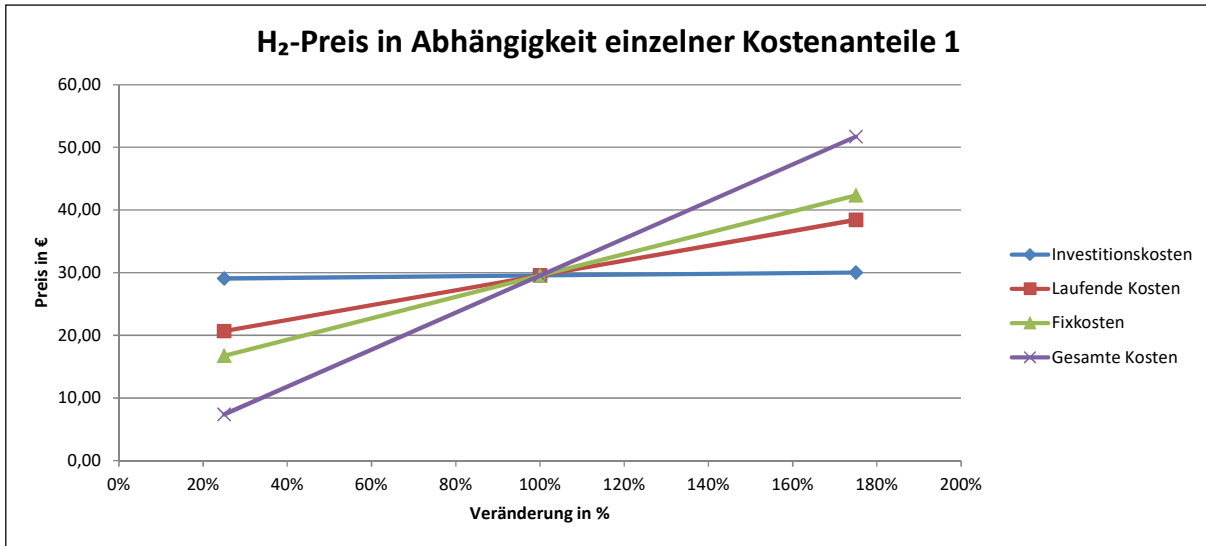
Überblick über Auslegungsparameter			Faktoren für Auswertung	
5	Bet. / d	Betankungen pro Tag	Preissteigerungsfaktor	1,2%
3,85	kg / Bet.	Ø-vertankte Menge	Faktor Anz. Betankung	5
19,25	kg / d	Benötigte H ₂ -Menge pro Tag	Veränderungsfaktor 1	75%
0,00	kg / d	Produzierte H ₂ -Menge pro Tag	Veränderungsfaktor 2	75%
466,17	kg	Gespeicherte H ₂ -Menge	Veränderungsfaktor 3	75%
302,42	kg	Nutzbare H ₂ -Menge		
15	a	Nutzungsdauer		
0,17564	€/kWh	Strompreis		
243,46	m ²	Grundstücksfläche		

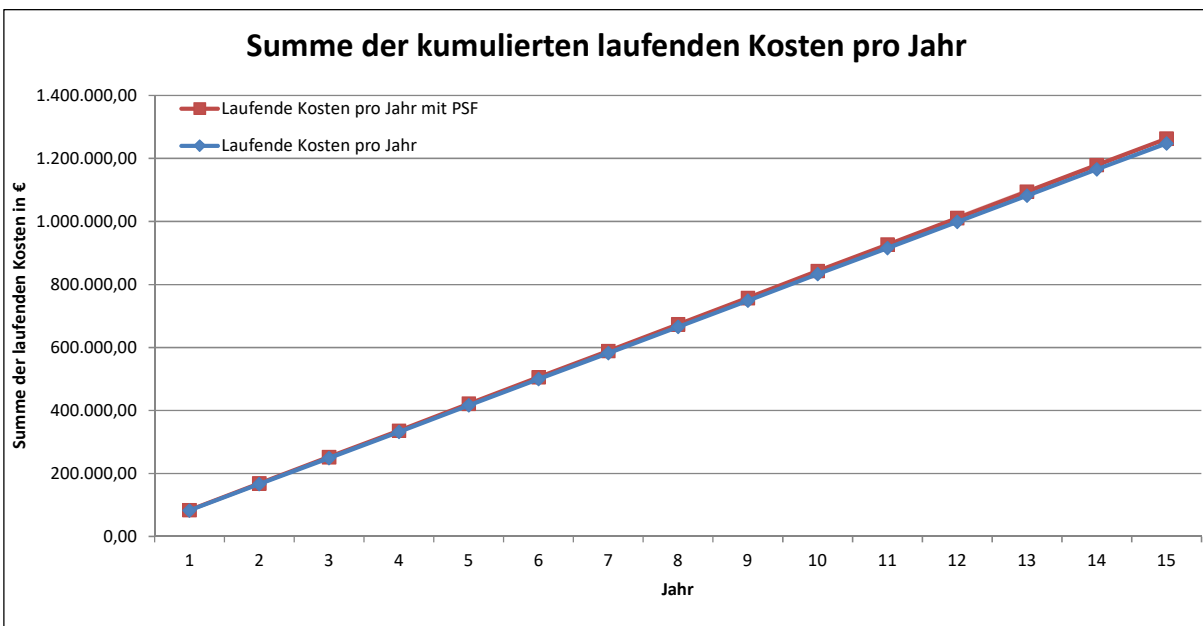
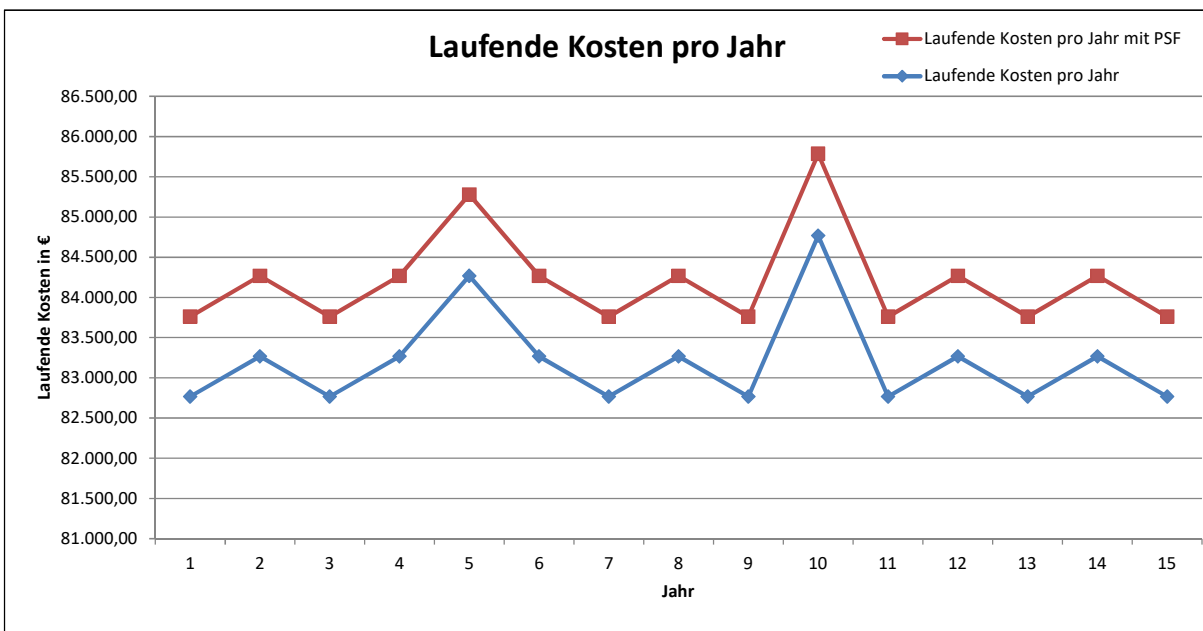
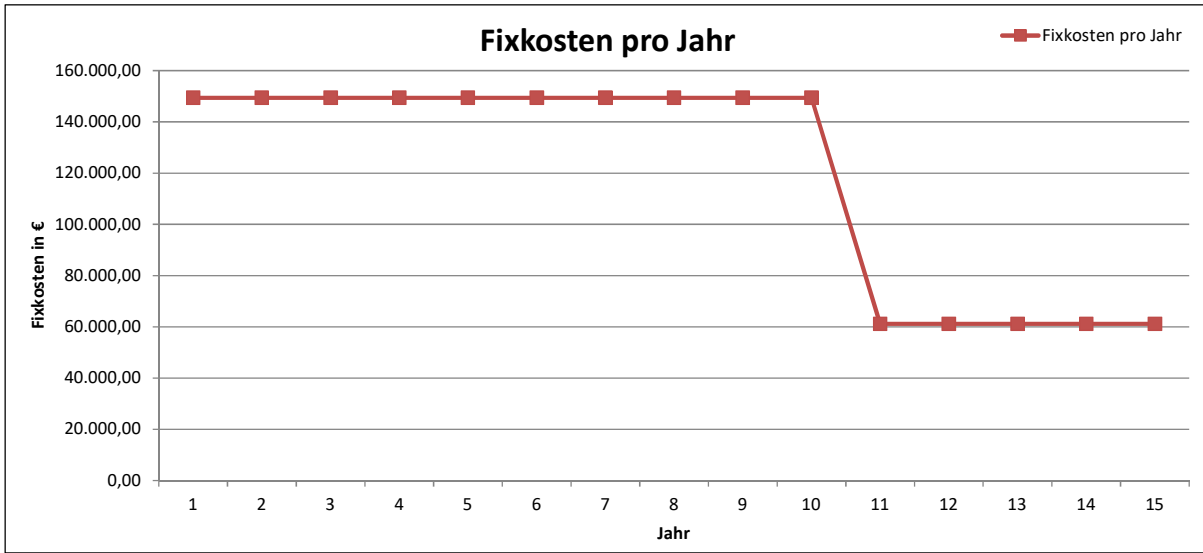
Gewählte Konfiguration	
Anlieferung 200 bar	
Lieferdruck	160 bar
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	0,00 €/a
Laufende Kosten	55.583,75 €/a
1. MD-Speicher	
Speichertyp	Typ I
Investitionskosten	5.000,00 €
Fixkosten	20.602,41 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
MD-Verdichter	
Verdichterart	Kolben
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	39.353,85 €/a
Laufende Kosten	18.529,79 €/a
2. MD-Speicher	
Speichertyp	Typ IV
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	35.393,59 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
HD-Verdichter	
Verdichterart	Kolben
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	0,00 €/a
Laufende Kosten	1.161,32 €/a
HD-Speicher	
Speichertyp	Typ II
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	25.358,39 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
Kühlung & Dispenser	
Wärmetauscherart	Block
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	28.681,45 €/a
Laufende Kosten	9.493,03 €/a

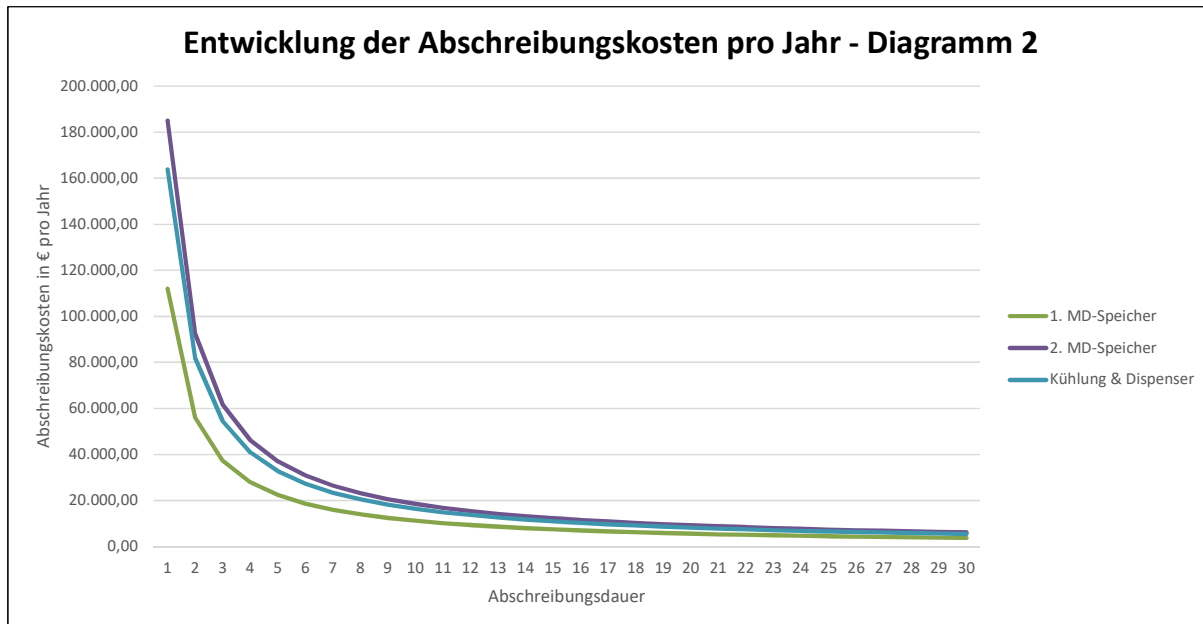
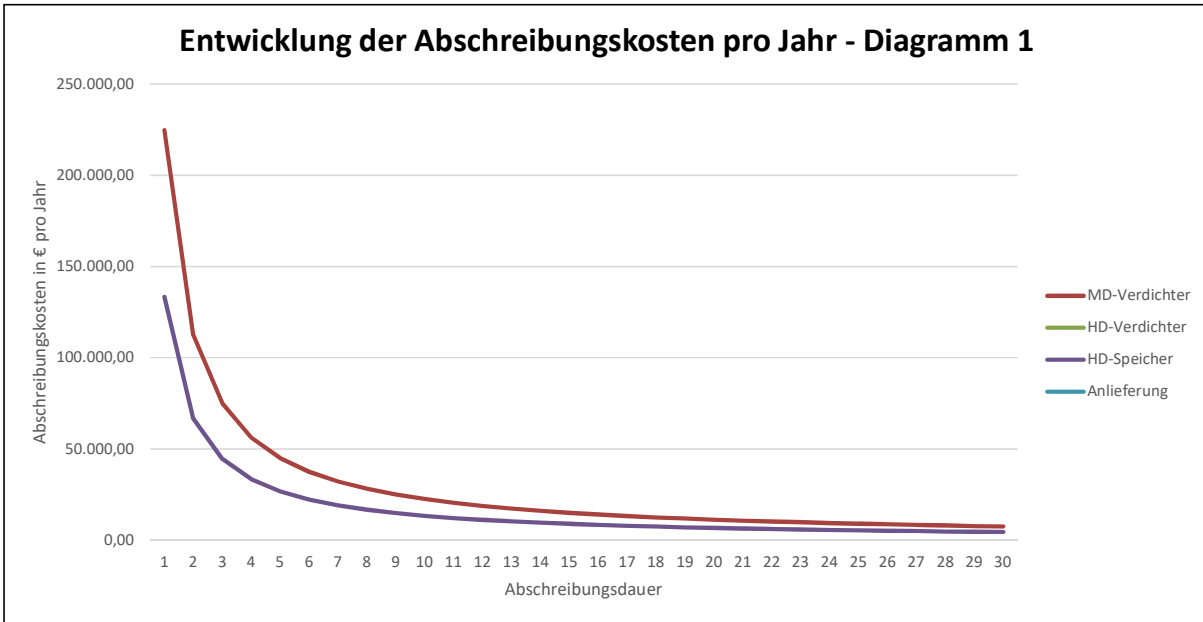
Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	29,55	€/ kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,63	€/ kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	17,07	€/ kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	11,84	€/ kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	7,00	€/ kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	22,55	€/ kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	113,76	€/ Bet.
Stromkosten pro Jahr	14.034,14	€/ a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	11,37	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	2,00	€/ kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	67,85	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	20,05	€/ kg H ₂

Komponente	Auslastung
Anlieferung	0,00%
1. MD-Speicher	62,09%
MD-Verdichter	42,08%
2. MD-Speicher	80,77%
HD-Verdichter	1,42%
HD-Speicher	31,38%
Kühlung & Dispenser	100,00%

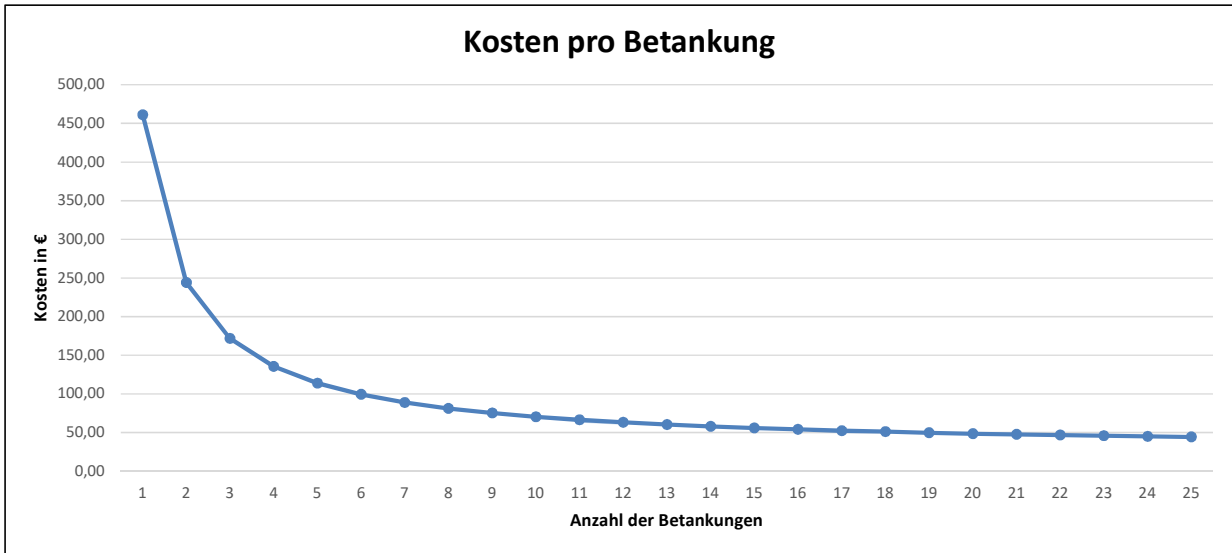
Komponente	Kosten pro speicherbarem kg H ₂	Kosten pro nutzbarem kg H ₂
Anlieferung	-	-
1. MD-Speicher	587,62 €	946,34 €
MD-Verdichter	-	-
2. MD-Speicher	936,27 €	1.159,14 €
HD-Verdichter	-	-
HD-Speicher	1.710,69 €	5.451,96 €
Kühlung & Dispenser	-	-





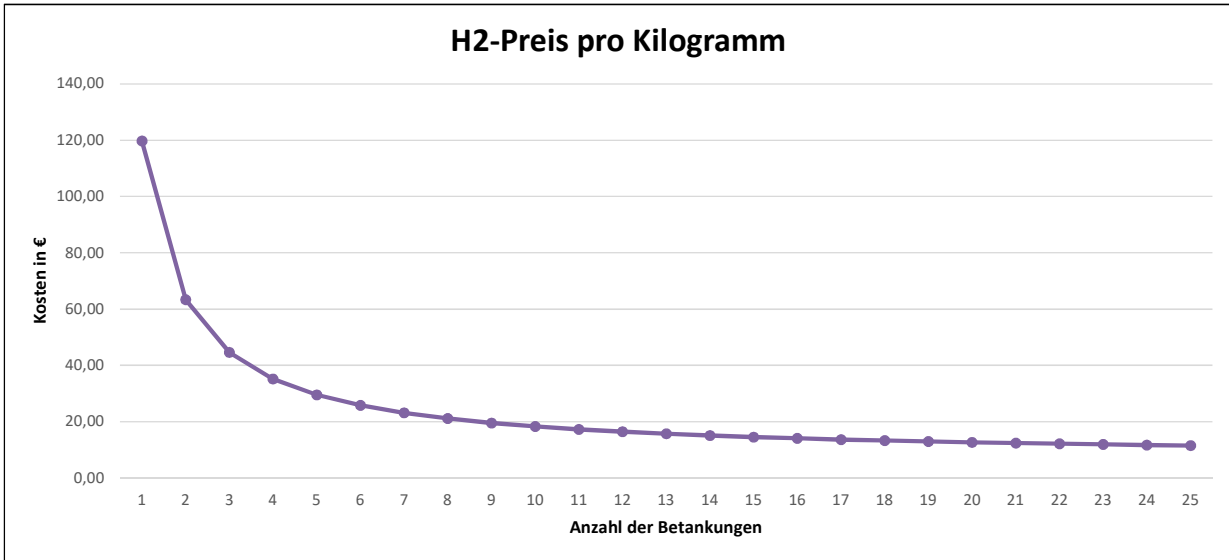


Buchhalterischer Restwert	
Anlieferung	
1. MD-Speicher	28.000,75 €
MD-Verdichter	
2. MD-Speicher	
HD-Verdichter	
HD-Speicher	
Kühlung & Dispenser	



Betankungen pro Tag	Kosten pro Betankung [€]
1	461,00
2	243,97
3	171,63
4	135,46
5	113,76
6	99,29
7	88,96
8	81,21
9	75,18
10	70,35
11	66,41
12	63,12
13	60,34
14	57,95
15	55,89
16	54,08
17	52,48
18	51,06
19	49,79
20	48,65
21	47,62
22	46,68
23	45,82
24	45,04
25	44,31

Ergebnisse		
Ges. vertankte Menge	105.393,75	kg H ₂ /15a
Ges. Betankungen	27.375	Bet./15a
Kosten pro Betankung	113,76	€/Bet.
Investitionskosten pro Bet.	2,43	€/Bet.
Laufende Kosten pro Bet.	45,59	€/Bet.
Fixkosten pro Betankung	65,74	€/Bet.



Betankungen pro Tag	H2-Preis pro kg [€]
1	119,74
2	63,37
3	44,58
4	35,18
5	29,55
6	25,79
7	23,11
8	21,09
9	19,53
10	18,27
11	17,25
12	16,39
13	15,67
14	15,05
15	14,52
16	14,05
17	13,63
18	13,26
19	12,93
20	12,64
21	12,37
22	12,12
23	11,90
24	11,70
25	11,51

Ergebnisse		
Ges. vertankte Menge	105.393,75	kg H ₂ /15a
Ges. Betankungen	27.375	Bet./15a
Kosten pro kg	29,55	€/kg H ₂
Investitionskosten pro kg	0,63	€/kg H ₂
Laufende Kosten pro kg	11,84	€/kg H ₂
Fixkosten pro kg	17,07	€/kg H ₂

ANHANG 2: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 2 „ELEKTROLYSE“

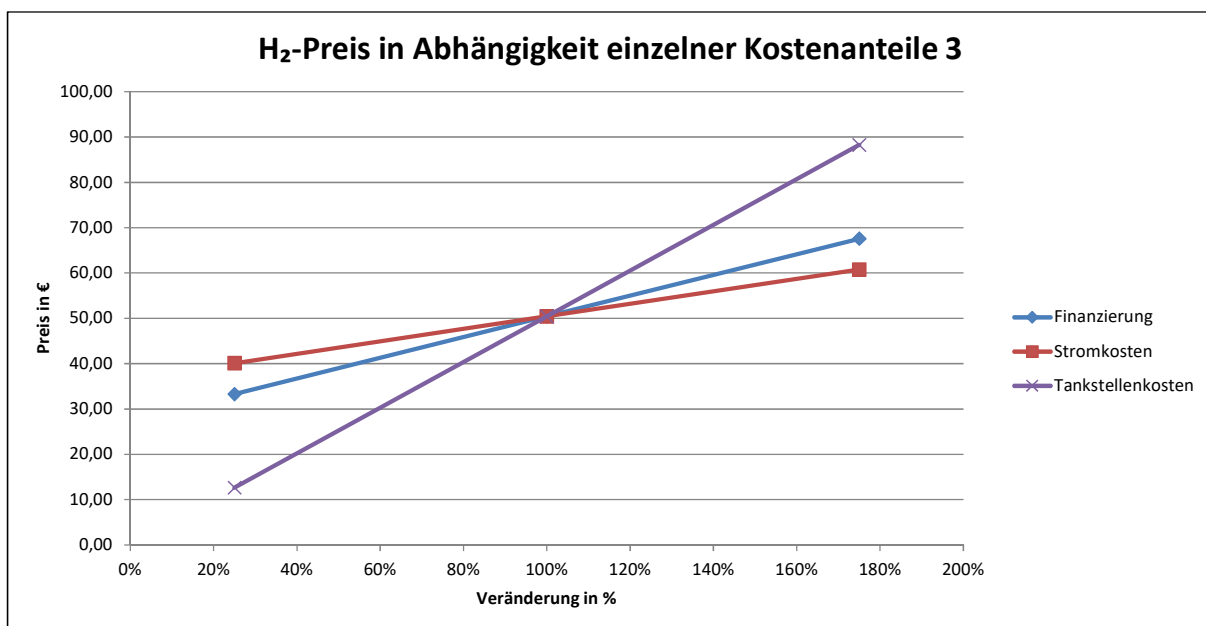
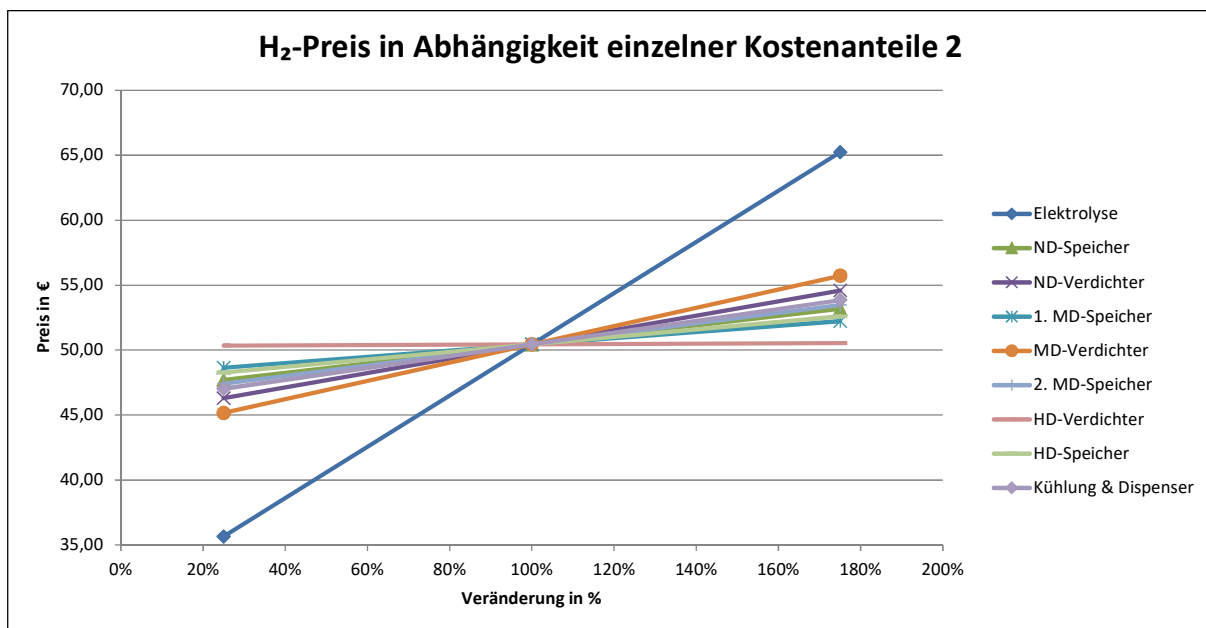
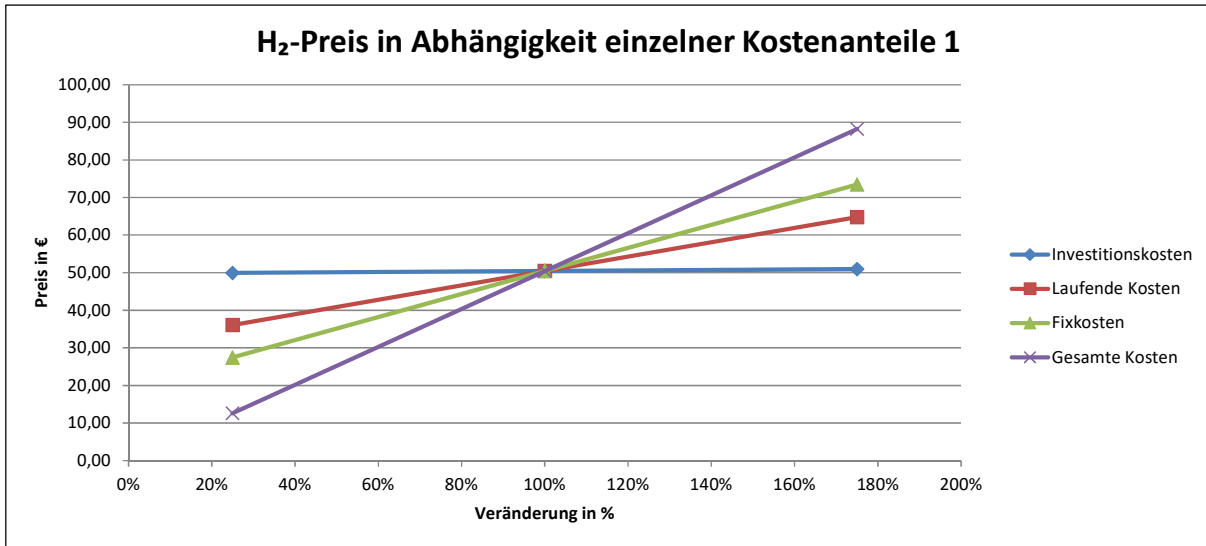
Überblick über Auslegungsparameter			Faktoren für Auswertung	
5	Bet. / d	Betankungen pro Tag	Preissteigerungsfaktor	1,2%
3,85	kg / Bet.	Ø-vertankte Menge	Faktor Anz. Betankung	5
19,25	kg / d	Benötigte H ₂ -Menge pro Tag	Veränderungsfaktor 1	75%
19,28	kg / d	Produzierte H ₂ -Menge pro Tag	Veränderungsfaktor 2	75%
503,11	kg	Gespeicherte H ₂ -Menge	Veränderungsfaktor 3	75%
333,98	kg	Nutzbare H ₂ -Menge		
15	a	Nutzungsdauer		
0,17564	€/kWh	Strompreis		
217,66	m ²	Grundstücksfläche		

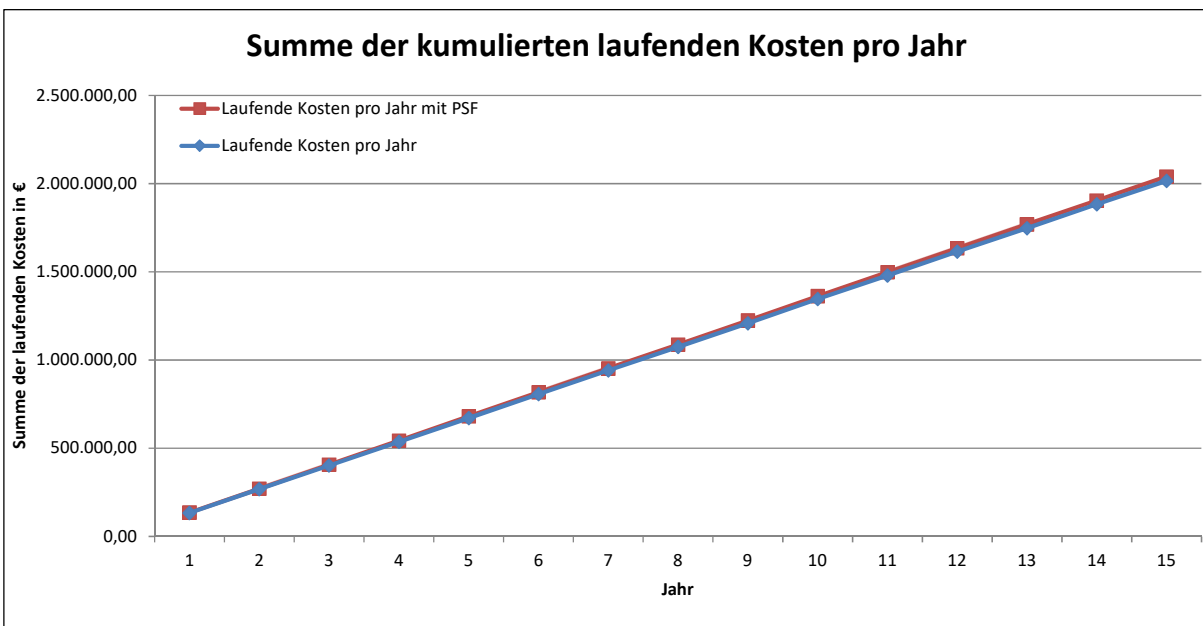
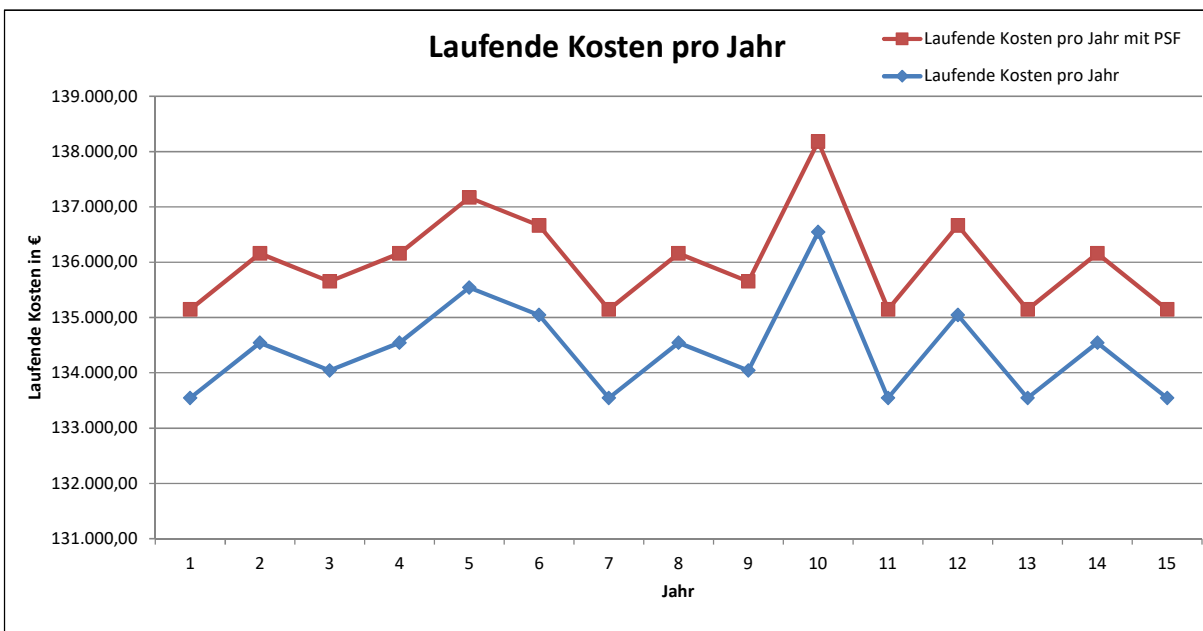
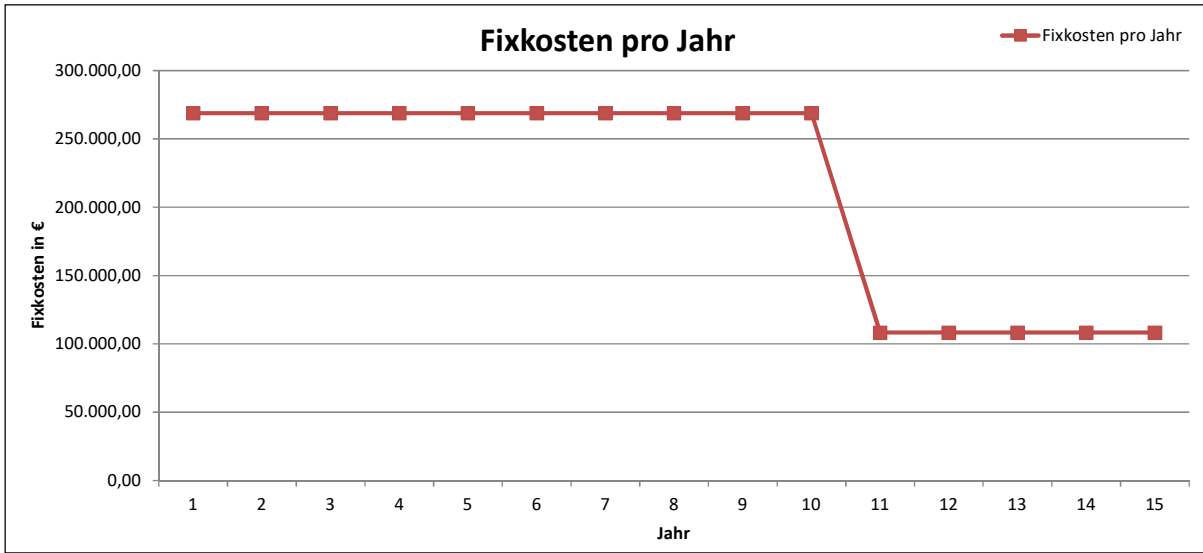
Gewählte Konfiguration	
Elektrolyse	
Elektrolyseart	PEM
Investitionskosten	5.000,00 €
Fixkosten	66.671,18 €/a
Laufende Kosten	85.493,68 €/a
ND-Speicher	
Speichertyp	Typ I
Investitionskosten	5.000,00 €
Fixkosten	20.602,41 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
ND-Verdichter	
Verdichterart	Kolben
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	32.174,71 €/a
Laufende Kosten	22.366,07 €/a
1. MD-Speicher	
Speichertyp	Typ I
Investitionskosten	5.000,00 €
Fixkosten	20.602,41 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
MD-Verdichter	
Verdichterart	Kolben
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	39.353,85 €/a
Laufende Kosten	18.529,79 €/a
2. MD-Speicher	
Speichertyp	Typ IV
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	35.393,59 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
HD-Verdichter	
Verdichterart	Kolben
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	0,00 €/a
Laufende Kosten	1.161,32 €/a
HD-Speicher	
Speichertyp	Typ II
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	25.358,39 €/a
Laufende Kosten	0,00 €/a
Kühlung & Dispenser	
Wärmetauscherart	Block
Investitionskosten	0,00 €
Fixkosten	28.681,45 €/a
Laufende Kosten	9.493,03 €/a

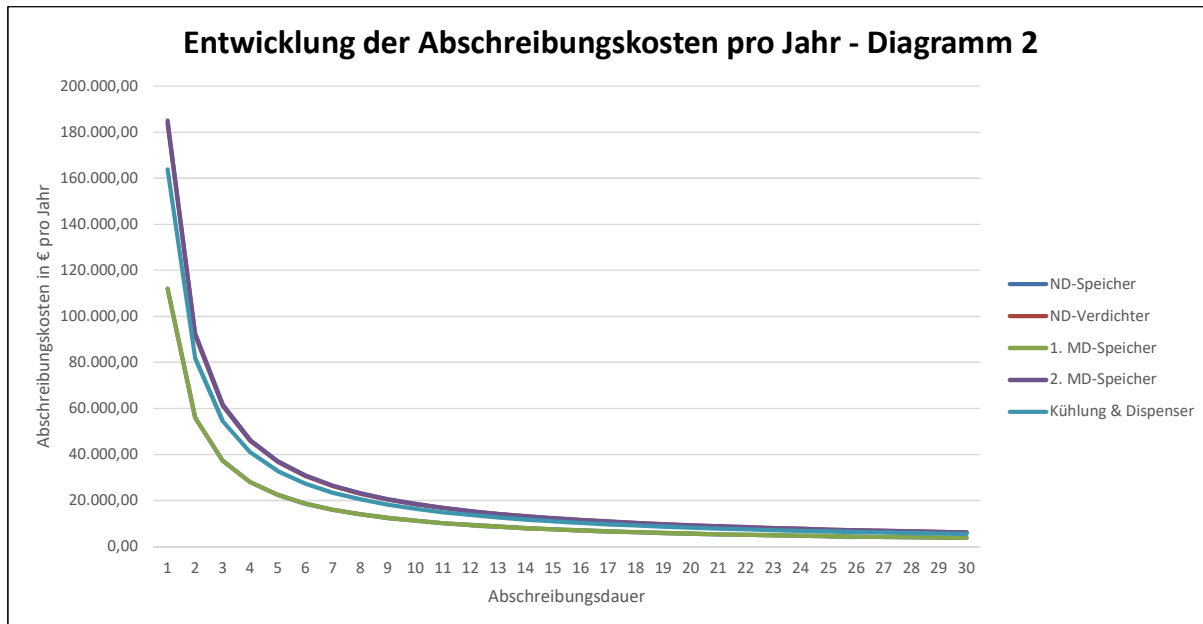
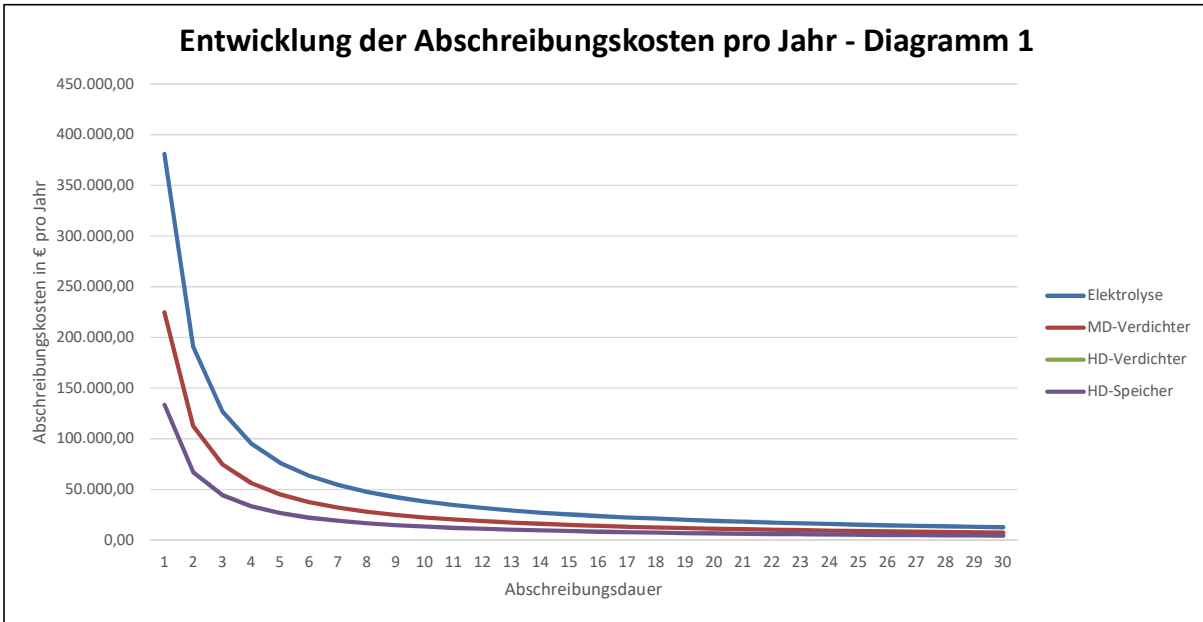
Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	50,44	€/ kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,66	€/ kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	30,64	€/ kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	19,13	€/ kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	0,00	€/ kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	50,44	€/ kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	194,19	€/ Bet.
Stromkosten pro Jahr	96.947,77	€/ a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	78,56	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	13,80	€/ kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	81,17	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	40,94	€/ kg H ₂

Komponente	Auslastung
Elektrolyse	91,32%
ND-Speicher	85,44%
ND-Verdichter	45,60%
1. MD-Speicher	62,09%
MD-Verdichter	42,08%
2. MD-Speicher	80,77%
HD-Verdichter	1,42%
HD-Speicher	31,38%
Kühlung & Dispenser	100,00%

Komponente	Kosten pro speicherbarem kg H ₂	Kosten pro nutzbarem kg H ₂
Elektrolyse	-	-
ND-Speicher	3.032,11 €	3.549,03 €
ND-Verdichter	-	-
1. MD-Speicher	587,62 €	946,34 €
MD-Verdichter	-	-
2. MD-Speicher	936,27 €	1.159,14 €
HD-Verdichter	-	-
HD-Speicher	1.710,69 €	5.451,96 €
Kühlung & Dispenser	-	-







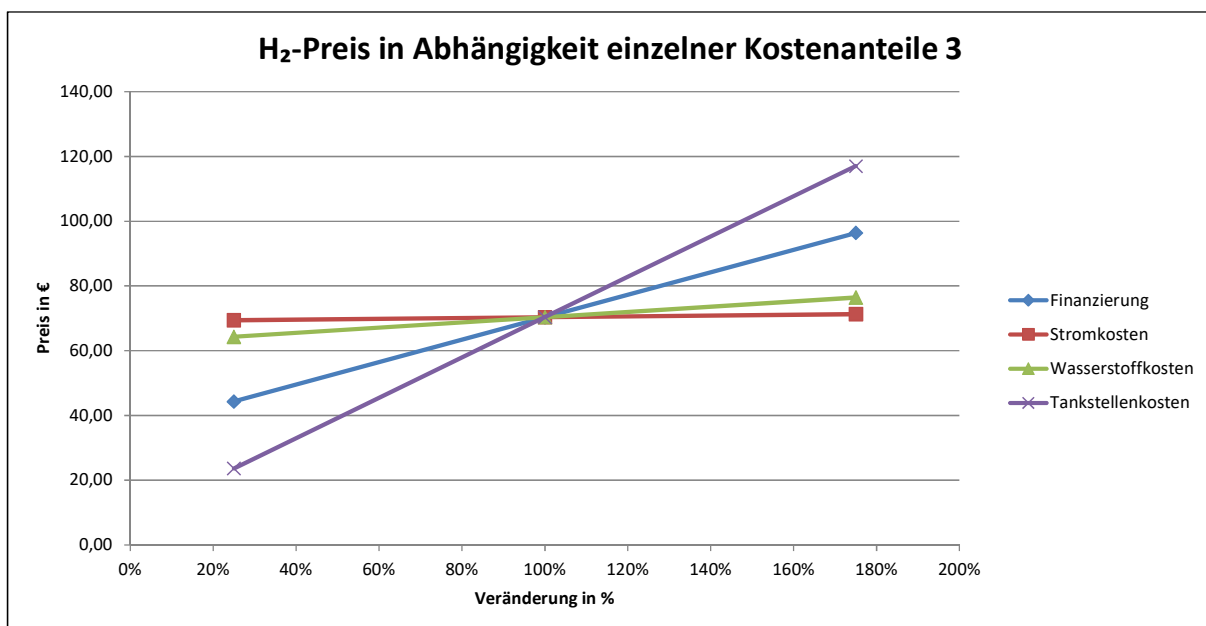
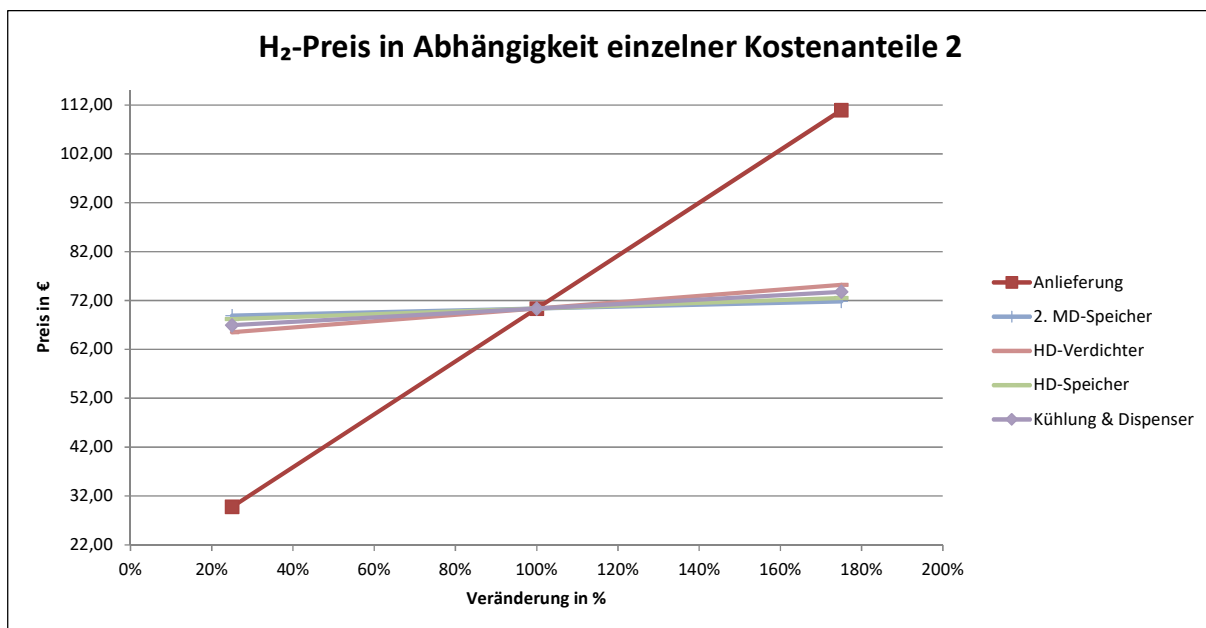
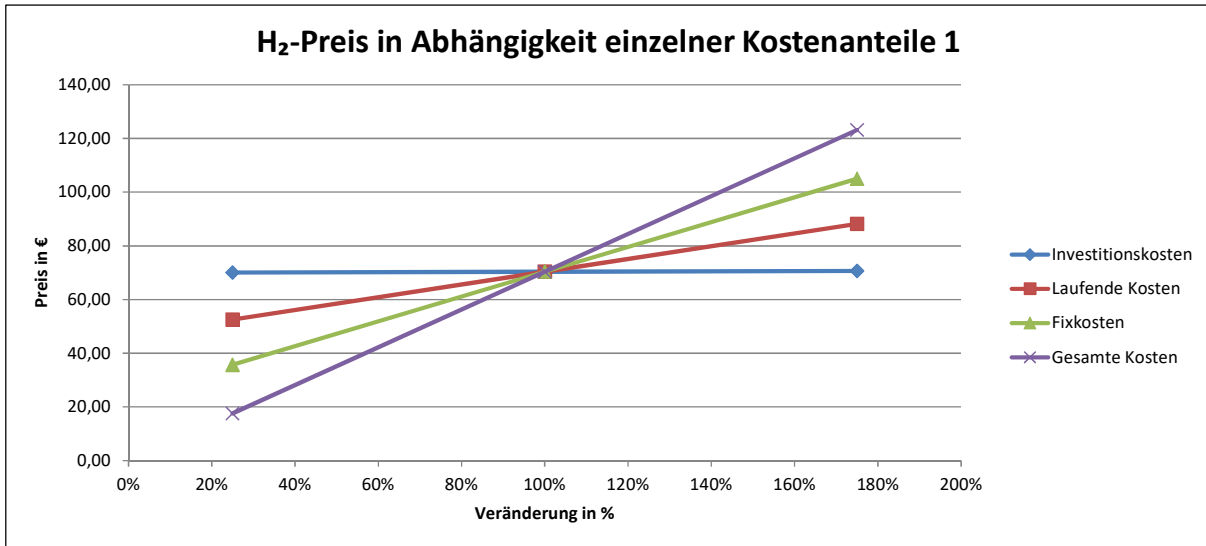
Buchhalterischer Restwert	
Elektrolyse	
ND-Speicher	28.000,75 €
ND-Verdichter	
1. MD-Speicher	28.000,75 €
MD-Verdichter	
2. MD-Speicher	
HD-Verdichter	
HD-Speicher	
Kühlung & Dispenser	

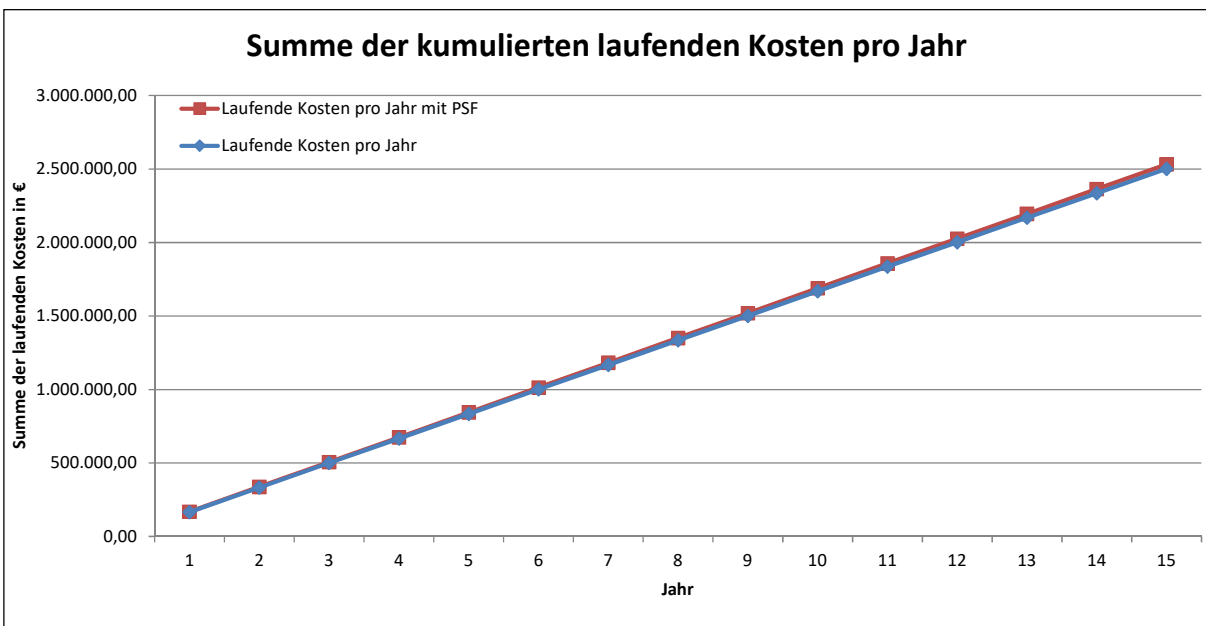
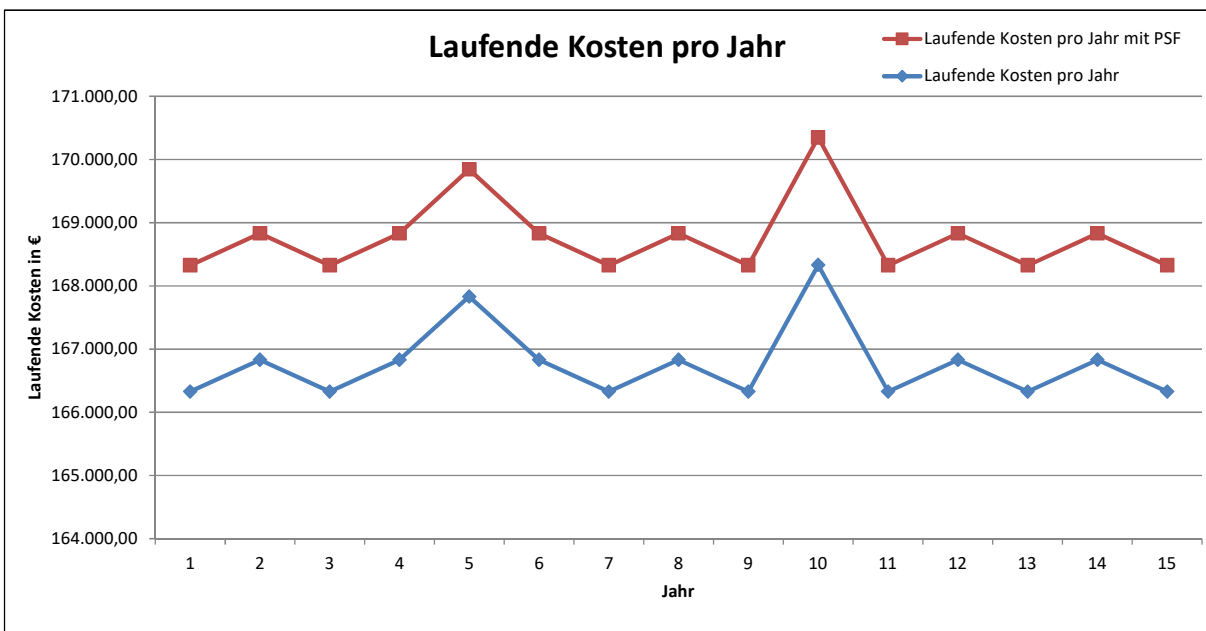
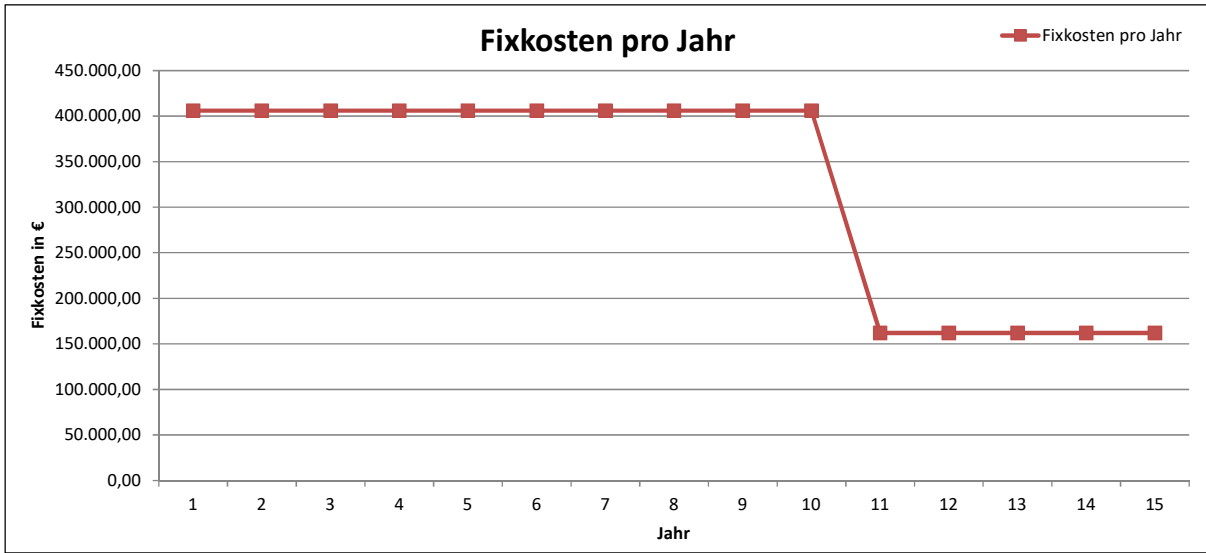
ANHANG 3: SIMULATIONSERGEBNISSE SZENARIO 3 „ANLIEFERUNG 500 BAR“

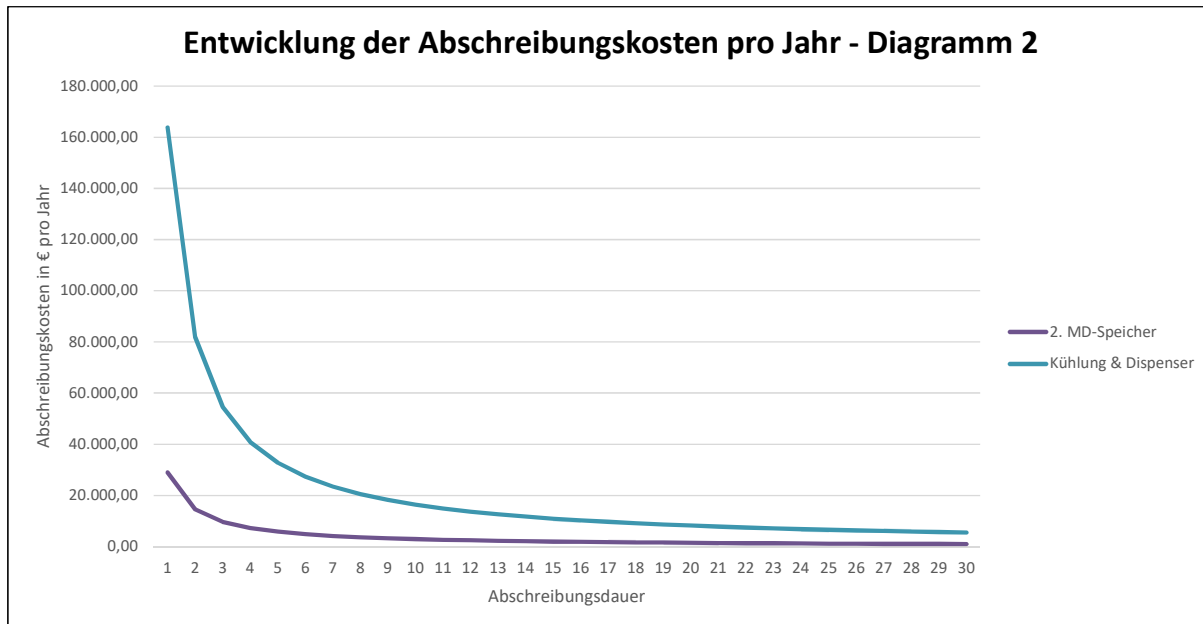
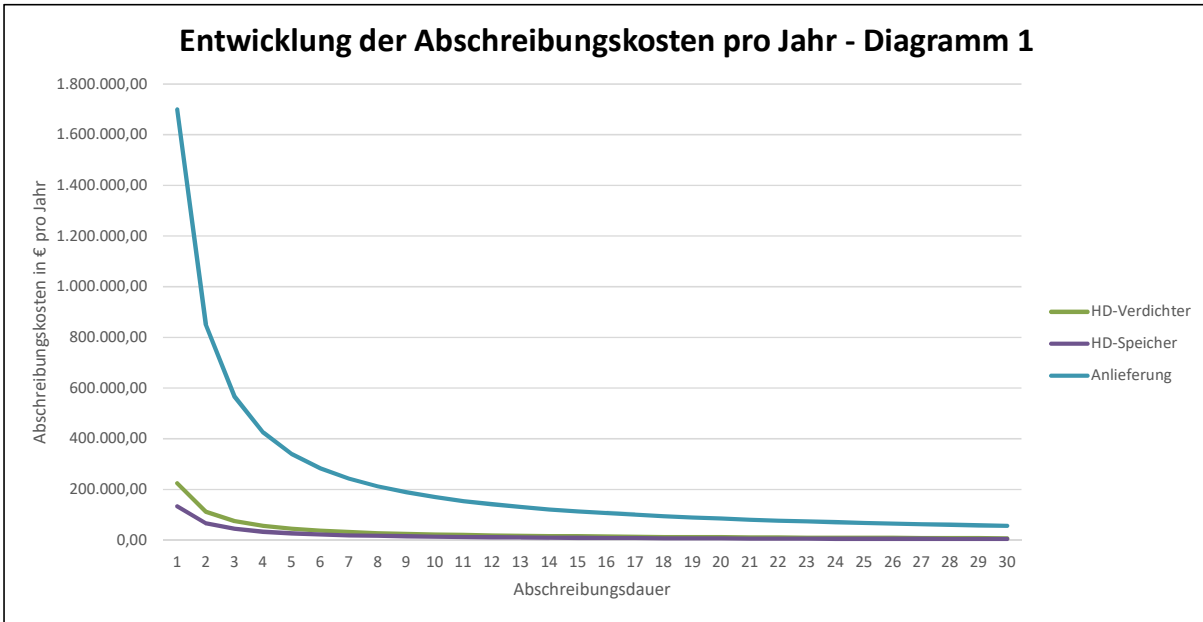
Ergebnisse		
Gesamte Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	70,36	€/ kg H ₂
Investitionskosten pro vertanktem kg Wasserstoff	0,41	€/ kg H ₂
Fixkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	46,21	€/ kg H ₂
Laufende Kosten pro vertanktem kg Wasserstoff	23,73	€/ kg H ₂
Wasserstoffkosten pro kg Wasserstoff	8,10	€/ kg H ₂
Tankstellenkosten pro kg Wasserstoff	62,26	€/ kg H ₂
Gesamte Kosten pro Betankung	270,87	€/ Bet.
Stromkosten pro Jahr	8.854,35	€/ a
Verbrauchte Leistung pro vertanktem kg Wasserstoff	7,17	kWh / kg H ₂
Stromkosten pro vertanktem kg Wasserstoff	1,26	€/ kg H ₂
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	86,50	%
Mehrkosten pro verkauftem kg Wasserstoff	60,86	€/ kg H ₂

Komponente	Auslastung
Anlieferung	0,44%
2. MD-Speicher	80,77%
HD-Verdichter	1,42%
HD-Speicher	31,38%
Kühlung & Dispenser	100,00%

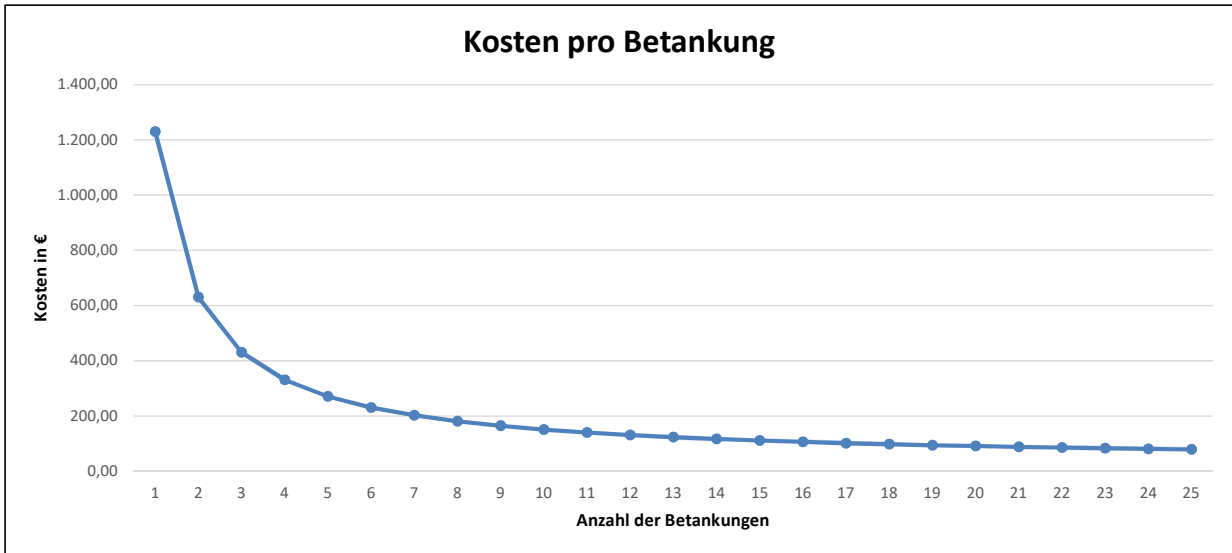
Komponente	Kosten pro speicherbarem kg H ₂	Kosten pro nutzbarem kg H ₂
Anlieferung	-	-
2. MD-Speicher	24,76 €	30,65 €
HD-Verdichter	-	-
HD-Speicher	1.710,69 €	5.451,96 €
Kühlung & Dispenser	-	-





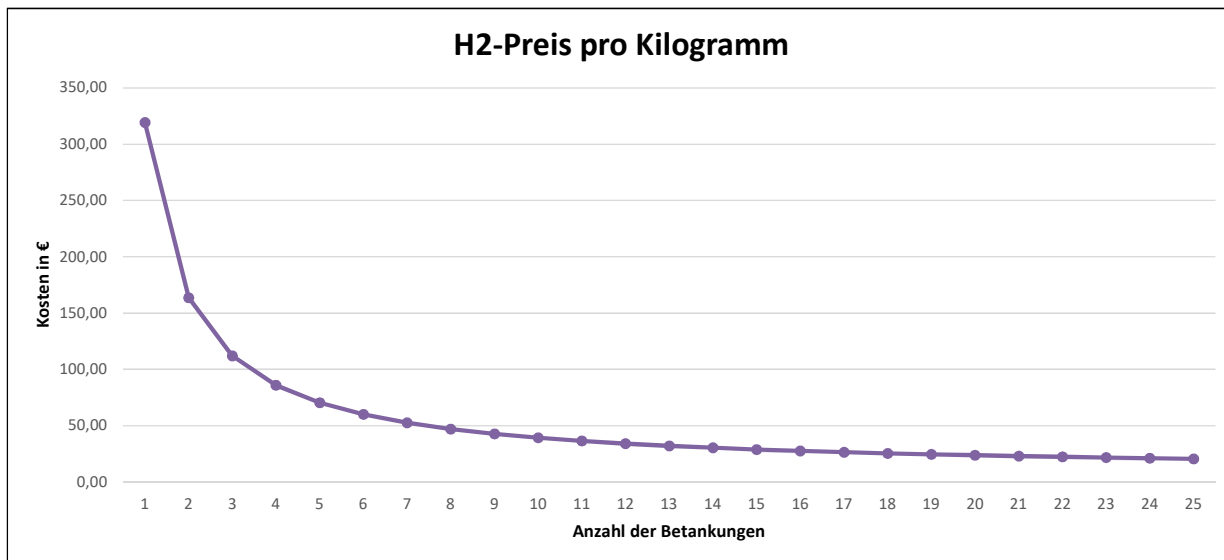


Buchhalterischer Restwert	
Anlieferung	
2. MD-Speicher	
HD-Verdichter	
HD-Speicher	
Kühlung & Dispenser	



Betankungen pro Tag	Kosten pro Betankung [€]
1	1.229,61
2	630,40
3	430,66
4	330,79
5	270,87
6	230,92
7	202,39
8	180,99
9	164,34
10	151,03
11	140,13
12	131,05
13	123,37
14	116,79
15	111,08
16	106,09
17	101,68
18	97,76
19	94,26
20	91,11
21	88,25
22	85,66
23	83,29
24	81,12
25	79,12

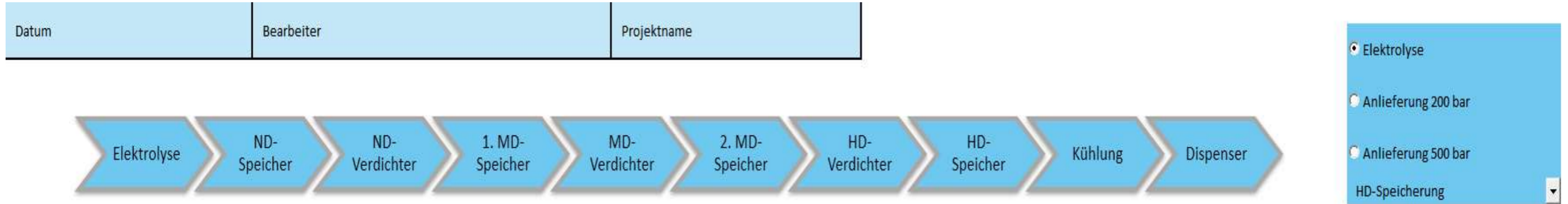
Ergebnisse		
Ges. vertankte Menge	105.393,75	kg H ₂ /15a
Ges. Betankungen	27.375	Bet./15a
Kosten pro Betankung	270,87	€/Bet.
Investitionskosten pro Bet.	1,57	€/Bet.
Laufende Kosten pro Bet.	91,38	€/Bet.
Fixkosten pro Betankung	177,92	€/Bet.



Betankungen pro Tag	H2-Preis pro kg [€]
1	319,38
2	163,74
3	111,86
4	85,92
5	70,36
6	59,98
7	52,57
8	47,01
9	42,69
10	39,23
11	36,40
12	34,04
13	32,04
14	30,33
15	28,85
16	27,56
17	26,41
18	25,39
19	24,48
20	23,66
21	22,92
22	22,25
23	21,63
24	21,07
25	20,55

Ergebnisse		
Ges. vertankte Menge	105.393,75	kg H ₂ /15a
Ges. Betankungen	27.375	Bet./15a
Kosten pro kg	70,36	€/kg H ₂
Investitionskosten pro kg	0,41	€/kg H ₂
Laufende Kosten pro kg	23,73	€/kg H ₂
Fixkosten pro kg	46,21	€/kg H ₂

ANHANG 4: ABBILDUNG ÜBERSICHT



Tankstellendaten			Rahmenbedingungen		
Name	Wert	Einheit	Name2	Wert3	Einheit4
Durchgeführte Betankungen		Bet. / d	Strompreis		€/kWh
∅-vertankte Menge		kg / Bet.	Grundstückspreis		€/m ²
Benötigte H ₂ -Menge		kg / d	Nutzungsdauer der Tankstelle		a
Produzierbare H ₂ -Menge		kg / d	Gewünschte Ausgabeeinheit		
Speicherbare H ₂ -Menge		kg	H ₂ -Abgabepreis		€/kg
Nutzbare H ₂ -Speichermenge		kg			

Abbildung 20: Screenshot des Tabellenblatts „Übersicht“, Quelle: Eigene Darstellung

ANHANG 5: ABBILDUNG ELEKTROLYSE

Rahmendaten		Platz- & Wartungsangaben		Zusammenfassung	
Elektrolyseart	PEM	Länge	[m]	Gewünschte Ausgabereinheit	€/a
Betriebsstunden	[h/a]	Breite	[m]	Investment oder Finanzierung	
Ausgangsdruck H ₂	[bar]	Höhe	[m]	Summe "Investitionskosten" [€]	
Volumenstrom	[m ³ /h]	Platzfaktor		Summe "Laufende Kosten" [€/a]	
Produzierbare H ₂ -Menge	[kg/d]	Flächenbedarf	[m ²]	Summe "Fixkosten" [€/a]	
Überlastfähigkeit	[%]	Gewicht	[kg]		
Überlaststunden	[h]	Wartungsintervall 1	[a]		
H ₂ -Qualität	[%]	Wartungsintervall 2	[a]		
		Wartungsintervall 3	[a]		
		Wartungsintervall 4	[a]		
		Wartungsintervall 5	[a]		

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Elektrolyseeinheit									
Gasverrohrung									
Genehmigung									
Aufstellung									
Inbetriebnahme									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Ø-Leistung Elektrolysesystem									
Anschlussleistung Elektrolysesystem									
Stromkosten Elektrolysesystem									
Wasserhärtegrad									
Wasserverbrauch									
Wasserkosten									
Wasserverbrauchskosten									
Abwassermenge									
Abwasserkosten									
Abwasserverbrauchskosten									
Ø-Leistung Gefrierschutz									
Laufzeit Gefrierschutz									
Stromkosten Gefrierschutz									
Druckluftkompressor									
Ø-Leistung Druckluftkompressor									
Stromkosten Druckluftkompressor									
Ø-Leistung sonstige Systeme									
Stromkosten sonstige Systeme									
Jährliche Wartung									
Stickstoffverbrauch									
Stickstoffbündel									
Stickstoffbündelmiete									
Formiergasverbrauch									
Formiergasbündel									
Formiergasbündelmiete									
Überwachung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 21: Screenshot des Tabellenblatts „Elektrolyse“, Quelle: Eigene Darstellung

ANHANG 6: ABBILDUNG ANLIEFERUNG

Rahmendaten			Platz- & Wartungsangaben			Trailernutzungsdaten			Zusammenfassung	
Benötigte H ₂ -Menge	[kg/a]		Länge	[m]		Distanz zur H ₂ -Quelle	[km]		Gewünschte Ausgabeinheit	€/a
Benötigte Lieferungen	[-/a]		Breite	[m]		Ø-Fahrgeschwindigkeit	[km/h]		Investment oder Finanzierung	
H ₂ -Liefertemperatur	[°C]		Höhe	[m]		Befüll- & Entladedauer	[h]		Summe "Investitionskosten"	[€]
H ₂ -Lieferdruck	[bar]		Platzfaktor			Dauer einer Fahrt	[h]		Summe "Laufende Kosten"	[€/a]
Min. Restdruck	[bar]		Platzbedarf	[m ²]		Gesamte Fahrtendauer	[h/a]		Summe "Fixkosten"	[€/a]
Speicherkapazität	[Liter]		Gewicht	[kg]		Gesamte Strecke	[km/a]			
Angelieferte H ₂ -Menge	[kg/Trailer]		Wartungsintervall 1	[a]						
Nutzbare H ₂ -Menge	[kg/Trailer]		Wartungsintervall 2	[a]						
Wasserstoffpreis	[€/kg]		Wartungsintervall 3	[a]						
			Wartungsintervall 4	[a]						
			Wartungsintervall 5	[a]						
						Zeile Einfügen			Zeile Löschen	

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Trailerkosten									
Anzahl Trailer									
Anschaffung Trailer									
Kosten pro Lieferung									
Lieferungskosten									
LKW-Miete									
Fahrergehalt									
Fahrerkosten									
Wasserstoffkosten									
Genehmigung									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Spritverbrauch									
Spritpreis									
Spritkosten									
Mautsatz									
Maut									
KFZ-Steuer									
Versicherung									
Jährliche Wartung									
Störungen									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 22: Screenshot des Tabellenblatts „Anlieferung“, Quelle: Eigene Darstellung

ANHANG 7: ABBILDUNG SPEICHER

Rahmendaten			Platzangaben		Zusammenfassung	
Flaschentyp			Länge [m]		Gewünschte Ausgabeeinheit	€/a
Max. zulässiger Betriebsdruck [bar]			Breite [m]		Investment oder Finanzierung	
Speicherdruck [bar]			Höhe [m]		Summe "Investitionskosten" [€]	
Min. Restdruck [bar]			Platzfaktor		Summe "Laufende Kosten" [€/a]	
Anzahl Speicherbündel			Flächenbedarf [m²]		Summe "Fixkosten" [€/a]	
Anzahl Flaschen pro Bündel			Gewicht pro Bündel [kg]			
Speicherbare H ₂ -Menge [kg]			Flascheninhalt [Liter]			
Nutzbare H ₂ -Menge [kg]						

Zeile Einfügen

Zeile Löschen

Allgemeine Informationen				Laufende Kosten in €/a		Fixkosten in €/a		Investitionskosten in €	
Bezeichnung	Kategorie	Kosten	Einheit	Name	Kosten2	Name3	Kosten3	Name2	Kosten4
Bündelkosten									
Anschaffung Bündel									
Gasverrohrung									
Genehmigung									
Aufstellung									
Spülungskosten pro Bündel									
Gesamtspülungskosten									
Abschreibungsdauer									
Restwert									
Abschreibung									
Finanzierungsdauer									
Zinssatz									
Finanzierung									
Prüffrist									
Prüfkosten pro Bündel									
Bitte Prüffrist eingeben									
Jährliche Wartung									
Sonstige Laufende Kosten									
Sonstige Fixkosten									
Sonstige Investments									

Abbildung 23: Screenshot der Tabellenblätter „Speicher“, Quelle: Eigene Darstellung

