



# **Masterthesis**

## **Potentialanalyse zur Entwicklung des Schweizer Wasserstoffmarktes in der Mobilität**

**Dozentin: Prof. Dr. Sabine Sulzer**  
**Diplomexperte: Dr. William Gizzi**

**Hochschule Luzern - Technik & Architektur**  
**Master of Science in Engineering, Business Engineering and Production**

**Horw, Hochschule Luzern – T&A**  
**21. Juni 2019**

## Abstract

---

The transport sector accounts for around 1/3 of Switzerland's CO<sub>2</sub> emissions and must be converted to sustainability: Hydrogen mobility is a solution. The market potential and the attractiveness of a market entry of hydrogen in road transportation is described here. The barriers to hydrogen mobility are: (a) implementation of infrastructure, (b) cost of hydrogen vehicles and (c) consumer acceptance. The most important drivers of hydrogen mobility are climate policy measures, energy security and entrepreneurship. Four megatrends are identified: Sustainability, urbanization, individualization and digitalization. Porters 5 forces analyze showed that the barriers to hydrogen mobility are high. The most important barriers to entry are: Capital requirements, switching costs and the limited number of available models. Competition is low in the early market development phase. Compared to the diesel trucks, the advantages of FC trucks are attractive, especially in urban operation. The total cost of ownership (TCO) has a very high decision value for trucks. The TCO of fuel cell (FC) trucks is expected to be in the same range as that of the internal combustion engine by 2030. Even slight cost reductions can lead to shifts in the market potential for hydrogen mobility. The market launch of FC-trucks is characterized by: (a) other optimal refueling locations (b) higher consumption (10 to 20 times). Analyses of the Causal Loop Diagram show, that no system variable exhibits critical behavior, the system develops relatively slowly. The influence of R&D on the FC-truck segment is particularly sensitive. This effect can be explained by the importance of the TCO for the purchase decision of a truck. It was shown, that the customer segments car and truck are influenced by different purchase decisions: for truck buyers it is the TCO and for car buyers the investment costs. **Infrastructure, competitiveness and customer acceptance** are the most important critical success factors. Hydrogen mobility is very attractive due to low-emission propulsion, low maintenance costs, short refueling times and long ranges. After successful implementation of the infrastructure and reduced costs through technical progress, competitiveness will be achieved.

## Abstract

---

Der Verkehrssektor steht für rund 1/3 der Schweizer CO<sub>2</sub>-Emissionen, er ist auf Nachhaltigkeit umzustellen: Wasserstoffmobilität ist ein Lösungsansatz. Das Marktpotential und die Attraktivität eines Markteintritts von Wasserstoff im Strassenverkehr wird hier methodisch beschrieben. Die Barrieren für Wasserstoffmobilität sind: (a) Die Schaffung der Infrastruktur, (b) Kosten der Wasserstofffahrzeuge und (c) Akzeptanz der Verbraucher. Die wichtigsten Treiber der Wasserstoffmobilität sind klimapolitische Massnahmen, Energiesicherheit und Unternehmertum. Vier Megatrends wurden identifiziert: Nachhaltigkeit, Urbanisierung, Individualisierung und Digitalisierung. Die Branchenstrukturanalyse zeigt, dass die Eintrittsbarrieren der Akteure zur Wasserstoffmobilität hoch sind. Die wichtigsten Eintrittsbarrieren sind: Kapitalbedarf, Wechselkosten und die begrenzte Anzahl verfügbarer Modelle. Der Wettbewerb ist in der frühen Marktentwicklungsphase gering. Gegenüber dem Diesel-LKW sind die Vorteile der Brennstoffzellen-LKW (FC-LKW) attraktiv, insbesondere im städtischen Betrieb. Die Total Cost of Ownership (TCO) haben einen sehr hohen Entscheidungswert für LKWs. Es wird erwartet, dass der TCO von FC-LKW bis ins Jahr 2030 in der gleichen Grössenordnung wie jener des Verbrennungsmotors liegt. Bereits leichte Kostensenkungen können zu Verschiebungen des Marktpotentials hin zur Wasserstoffmobilität führen. Die Markteinführung von FC-LKW charakterisiert sich durch: (a) andere optimale Betankungsorte (b) höheren Verbrauch (10- bis 20-fach). Analysen des Causal Loop Diagram (CLD) zeigen, dass keine Systemvariabel ein kritisches Verhalten aufweist. Der Einfluss von F&E auf das FC-LKW Segment zeigt ist sensitiv. Dieser Effekt kann mit der Bedeutung des TCO für die Kaufentscheidung eines LKWs erklärt werden. Es wurde gezeigt, dass die Kundensegmente PW und LKW von unterschiedlichen Kaufentscheidungen beeinflusst werden: für LKW-Käufer sind es die TCO und für PW-Käufer die Investitionskosten. **Infrastruktur, Wettbewerbsfähigkeit und Kundenakzeptanz** sind die wichtigsten kritischen Erfolgsfaktoren. Wasserstoffmobilität ist sehr attraktiv durch emissionsarmen Antrieb, geringe Wartungskosten, kurze Tankzeiten und hohe Reichweiten. Nach erfolgreicher Implementierung der Infrastruktur und gesenkten Kosten durch technischen Fortschritt wird Wettbewerbsfähigkeit erreicht.

## Vorwort

---

In der Schweiz wird ein relevanter Anteil an Endenergie – rund 1/3 – für den Verkehrssektor verwendet. Ebenfalls 1/3 beträgt auch der dadurch verursachte Anteil an Treibhausgasemissionen. Hohe Energieeffizienz und erneuerbare Energien tragen zur Verminderung der Emissionen bei, die durch die Verbrennung fossiler Energieträger verursacht werden.

Wir diskutieren heute in der Schweiz die Energiewende kontrovers. Auf internationaler Ebene haben im Jahr 2015 an der Weltklimakonferenz in Paris 196 Länder dieser Welt JA zu einem neuen Klimaabkommen gesagt.

Um die Diskussionen zu versachlichen und um das Klimaabkommen und die damit eingehenden Klimaziele umzusetzen, sind Arbeiten wie die vorliegende hilfreich und nützlich. Ich freue mich sehr, mit dieser Arbeit einen Beitrag, auch wenn er ganz klein ist, zu einer der ganz grossen Fragestellungen unserer Zeit leisten zu dürfen.

Die Steigerung der Energieeffizienz, die Reduktion des Energieverbrauchs und die optimale Nutzung von erneuerbarer Energie kann und soll unsere Antwort auf das Klimaproblem sein.

## Inhaltsverzeichnis

---

Abstract.....	2
Abstract.....	3
Vorwort.....	4
Inhaltsverzeichnis .....	5
Abbildungsverzeichnis .....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis .....	10
1 Einleitung .....	11
1.1 Ausgangssituation .....	11
1.2 Zielsetzung .....	11
1.3 Struktur der Arbeit .....	12
2 Methodik.....	13
2.1 Literaturrecherche .....	13
2.2 Methodik der Marktanalyse.....	13
2.3 Identifizieren von Barrieren und Treibern .....	13
2.4 Expertengespräche .....	14
2.5 Stakeholder Management.....	15
2.6 PEST-Analyse.....	16
2.7 Branchenstrukturanalyse.....	17
2.8 «Causal Loop Diagram» .....	18
2.9 Cross-Impact-Analyse.....	19
2.10 Erstellen der Sensitivitätsanalyse.....	20
2.11 SWOT - Analyse.....	21
3 Grundlagen .....	22
3.1 Begriffsdefinition .....	22
3.2 Grundlagen Wasserstoff.....	23
3.2.1 Die Geschichte des Wasserstoffs.....	23
3.2.2 Vorkommen und Stoffeigenschaften .....	24
3.3 Technische Grundlagen Wasserstoff .....	25
3.3.1 Erzeugung von Wasserstoff.....	25
3.3.2 Brennstoffzelle.....	27
3.3.3 Brennstoffzellen in der Fahrzeugtechnik.....	28
3.3.4 Weitere Anwendungen von Wasserstoff .....	32
3.3.5 Infrastruktur .....	33
3.3.6 Sicherheit in der Anwendung von Wasserstoff .....	36
3.4 Wasserstoffmarkt .....	37

3.4.1	Marktentwicklungsaktivitäten Schweiz.....	37
3.4.2	Marktentwicklungsaktivitäten weltweit.....	40
3.5	Staatliche Steuern und Abgaben .....	43
3.5.1	CO <sub>2</sub> - Emissionsvorschriften .....	43
3.5.2	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe .....	45
3.5.3	Weitere Abgaben und Steuern .....	45
3.6	The Automotive Deployment Options Projection Tool.....	46
3.6.1	Kraftstoffpreis.....	47
3.6.2	Technologische Entwicklung.....	47
4	Potentialanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität.....	49
4.1	Analogien und Erkenntnisse aus dem Erdgasfahrzeugmarkt.....	49
4.1.1	Wege zur Entwicklung eines Erdgas-Fahrzeugmarktes .....	49
4.1.2	Erfahrungen mit LNG als Kraftstoff.....	53
4.2	Barrieren des Wasserstoffmobilität.....	53
4.3	Treiber der Wasserstoffmobilität .....	56
4.4	Stakeholder Analyse .....	57
4.4.1	Stakeholder-Beschreibungen .....	57
4.4.2	Stakeholder Klassifizierung.....	61
4.5	PEST-Analyse der Automobilindustrie .....	63
4.5.1	Politische Rahmenbedingungen.....	63
4.5.2	Wirtschaftliche Rahmenbedingungen.....	64
4.5.3	Soziale Bedingungen .....	65
4.5.4	Technologische Bedingungen.....	66
4.6	Branchenstrukturanalyse der Wasserstoffmobilität .....	68
4.6.1	Eintrittsbarrieren der Wasserstoffmobilität .....	68
4.6.2	Rivalitätsgrad der Wasserstoffmobilität .....	69
4.6.3	Bedrohungspotenziale durch Substitutionsprodukte .....	70
4.6.4	Verhandlungsstärke der Abnehmer .....	71
4.6.5	Verhandlungsstärke von Lieferanten.....	72
4.7	Markteinführung durch den Schwerverkehr .....	72
4.8	SWOT-Analyse.....	76
5	Systemanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität .....	79
5.1	Systembeschreibung der Wasserstoffmobilität Schweiz .....	79
5.2	Cross-Impact-Analyse der Wasserstoffmobilität Schweiz .....	82
5.3	Sensitivitätsanalyse der Wasserstoffmobilität .....	83
5.3.1	Bestimmung der Baseline .....	83
5.3.2	Sensitivitätsanalyse der Szenarien.....	84
6	Ergebnisse.....	91

6.1	Erkenntnisse aus dem Erdgasfahrzeugmarkt .....	91
6.2	Stakeholderanalyse.....	92
6.3	Treiber und Barrieren.....	92
6.4	Schlussfolgerung der PEST-Analyse .....	93
6.5	Ergebnisse der Branchenstrukturanalyse .....	94
6.6	Erkenntnisse zur Markteinführung im Schwerverkehr .....	95
6.7	Resultate aus der SWOT-Analyse.....	96
6.8	Ergebnisse der Systemanalyse der Wasserstoffmobilität.....	97
6.9	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse .....	97
6.10	Die kritischen Erfolgsfaktoren der Wasserstoffmobilität .....	99
7	Diskussion .....	101
7.1	Diskussion der US-Marktzahlen .....	101
7.2	Diskussion von Marktentwicklungsprognosen .....	102
7.3	Diskussion von weiteren Einflüssen auf Marktsysteme .....	102
7.4	Diskussion der Abgrenzung «Mobilität» .....	103
8	Zusammenfassung, Schlussbetrachtung und Ausblick.....	104
8.1	Zusammenfassung.....	104
8.2	Empfehlungen an das Unternehmen .....	107
8.3	8.3 Zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	107
9	Literaturverzeichnis.....	9-I
10	Anhang .....	10-X

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1: Beispiel CLD .....	18
Abbildung 2: Verschiedene Arten von Wasserelektrolyse-Technologien .....	26
Abbildung 3: Dominanter Brennstoffzellenantrieb (links) und Range Extender Antrieb (rechts) .....	29
Abbildung 4: TRL von Brennstoffzellenanwendungen .....	33
Abbildung 5: Marktentwicklungsaktivitäten .....	40
Abbildung 6: Angekündigte Ziele, Visionen und Projekte in Zahlen .....	43
Abbildung 7: Steuersätze gemäss Mineralölsteuerverordnung .....	46
Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der fünf Fallstudien.....	52
Abbildung 9: Darstellung der Stakeholderunterteilung.....	58
Abbildung 10: Stakeholder Matrix .....	62
Abbildung 11: Analyse der Stakeholderposition.....	63
Abbildung 12: CLD Wasserstoffmobilität Schweiz.....	80
Abbildung 13: Social Behavioural Norm .....	81
Abbildung 14: Cross-Impact-Analyse der Wasserstoffmobilität Schweiz.....	82
Abbildung 15: Entwicklung der für FCV relevante F&E .....	84
Abbildung 16: Darstellung der Baseline .....	84
Abbildung 17: Bedeutung der sensitiven Änderung von Verkaufszahlen .....	85
Abbildung 18: Entwicklung der Technologieszenarien (Baseline gepunktet).....	86
Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse Technologieszenarien .....	87
Abbildung 20: Entwicklung der Ölpreisszenarien .....	88
Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse Ölpreisszenarien .....	89
Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse Wasserstoffpreis .....	90
Abbildung 23: «Five Forces» der Wasserstoffmobilität .....	95
Abbildung 24: Sensitivitätsvergleich USA und Schweiz.....	101

## Tabellenverzeichnis

---

---

Tabelle 1: Definitionen der Stakeholderposition.....	16
Tabelle 2: Vergleich Elektrolysen .....	26
Tabelle 3: Eigenschaften von Brennstoffzellen.....	28
Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Antriebstechnologien.....	30
Tabelle 5: Vergleich ausgewählter FCV .....	31
Tabelle 6: Marktentwicklung USA und Kalifornien .....	41
Tabelle 7: Übersicht der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe.....	45
Tabelle 8: Vergleichs- und Beispielrechnung LSVA .....	45
Tabelle 9: Zusammenstellung der Erkenntnisse aus den Fallstudien.....	52
Tabelle 10: SWOT-Analyse (Stärken & Schwächen).....	76
Tabelle 11: SWOT-Analyse (Chancen & Risiken) .....	77
Tabelle 12: Endogene und exogene Modellvariablen .....	79
Tabelle 13: Übersicht der NGV -Treiber und -Barrieren .....	91

## Abkürzungsverzeichnis

---

°C	Grad Celsius
a	Jahr
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEV	Batteriebetriebenes Fahrzeuge
BFE	Bundesamt für Energie
BKW	Bernische Kraftwerke
bzw.	Beziehungsweise
CHF	Schweizer Franken
CLD	Causal Loop Diagram
CNG	Komprimiertes Erdgas
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
d.h.	das heisst
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
FC	Brennstoffzelle
FCV	Brennstoffzellenfahrzeug (PW & LKW)
g/s	Gramm pro Sekunde
GWh	Gigawattstunden
HEV	Hybrides Elektrofahrzeug
HRS	Wasserstofftankstelle
HSLU	Hochschule Luzern
ICE	Konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
kWp	Kilowatt peak
l	Liter
LKW	Lastkraftwagen
LNF	leichte Nutzfahrzeuge
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
Mia.	Milliarde
Mio.	Millionen
MJ	Mega Joul
MSE	Master of Science in Engineering
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
NGV	Erdgasfahrzeuge
OEM	Original Equipment Manufacturer
PJ	Peta Joul
PW	Personenwagen
Sdt	Stunden
t	Tonnen
TCO	Total Cost of Ownership
TJ	Tera Joul
vgl.	Vergleiche
z.B.	zum Beispiel

# 1 Einleitung

---

Die Energiestrategie 2050 des Bundes sieht unter anderem die Erhöhung der Anwendung erneuerbarer Energien vor. Im Stromsektor sollen vor allem erneuerbare Energien den geplanten Rückbau der schweizerischen Kernkraftwerke substituieren. Neue erneuerbare Energien wie Sonnen- und Windenergie sind jedoch stark witterungsabhängig und können zeitlich nicht beliebig der Stromnachfrage angepasst werden. Daher stellt die Speicherung von überschüssigem Strom ein wichtiger Pfeiler beim Ausbau von erneuerbaren Energien dar.

Eine Möglichkeit zur Speicherung von Strom ist «Power-to-Gas» (PtG). Wasser wird mit elektrischem Strom durch Elektrolyse chemisch in Wasserstoff umgewandelt. Der durch die Elektrolyse erzeugte Wasserstoff kann sektorübergreifend verwendet werden. Unter Sektorkopplung wird die energetische Vernetzung der Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr und Industrie) verstanden. Falls der bei der Elektrolyse benötigte Strom aus erneuerbaren Quellen stammt, steht damit ein CO<sub>2</sub>-armes, energiereiches Gas zur Verfügung. Das Verfahren ist technisch erprobt und funktioniert weitgehend zuverlässig. Im Zusammenhang mit der Energiewende wird PtG insbesondere von der Schweizer Gas- und der Strombranche als Schlüsseltechnologie bezeichnet.

Wasserstoff hat die vorteilhafte Charaktereigenschaft, dass es in vier verschiedenen Absatzmärkten eingesetzt werden kann: der Wärmeproduktion, Stromerzeugung und -Speicherung, der Industrie und der Mobilität. In dieser Arbeit soll die Mobilität als einer der vier potentiellen Absatzmärkte von Wasserstoff analysiert werden. Dabei sollen vertieft die Treiber und Barrieren für dessen Marktentwicklungen identifiziert und daraus die kritischen Erfolgsfaktoren abgeleitet werden. Daraus resultierend sollen Sensitivitäten von möglichen Marktentwicklungsszenarien für den entsprechenden Absatzmarkt quantifiziert werden.

## 1.1 Ausgangssituation

---

Der Verkehrssektor ist für rund 1/3 der Schweizer CO<sub>2</sub>-Emissionen und 1/3 des Schweizer Endenergieverbrauchs verantwortlich (BFE, 2018). Obwohl in anderen Sektoren wie Haushalten oder Industrie in den nächsten Jahren Emissionsreduktionen erwartet werden, wird in dieser Zeit kein Rückgang im Verkehrssektor erwartet (INFRAS, 2016). Ziel ist es dennoch, auch im Rahmen der Schweizer Energiestrategie 2050, den Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors zu reduzieren, dies erfordert eine breite Transformation des Mobilitätssystems. (Hoppe & Michl, 2017)

Durch die «Transformation des Schweizer Mobilitätssystems» soll seine Entwicklung aktiv beeinflusst werden. Das System kann und muss in der Schweiz auf Nachhaltigkeit umgestellt werden, um die Energieziele zu erreichen. Ein potentieller Lösungsansatz ist die Wasserstoffmobilität.

## 1.2 Zielsetzung

---

Ziel dieser Arbeit ist, durch quantifiziertes und qualifiziertes Beschreiben des Marktpotentials und der Marktmechanismen des Wasserstoffsektors in der Mobilität, den Industriepartner Axpo Power AG in ihrer Abschätzung der Attraktivität eines Markteintrittes hinsichtlich PtG zu unterstützen.

Um die Marktentwicklung für einen relevanten Absatz für Wasserstoff in der Schweiz zu beschreiben, werden folgende Forschungsthemen bei der Master Thesis adressiert:

- Darstellen der politischen und ökonomischen Marktsituation
- Welche Akteure sind beteiligt?
- Welche Barrieren und Treiber beeinflussen die Marktentwicklung?

- Welche kritischen Erfolgsfaktoren resultieren daraus?
- Wie kann ein Ursache-Wirkungsdiagramm (CLD) beschrieben werden? Welche ähnlichen Märkte können für diese Beschreibung beigezogen werden?
- Wie können die Beziehungen quantitativ oder qualitativ beschrieben werden?
- Welche Unsicherheiten sind im quantitativen Modell zu berücksichtigen (Sensitivitätsanalyse)?
- Wie können diese Unsicherheiten abgeschätzt werden und welchen Einfluss haben diese bei der Marktentwicklung?

### **1.3 Struktur der Arbeit**

---

Die Arbeit ist gemäss dem Eulerskript (Ineichen, 2010) strukturiert. Zuerst wird das gewählte Vorgehen zur Erarbeitung von Lösungen im Kapitel 2, Methodik erklärt. Das Grundlagenkapitel 3 vermittelt die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche diverser Forschungsarbeiten und den aktuellen Stand der Technik. Der aktuelle Stand des Wissens, auf dem die Arbeit aufbaut, soll dargelegt werden. In diesem Kapitel werden auch alle für die Arbeit relevanten Definitionen festgehalten. Im diesem Kapitel sind alle Grundlagen zu Wasserstoff, der Wasserstofftechnik und dem Wasserstoffmarkt zu finden

Im Kapitel 4 werden die zur Beantwortung der Zielsetzung erforderlichen Markt- und Potentialanalysen durchgeführt und erklärt. Die quantitativen und qualitativen Beschreibungen und Analysen des Marktmodells, sowie die entsprechenden Unsicherheiten werden im Kapitel 5 separat besprochen. Mittels verschieden Tabellen und Abbildungen soll die hohe Nachvollziehbarkeit der Berechnungen gewährleistet werden. Sie wurden nach der Theorie von «The Grammar of Graphics» (Wilkinson, 2005) in Schwarz/ Weiss und simplifizierter Darstellung erstellt. Im Kapitel 6 Ergebnisse werden die Ergebnisse der Arbeit aufgeführt und kommentiert. Die Ergebnisse und Auswirkungen werden anschliessend im Kapitel 7 Diskussion diskutiert. Schliesslich wird eine Schlussbetrachtung, Kapitel 8, mit Ausblick verfasst, sie enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse, Empfehlungen und einen Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf. Der Quellennachweis wurde einheitlich nach Formatvorlage APA (American Psychological Assoziation) erstellt und ist im Kapitel 9 zu finden. Der Anhang schliesst den Text ab.

## 2 Methodik

---

Im Kapitel Methodik wird das Vorgehen und die zugrundeliegenden Methoden dargestellt. Allgemein bekannte und in der Literatur gut dokumentierte Methoden werden bevorzugt angewendet.

### 2.1 Literaturrecherche

---

Um einen Überblick über das Thema zu erhalten, wurde als erstes eine thematische Recherche im Internet durchgeführt. Aus dem Internet abrufbare, wissenschaftliche Arbeiten geben einen guten Einblick in die verwendeten Quellen und in weitere Sekundärliteratur, um das Thema inhaltlich zu durchdringen. Als Ergebnis dieser ersten Recherche konnten verschiedene Studien zum Thema der zu untersuchenden ökologischen, ökonomischen und / oder politischen Aspekte gefunden und studiert werden, auch verschiedene methodische Ansätze wurden gefunden. Zusätzlich wurden Gespräche mit verschiedenen Dozierenden an der HSLU und des Masterprogramms geführt. Dieses Vorgehen half, zusätzliche Informationsquellen und Literatur zu finden. In einem weiteren Schritt wurde die Sekundärliteratur studiert. Bei der Recherche wurde ein besonderes Augenmerk auf Quellen aus relevanten Bundesämtern und auf Fachbücher aus der Bibliothek gelegt. Zu den wichtigen Studien wurden Quellverweise notiert und kurze Zusammenfassungen erstellt.

### 2.2 Methodik der Marktanalgie

---

Das Wort «Analogie» stammt aus dem Griechischen und bedeutet Entsprechung, Ähnlichkeit, Gleichheit von Verhältnissen (Duden, 2019). Damit ist ein kognitiver Prozess der Übertragung von Informationen oder Bedeutungen von einem bestimmten Subjekt auf ein anderes gemeint (Liddell & Scott, 1940). Im Rahmen dieser Arbeit werden Analogien zwischen Märkten gezogen, um aus anderen, vergleichbaren Märkten Erfahrungen zu gewinnen, die für die Wasserstoffmobilität von Bedeutung sein könnten. Da sich die Wasserstoffmobilität in einem frühen Stadium der Marktdurchdringung befindet, sind noch viele Einflussgrößen inaktiv, die auf die Wasserstoffmobilität einwirken werden oder könnten. Ziel der Marktanalgie ist, einen Markt zu identifizieren, der vergleichbare Strukturen, Barrieren oder Treiber besitzt wie Wasserstoffmobilität. Anschliessend soll die Entwicklung dieses Marktes genau betrachtet und analysiert werden, wichtige Treiber und bedeutende Barrieren sollen erkannt und besprochen werden. Ziel dieser Methode ist, von anderen Märkten zu lernen und festzustellen, wo und warum ein vergleichbarer Markt Probleme in der Marktentwicklung hatte oder wovon er profitieren konnte. Bedeutende Problematiken in der Marktentwicklung müssen hervorgehoben und thematisiert werden, damit diese in der Entwicklung des Wasserstoffmarktes vermieden werden können.

### 2.3 Identifizieren von Barrieren und Treibern

---

Marktbarrieren haben in der Marktstruktur eine wichtige Rolle, sie sind Aspekte, die es erschweren oder sogar verunmöglichen, als Anbieter eine wettbewerbsfähige Position in einem Markt zu erlangen. Typischen Beispiele für Barrieren sind oftmals begrenzte Aufnahmefähigkeit des Handels, Bindungen von Kunden an andere Produkte oder Anbieter, sowie hoher Kapitalbedarf. (Kleinaltenkamp & Kuß, 2011) Speziell zur Einschätzung des Risikos eines Markteintritts sind die Barrieren zu untersuchen (Buchholz, 2009).

Markttreiber sind die zugrundeliegenden Kräfte, die dem Verbraucher Anreize geben, Produkte zu kaufen und für Dienstleistungen zu bezahlen. Es sind Kräfte, die Märkte entwickeln und wachsen lassen. Die häufigsten Markttreiber sind die Nachfrage und die Regierungspolitik. Für ein Unternehmen ist es von Vorteil, potentielle und bestehende Markttreiber zu kennen. (IAC Publishing, 2019)

Beide, die Treiber und Barrieren, werden in dieser Arbeit in drei Schritten identifiziert. Zuerst werden durch eine allgemeine Literaturrecherche mögliche Treiber identifiziert. Die Methodik Literaturrecherche ist im Kapitel 2.1 definiert. Dadurch sollen mögliche Treiber, wenn möglich spezifische in Bezug auf die Wasserstoffmobilität, erkannt werden. In einem dritten Schritt sollen weitere Treiber und Barrieren durch die Marktalogie (vgl. Kapitel 2.2) erkannt werden und oder in Relation gesetzt werden. Im letzten Schritt werden die Antworten der Experten (vgl. Kapitel 2.4) auf die Fragen nach Treibern und Barrieren dargestellt.

## 2.4 Expertengespräche

---

Fachleute über ihre Erfahrungen, Einsichten und Meinungen berichten zu lassen, ist eine alte und bewährte Methodik, um an Informationen aus mehreren und kompetenten Quellen zu kommen und das auch über themenspezifische Zukunftsvorstellungen. Freie und unstrukturierte Experteninterviews können interessante Aspekte aufdecken, eine gewisse Strukturierung hingegen erleichtert die Aufgabe. (Berekoven, Eckert, & Ellenrieder, 2009)

Die Befragung der Experten wird in Form eines freien Interviews (auch Exploration oder qualitatives Interview genannt) durchgeführt. Das bedeutet, es soll eine persönliche und mündliche Befragung vorbereitet werden, ohne vorformulierte Fragen. Der Interviewer leitet dabei die Befragungsperson zum angestrebten Thema hin und lenkt den Gesprächsablauf nur so weit, wie dies notwendig ist, um dem Befragten die Antworten so leicht wie möglich zu machen. Das Ziel soll ein scheinbar zwangloses Gespräch sein, bei dem die wichtigsten Fragen geklärt werden. (Berekoven, Eckert, & Ellenrieder, 2009) Um sicherzustellen, dass die wichtigsten Fragen im jeweiligen Interview abgedeckt werden, wird für jedes Gespräch ein individueller Leitfaden erstellt, der auch als Orientierung dienen soll.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Experten aus Forschung, Privatindustrie und von Verbänden befragt. Es handelt sich dabei um elf Experten, die jeweils «System Dynamics -> Wasserstoff-, Mobilität- oder Naturgasexperten sind. Nachfolgend ist eine Auflistung (nicht geordnet) der Experten zu finden, inklusive ihrer Fachkompetenzen in Bezug auf die Befragung im Rahmen dieser Arbeit.

- **Bach Christian**  
Empa, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme  
Fachkompetenz: Fahrzeugantriebssysteme
- **Bauer Christian**  
Paul Scherrer Institut, Researcher  
Fachkompetenz: Life Cycle Assessment of energy and transport systems
- **Dr. Bosshardt Mathias**  
Dissertation über Fleet Dynamics  
Fachkompetenz: Fleet Dynamics & Causal Loop Diagram
- **Fröhlich Patrik**  
Celeroton AG, Sales Manager  
Fachkompetenz: Zulieferer Automobilindustrie
- **Graf Michael**  
Post Company Cars AG, Produktmanager  
Fachkompetenz: Elektrofahrzeuge
- **Holdener Fridolin**  
Shirokuma GmbH / Gründungsmitglied & VR H2 Energy AG  
Fachkompetenz: Wasserstoff-als-Energieträger
- **Prof. Dr. Imboden Christoph**

Hochschule Luzern, CC Power Economy  
Fachkompetenz: «Causal Loop Diagram»

- **Dr. Oberholzer Stefan**  
Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Wasserstoff & Brennstoffzellen  
Fachkompetenz: Fachspezialist Energieforschung
- **Vock Hansjörg**  
H2 Energy, Vizepräsident des Verwaltungsrats  
Fachkompetenz: Wasserstoffmobilität
- **Werfeli Andy**  
Verband der Schweizerischen Gasindustrie  
Fachkompetenz: Erdgasfahrzeuge
- **Wüest Eveline**  
PostAuto, Projektleiterin alternative Fahrzeugtechnik  
Fachkompetenz: Beschaffung und Flottenmanagement

## 2.5 Stakeholder Management

---

Projekte haben Auswirkungen auf zahlreiche interne und externe Interessengruppen. Diese Interessen- oder Anspruchsgruppen, die vom einem Unternehmen betroffen sind und diesem gegenüber ein gewisses Interesse verfolgen, werden als Stakeholder bezeichnet. Es ist wichtig, diese Stakeholder zu ermitteln und deren Haltung gegenüber dem Projekt zu bestimmen, damit mit gezielten Massnahmen die betroffenen Akteure rechtzeitig in die Planungen einbezogen werden können. (Weiland, 2012)

Grosse Projekte greifen oft tief in Strukturen, Prozesse und Verantwortlichkeiten interner und externer Interessensgruppen ein. Dies kann zu massiven Widerständen bei den betroffenen Gruppen führen. Für ein effektives Projektmanagement ist es daher unerlässlich, die Interessen und die Macht der wichtigsten Stakeholder zu kennen, um adäquat mit ihnen umgehen zu können. Mit einer Stakeholder-Analyse werden die wichtigsten Interessensgruppen bei einem Projekt identifiziert sowie deren Interessen und ihre Macht in Bezug auf das Projekt beschrieben. Auf Grund dieser Analyse kann dann eine sinnvolle Vorgehensweise entwickelt werden, um mit den verschiedenen Interessen der Stakeholder in Bezug auf das Projekt umzugehen. (Weiland, 2012)

Eine wichtige Voraussetzung für das Erstellen einer Stakeholder-Analyse ist eine gute Kenntnis der involvierten Akteure. Einschätzungen von den Stakeholdern und gut vernetzten Organisationsmitgliedern ist unerlässlich und wird für diese Arbeit mit den Expertengesprächen abgedeckt. Mittels der so erarbeiteten Stakeholder-Analysen sollen die relevante Stakeholder für ein bestimmtes technologisches oder politisches Feld identifiziert werden, um anschliessend ihre Interessen und ihre relative Macht zu bestimmen. Die folgenden Punkte sollen so geklärt werden (Andreasen & Sovacool, 2014):

- Identifizierung relevanter Interessensgruppen, die zur Analyse einbezogen werden sollen.
- Bewertung der Ziele, Interessen und Überzeugungen der einzelnen Interessensgruppen
- Charakterisierung der Stakeholder-Ressourcen
- Erläuterung der Strategien und Orte, die Stakeholder nutzen, um ihre Ziele zu erreichen

Der Zweck der auf diese Weise angewandten kritischen Stakeholder-Analyse ist es, eine effektivere Koordination der Stakeholder-Interaktionen zu ermöglichen und die Grundlage zu schaffen, um zielgerichtet Massnahmen vorzubereiten und abzuleiten, mit denen man die Stakeholder im Sinne des Projekts positiv beeinflussen kann (z. B. intensive Kommunikation bereits vor dem offiziellen Projektstart) (Weiland, 2012) (Andreasen & Sovacool, 2014).

Die Stakeholder können nach ihrer Fähigkeit und ihrem Interesse unterschieden werden. Es kann sich um direkte Macht handeln (z.B. über den Haushalt), legislative Gewalt oder indirekte Macht (z.B. die Fähigkeit, andere zu zwingen oder zu überzeugen). Die Macht, die ein Stakeholder besitzt, kann von der formalen Hierarchie, der Autorität der Führung, der Legislative, der Kontrolle strategischer Ressourcen, dem Besitz von Fachwissen, der Fähigkeit, Menschen zu mobilisieren (Lobbying, Sensibilisierung der Öffentlichkeit) und/oder der Verhandlungsposition gegenüber anderen Stakeholdern abhängen. (Weiland, 2012) (Andreasen & Sovacool, 2014)

Die Rolle der Stakeholder ist nicht statisch. Die Stakeholder stehen in einer Beziehung zueinander und beeinflussen sich gegenseitig. Solche Verschiebungen der Interessen oder Macht der Stakeholder lassen sich auch mittels gezieltem Management, im eigentlichen Sinne, beeinflussen. Dafür muss die aktuelle Situation der wichtigsten Stakeholder und anschliessend die gewünschte Situation bestimmt werden. Eine Methodik dazu wurde von (Weiland, 2012) entwickelt. Dabei wird die aktuelle und die gewünschte Position eines Stakeholder bestimmt. Die Definition der Position in der der Stakeholder sich befinden kann, ist in der Tabelle 1 definiert, zusätzlich ist eine mögliche Strategie für das Management des Stakeholders gegeben. Die Bestimmung der Position des Stakeholder wird in einem Expertengespräch durchgeführt.

Tabelle 1: Definitionen der Stakeholderposition

	Bewusstsein	Verständnis	Zusammenarbeit	Verpflichtung	Befürwortung
<b>Definition</b>	Die Stakeholder haben ein Bewusstsein und Verständnis entwickelt von Ziel und Fortschritt des Projektes.	Die Stakeholder haben ein tiefes Verständnis von den Vorteilen und den Implikationen der Veränderungen für sie selbst.	Die Stakeholder unterstützen den Wandel, glauben, dass er lohnend ist und würden handeln, wenn es erforderlich ist.	Stakeholder kommunizieren proaktiv und ergreifen notwendige Aktionen, um den Wandel zu unterstützen.	Stakeholder ergreifen die Initiative, um die Leistung zu verbessern und aufrechtzuerhalten.
<b>Strategie</b>	Informiert halten	Am Projekt beteiligen	Bedeutsame Rolle geben	Verantwortung geben	Ownership geben

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Weiland, 2012)

## 2.6 PEST-Analyse

Die PEST-Analyse wird in der Literatur häufig auch als Umweltanalyse bezeichnet. PEST steht zusammenfassend für die Begriffe «Political», «Economical», «Socio-Cultural» und «Technological». Mit der Umweltanalyse sollen die Möglichkeiten und Gefahren einer oder mehrerer Entwicklungen der (Markt-) Umwelt bestimmt werden. Die Umwelt gibt einerseits die Grenzen der strategischen Möglichkeiten vor und eröffnet andererseits Alternativen für strategische Neuausrichtungen eines Unternehmens oder eines Projektes. Dieses Spannungsfeld wird durch eine Umweltanalyse erklärt und zeigt Möglichkeiten, auf Umweltveränderungen zu reagieren und diese gegebenenfalls sogar zu beeinflussen (Umwelt im Sinne der PEST-Analyse ist nicht zu verwechseln mit Umwelt im Sinne der natürlichen, den Menschen umgebenden Umwelt). Die genannten Faktoren der Makro-Umwelt können folgende Einflüsse haben (Buchholz, 2009):

- Die politischen Rahmenbedingungen bilden Möglichkeiten und Restriktionen in Form von Gesetzen und Verordnungen ab.
- Die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen und deren Veränderung formen Werte, Normen und Strukturen einer Gesellschaft und somit auch das Nachfrageverhalten von Käufern.
- Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflussen eine Volkswirtschaft. Durch diese wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden Angebots- und Nachfrageverhalten und damit auch die wirtschaftliche Ausgangsbedingung eines Unternehmen beeinflusst.
- Der Stand der technischen Rahmenbedingungen wird über den Einsatz und die Anwendung von Technologien zum Ausdruck gebracht. Die technischen Rahmenbedingungen beeinflussen sowohl die Wertschöpfungsprozesse, als auch die Technologie von Gütern und Dienstleistungen.

Da die Wasserstoffmobilität einen relativ kleinen Anteil der Automobilindustrie umfasst, wird die PEST-Analyse nicht für Wasserstoffmobilität allein durchgeführt, sondern umfassend für die gesamte Automobilindustrie. Auf diese Weise können gesamtheitliche Einflussgrößen erkannt werden, die die Mobilität als Ganzes betreffen. Für eine spezifische Analyse der Wasserstoffmobilität wird in einem zweiten Schritt eine Branchenstrukturanalyse durchgeführt (vgl. Kapitel 4.6). Die Verwendung des PEST-Modells zur Erfassung der wichtigsten Kräfte wird einen breiten Überblick über die Kräfte und ihre Quellen geben, die die zukünftigen Szenarien der Wasserstoffmobilität zusammen mit der Automobilindustrie prägen. Da sich die Automobilindustrie mehrheitlich ausserhalb der Schweiz befindet, darf sich dieses Kapitel ebenfalls nicht auf den Schweizermarkt begrenzen, sondern muss einen globalen Überblick bieten.

Für alle Faktoren der PEST-Analyse gibt es eine Vielzahl von möglichen Einflussgrößen, anhand derer der jeweilig interessierende Faktor beurteilt werden kann. Im Anschluss an die Erhebung der Einflussfaktoren erfolgen im Modell der globalen Umweltanalyse eine Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bedingungen (Cross-Impact-Analysis), sowie eine Projektion der Einflussfaktoren in ihrem Wirkungsbezug auf die Zukunft (Buchholz, 2009). Die Methodik der Cross-Impact-Analyse ist im Kapitel 2.9 zu finden.

## 2.7 Branchenstrukturanalyse

---

Das Modell zur Branchenstrukturanalyse oder «Five Forces» geht auf (Porter, 1979) zurück, er beschreibt dabei die fünf entscheidenden Wettbewerbskräfte einer Branche, um damit die Attraktivität dieser Branche bestimmen zu können. Die Stärke der Wettbewerbskräfte bestimmt die Rentabilität der Branche und ist für die Profitabilität eines im Markt agierenden Unternehmens oder Projektes von essenzieller Bedeutung. Die Branchenstrukturanalyse dient im Wesentlichen der Erfassung der Wettbewerbskräfte. Daraus kann dann die Attraktivität des Marktes abgeleitet werden. Die Branchenstrukturanalyse wird in den folgenden fünf Schritten aufgebaut (Porter, 1979):

- **Analyse der Eintrittsbarrieren:** In diesem Schritt werden alle relevanten Kriterien zur Beurteilung der Eintrittsbarrieren in einen Markt analysiert. Unter dem Begriff »Marktbarrieren« oder «Eintrittsbarrieren» werden Markthemmnisse verstanden, die den Eintritt in einem Markt erschweren oder gar unmöglich machen. Eintrittsbarrieren beeinflussen die Marktattraktivität, da sie Hürden des Markteintritts für neue Marktteilnehmer darstellen. (Buchholz, 2009)
- **Bestimmung des Rivalitätsgrades unter bestehenden Wettbewerbern:** Im Mittelpunkt der Branchenstrukturanalyse steht der Grad der Rivalität unter den aktiven Wettbewerbern. In diesem zweiten Schritt wird die Branchenattraktivität aus der Sicht der Wettbewerbssituation bestimmt. Speziell die Austrittsbarrieren einer Branche wirken als wettbewerbsverstärkende Faktoren. (Buchholz, 2009)
- **Analyse des Bedrohungspotenzials durch Substitutionsprodukte:** Substitutionsprodukte sind Angebote anderer Branchen, welche die Produkte einer Branche ersetzen können. Mit Substitutionsprodukten wird das Gewinnpotenzial einer spezifischen Branche begrenzt. Im Vordergrund der Analyse stehen dabei Produkte, die aus Kundensicht ihre Bedürfnisse genauso gut oder besser befriedigen. In dieser Stufe werden diese Ersatzprodukte hinsichtlich ihres Bedrohungspotenzials analysiert. (Buchholz, 2009)
- **Ermittlung der Verhandlungsstärke der Abnehmer:** Die Abnehmer eines Produktes stellen einen weiteren Faktor für die Attraktivität der Branche dar. Ihre Verhandlungsstärke ermöglicht es ihnen, niedrigere Preise, höhere Qualität oder bessere Dienstleistungen auszuhandeln. Zur Bestimmung der Verhandlungsmacht der Abnehmer sind die Kundengruppen, hinsichtlich ihrer Beeinflussung der Branchenattraktivität zu analysieren. (Buchholz, 2009)

- **Analyse der Verhandlungsstärke von Lieferanten:** Eine starke Verhandlungsmacht von Lieferanten reduziert die Attraktivität einer Branche. Die Wirkungen der Anbietermacht stehen in gewisser Weise denen der Nachfragemacht gegenüber. Starke Anbieter können hohe Preise durchsetzen und die Produkteigenschaften im eigenen Sinne weitgehend selbst bestimmen. (Kleinaltenkamp & Kuß, 2011)

## 2.8 «Causal Loop Diagram»

Die Methoden des «Systems Thinking» (Systemdenkens) geben uns Werkzeuge an die Hand, um schwierige fiktive Managementprobleme besser zu verstehen. Dabei handelt es sich um etablierte Methoden, die bereits über 50 Jahre angewandt werden (Forrester, 1961). Ziel dieses Ansatz ist es, ein Unternehmen, einen Prozess oder eine Branche als ein System zu betrachten, das aus interagierenden Teilen besteht, die auf Ereignisse und ihren Ursachen basieren. Ein Teil des «System Thinking» ist das in dieser Arbeit verwendete «Causal Loop Diagram» (CLD), welches anschliessend besprochen wird.

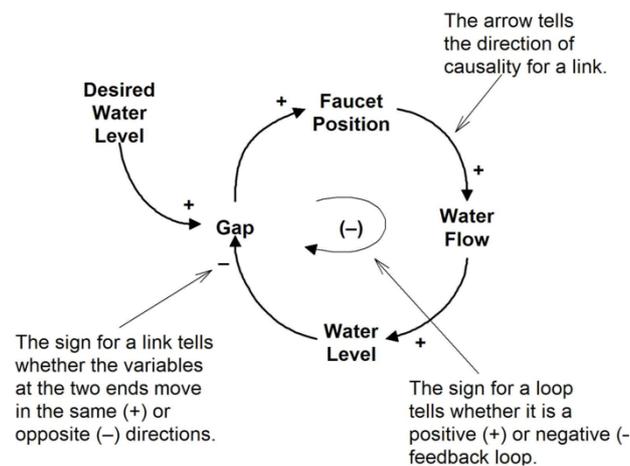


Abbildung 1: Beispiel CLD

Quelle: (Kirkwood, 1998)

Um die Systemstrukturen, besser zu verstehen, wird eine Notation zur Darstellung von Systemstrukturen eingeführt. Dieser Nutzen wird durch das CLD in der Abbildung 1 veranschaulicht, welches den Prozess vom Auffüllen eines Glases Wasser darstellt. In diesem Diagramm stellen die kurzen beschreibenden Elemente die Prozesse oder Aktivitäten dar und die Pfeile stellen die kausalen Einflüsse zwischen diesen Elementen dar. Solche Einflüsse können eine positive oder negative Wirkung haben. Aus dem Diagramm geht hervor, dass «Water Flow» direkt von «Faucet Position» beeinflusst wird und selbst das «Water Level» beeinflusst. (Kirkwood, 1998)

Wenn sich ein Teil eines Systems selbst beeinflusst, wie das in der Abbildung 1 der Fall ist, wird der Teil des betroffenen Systems als Rückkopplungsschleife (Feedbackloop) bezeichnet. Eine Rückkopplungsschleife ist eine geschlossene Abfolge von Ursachen und Wirkungen (d.h. Aktion und Information). Feedback Loops sind von grosser Wichtigkeit, um das eigentlich Verhaltensmuster des System zu verstehen und die zentralen Ursachen oder Treiber zu erkennen, die sich oft innerhalb der Feedbackstrukturen befinden oder diese beeinflussen. Das CLD aus der Abbildung 1 enthält zusätzlich zu den Pfeilen (die als Kausalzusammenhänge bezeichnet werden), auch ein Zeichen (entweder + oder -) auf jedem Link. Diese Zeichen haben die folgende Bedeutung (Kirkwood, 1998):

1. Eine kausale Verbindung von einem Element A zu einem anderen Element B ist positiv, wenn entweder (a) A zu B addiert oder (b) eine Änderung in A, eine Änderung in B in die gleiche Richtung bewirkt.
2. Ein kausaler Zusammenhang von einem Element A zu einem anderen Element B ist negativ, wenn entweder (a) A von B subtrahiert oder (b) eine Änderung in A, eine Änderung in B in der entgegengesetzten Richtung bewirkt.

Hinter «Systems Thinking» und dem «Causal Loop Diagram» befindet sich eine eigene und sehr umfangreiche Theorie, die in diesem Kapitel zum grundlegenden Verständnis und Vollständigkeit halber aufgeführt wird. Für ein vertieftes Verständnis dieser Theorie, wird die weitere Lektüre von (Kirkwood, 1998) oder (Forrester, 1961) empfohlen.

## 2.9 Cross-Impact-Analyse

---

Eine Cross-Impact-Analyse wird durchgeführt, um die dynamische Rolle wichtiger Variablen für ein Modell zu charakterisieren. Nach einer Beschreibung des Verfahrens werden Variablen bestimmt und die Analyse durchgeführt. Das angewandte Konzept von Olaf Helmer und Theodore Gordon ist ein erweitertes Prognoseverfahren auf Basis der Delphi-Methode. Bei dieser Methode werden Ereignisse auf einer Matrix aufgezeichnet und für jedes dieser Ereignisse wird die Frage gestellt: Wenn das Ereignis in der Zeile eintreten sollte, wie würde es die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des Ereignisses in der Spalte beeinflussen? Das Urteil wird bewertet und in die Matrixzellen eingegeben. Die Cross-Impact-Analyse ist der Versuch die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu zeigen, da verschiedene Ereignisse stattgefunden haben oder nicht stattgefunden haben. (Janssen, 2005)

In dieser Arbeit wird die von Frederic Vester verwendete «Cross-Impact-Methode» angewandt. Anstatt nach der Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Ereignisses zu fragen, stellte er die Frage (Vester, 1999): «Wenn ich die Variable A ändere, wie stark würde sich die Variable B ändern». Die Auswirkungen der Änderung einer Variable auf eine andere wird in der Matrix in Form einer Bewertungszahl zwischen 0 und 3 dargestellt (Janssen, 2005):

- Wenn eine kleine Änderung in A eine starke Änderung in B bewirkt, wird eine 3 geschrieben.
- Wenn eine grosse Änderung in A erforderlich ist, um eine vergleichbare Änderung in B zu bewirken, wird eine 2 geschrieben.
- Wenn eine grosse Änderung in A nur eine kleine Änderung in B bewirkt, wird eine 1 geschrieben.
- Wenn nur kleine oder keine Änderungen im Bereich von A verursacht werden können, wird 0 geschrieben.

Analog zu anderen Varianten des Cross-Impact-Verfahrens wird zwischen mehreren Arten von Variablen entsprechend den Summen der einzelnen Zeilen und Spalten der Matrix unterschieden. Die folgende Liste fasst die Typen zusammen (Janssen, 2005):

- **Aktive Variablen:** Variablen, die andere stark beeinflussen, aber selbst nur schwach oder nicht betroffen sind.
- **Reaktive Variablen:** Variablen, die andere schwach beeinflussen, aber selbst stark von anderen Variablen beeinflusst werden, die den Ergebnissen zugeordnet sind.
- **Kritische Variablen:** Variablen, die andere stark beeinflussen und auch stark beeinflusst werden von anderen Variablen, die mit strategischen Variablen verknüpft sind.
- **Puffervariablen:** Variablen, die andere schwach beeinflussen und auch schwach beeinflusst werden von anderen Variablen

Als erster Schritt in der Cross-Impact-Analyse wird ein grundlegender Satz von Variablen definiert. Mit diesem sollen die Interaktionen zwischen Variablen optimal beschreiben und gleichzeitig in ihrer Anzahl begrenzt sein. (Janssen, 2005) Für den Variablensatz wurden die gleichen wie im Causal Loop Diagramm verwendet, um dieses qualitativ zu beschreiben. Um die Variablen in «kritische» und «Puffer» zu unterteilen, wird mit der folgenden Formel eine kritische Grenze bestimmt (Janssen, 2005):

$$P_{Rating} = \frac{P_{Value}}{(n - 1)^2}$$

In dieser Formel ist  $n$  die Gesamtzahl der Variablen im Netzwerk und  $P_{Value}$  das Produkt aus der aktiven und passiven Summe.  $P_{Value}$  repräsentiert die Gesamtzahl und die Stärken der Verbindungen jeder Variablen mit allen anderen Variablen des Systems. Die Theorie besagt, dass Variablen mit einem  $P_{Rating}$  über 1.2 als «kritisch» angesehen werden können. (Janssen, 2005) (Bei  $n = 20$  Variablen entspricht  $P_{Value, kritisch} = 433.2$ )

## 2.10 Erstellen der Sensitivitätsanalyse

---

Sensitivitätsanalysen werden durchgeführt, um ergebnisrelevante Entscheide und Annahmen zu analysieren, zu erkennen und die Stabilität der Ergebnisse zu überprüfen. Dies gilt für getroffene Annahmen, wie zum Beispiel die Ziehung der Systemgrenze, Wahl eines bestimmten Verfahrens oder die verwendeten Parameter und Szenarien (ETH Zürich, 2013). Im Fall dieser Arbeit geht es darum, die Auswirkungen von ausgewählten Einflussgrößen auf das System darzustellen.

Die Simulation des System wird mit der vom «U.S. Department of Energy's Vehicle Technologies Office» zur Verfügung gestellten Betaversion des Programms «Automotive Deployment Options Projection Tool» (ADOPT) erstellt. Das Tool ermittelt zukünftigen Verkauf von Fahrzeugen nach Antriebs-technologie, Erdölverbrauch, technischem Fortschritt und Treibhausgasemissionen. ADOPT ermöglicht dem Anwender Modifikationen der Inputdaten und das Erstellen von eigenen Szenarien. Nicht ändern lässt sich aber in der aktuellen Betaversion (stand 2017) der Marktplatz USA. Das Programm ADOPT, die relevanten Parameter und die grundlegende Datenbank des Tools werden im Kapitel 3.6 als Grundlage beschreiben. Weiterführende Grundlagen sind im (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015) zu finden.

Um die Sensitivität der im Kapitel 5.3 bestimmten Einflussgrößen zu ermitteln, wurde ein Basisszenario als Ausgangslage erstellt, welches im Folgenden «Baseline» genannt wird. Die Baseline hat nicht den Anspruch, eine Prognose über die effektive Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität zu machen oder das Trendszenario darzustellen. Vielmehr soll es als Basis für weitere Szenarien dienen, um die Abweichungen und somit die Sensitivität der ausgewählten Einflussfaktoren aufzuzeigen. Bei dieser Analyse, wird aus Gründen der Komplexität, nur die Marktentwicklung der FCV (LKW & PW) betrachtet, die übrigen Antriebstechnologien wurden zwar in der Simulation berechnet, aber anschliessend nicht thematisiert.

Die Baseline wird, wie bereits erwähnt, mit dem Simulationstool ADOPT erstellt. Dies bedeutet, dass sich die Resultate und die Verkaufszahlen auf den Marktplatz USA beziehen. Um eine generelle Aussage zu ermöglichen, muss vorausgesetzt werden, dass sich die US Wasserstoffmobilität repräsentativ für andere Märkte verhält. Das heisst, dass die grundlegenden Marktmechanismen der USA als Grundvoraussetzung für die Sensitivitätsanalyse angenommen werden. Ob dies zutreffend ist, wird im Kapitel 7.1 diskutiert. Für die Berechnungen der Szenarien wurde ein Zeitraum von 2015 bis 2050 gewählt, wobei vier Jahre (2015 - 2019) als historischer Datensatz gezeigt wird. Die jährlichen Verkaufszahlen

werden im Verhältnis zu den absoluten Verkaufszahlen in Prozenten dargestellt. Ziel dieser Sensitivitätsanalyse ist das Aufzeigen von kritischen Einflussgrößen und das Aufzeigen, wie sensitiv die Wasserstoffmobilität auf Änderungen ist. Mit dieser Methode soll nicht die effektive Entwicklung der Schweizer Wasserstoffmobilität beschrieben werden, es soll aufgezeigt werden, unter welchen Einflussgrößen sich der Markt in welche Richtung entwickelt.

Die Bestimmung der für die Sensitivitätsanalyse relevanten Einflussgrößen soll sich an den übrigen Methoden (PEST-, Cross-Impact-Analyse und 5 Forces usw.) orientieren, die in dieser Arbeit angewandt werden. Gleichzeitig muss die Eingabe in das Simulationstool möglich und sinnvoll sein.

## **2.11 SWOT - Analyse**

---

Ein fundamentaler Teil der strategischen Planung macht die Analyse der Ausgangssituation aus. Dabei ist das Erkennen von Stärken und Schwächen, sowie von Chancen und Risiken des Umfeldes eines Unternehmens oder einer Branche, eine der zentralsten Aufgaben. Dafür wird in dieser Arbeit die SWOT-Analyse eingesetzt. SWOT ist das englische Akronym für Strengths (Stärken), Weaknesses (Schwächen), Opportunities (Chancen) und Threats (Gefahren). Das Ziel dieser Analyse besteht darin, die Stärken mit den Chancen des Umfeldes in Einklang zu bringen, so dass sich daraus Erfolgspotenziale für die Zukunft ergeben. Diese Erfolgspotenziale sollen die Einzigartigkeit des Unternehmens oder der Branche und erkennbar und nutzbar machen. (Buchholz, 2009)

Für die Bestimmung der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken orientiert sich diese Arbeit an den Erkenntnissen aus den anderen Analysen (5 Forces, PEST-, Stakeholderanalyse und Analogien) sowie den Expertengesprächen. Diese Erkenntnisse werden dann in der SWOT-Analyse zusammengetragen und aufgeführt. Um einen gesamtheitlichen Überblick zu geben, konzentriert sich die Analyse nicht nur auf die Schweiz, sondern bezieht ganz Europa als wichtigen Einfluss und Handelspartner der Schweiz ein.

## 3 Grundlagen

---

Der Fokus des Grundlagenkapitels liegt auf der Präsentation des aktuellen Stand des Wissens, auf dem diese Arbeit aufbaut. Dafür werden die relevanten Definitionen, Modelle, Annahmen, Forschungsarbeiten und Forschungsergebnisse aufgeführt und erläutert. Ein spezieller Schwerpunkt liegt dabei auf der Beantwortung, der in der Zielsetzung genannten Literaturrecherche zu den ökonomischen, ökologischen und technischen Faktoren und deren möglichen zukünftigen Entwicklungen. Das Kapitel Grundlagen basiert auf einer detaillierten Literaturrecherche, welche gemäss dem Kapitel Methodik Literaturrecherchen (vgl. Kapitel 2.1) aus Publikationen wissenschaftlicher Zeitschriften aufgebaut ist.

### 3.1 Begriffsdefinition

---

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Begriffe benutzt, die als Grundlage für eine lückenfreie Analysen eindeutig definiert werden müssen. Die Schlüsselbegriffe sind wie folgt definiert:

- **Grüner Wasserstoff:** Als «Grüner» Wasserstoff wird Wasserstoff bezeichnet, der mithilfe von Elektrolyse-Verfahren aus regenerativem Strom gewonnen wird, z.B. aus Wind- oder Photovoltaikstrom. Darunter fallen auch klassische Elektrolyseverfahren, wie die Chlor-Alkali-Elektrolyse, sofern der Betrieb mit regenerativer Energie (Strom) folgt. Die Primärenergie muss erneuerbar sein. Das Gegenteil davon ist **Grauer Wasserstoff**, welcher auf konventionellem Herstellungsweg aus fossilen Quellen produziert. Dies kann als Beispiel durch Dampfreformierung von Erdgas oder durch Elektrolyse (vgl. Kapitel 3.3.1) mittel fossil erzeugtem Strom geschehen.
- **Wasserstoffmobilität:** In dieser Arbeit wird einerseits mit dem Begriff Wasserstoffmobilität das Nutzen von Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen bezeichnet. Andererseits umfasst der Begriff auch den sich entwickelnden Industriezweig, der sich auf das Erfüllen von Mobilitätsbedürfnissen unter Nachhaltigkeitsaspekten fokussiert und dafür Fahrzeuge einsetzt, die einen Wasserstoffspeicher mitführen, sowie einen Elektroantrieb verwenden. **Flugzeuge, Zug und Nutzfahrzeuge wie Traktoren, Baumaschinen und Gabelstapler sind von dieser Definition ausgeschlossen.**
- **FCV:** Unter FCV ist das englische Wort «Fuel Cell Vehicle» gemeint, was auf deutsch übersetzt Brennstoffzellenfahrzeug bedeutet. Gemeint sind damit Personenwagen (PW) und Lastkraftwagen (LKW). Übrige Fahrzeugtypen sind ausgeschlossen, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen und einen gezielten und vertieften Fokus zu setzen. Unter FCV werden Elektrofahrzeuge verstanden, die über eine integrierte Brennstoffzelle verfügen. Um die FCV in PWs und LKWs abzugrenzen, wird die Kurzform von «Fuel Cell» (FC) also Brennstoffzelle wie folgt verwendet: FC-PW für Brennstoffzellen Personenwagen und FC-LKW für Brennstoffzellen Lastkraftwagen.
- **ICE:** Dieser Begriff bezieht sich auf das englische Wort «Internal Combustion Engine» und beschreibt in dieser Arbeit alle PWs und LKWs, die als Treibstoff fossile Quellen gebrauchen. Dies sind Erdgas-, Diesel- und Benzinfahrzeuge, aber auch die jeweiligen Hybride-Varianten davon.
- **Alternative Antriebssysteme:** Mit dem Begriff alternative Antriebssysteme werden alle PWs oder LKWs verstanden, die als Treibstoff keine fossilen Stoffe wie Benzin, Diesel oder Naturgas verwenden. Zu den alternativen Antriebssystemen gehören FCV, batteriebetriebene Fahrzeuge (BEV) und Verbrennungsmotoren die erneuerbare Energiequellen benutzen wie Biogas.
- **HRS:** Damit ist der englische Ausdruck «Hydrogen Refueling Station», also Wasserstofftankstelle gemeint. Hierbei ist wichtig zu beachten, dass sich dieser Ausdruck, speziell in Bezug auf Anzahl oder Kosten, immer nur auf eine Tanksäule bezieht.

- **BEV:** Darunter ist der englische Ausdruck «Battery Electric Vehicle» zu verstehen, also Elektrofahrzeug, welche die Energie ausschliesslich in Akkupacks gespeichert haben. FCV werden davon abgegrenzt.

## 3.2 Grundlagen Wasserstoff

---

Wasserstoff ist bereits heute eine wichtige Ressource in der chemischen Industrie. In Zukunft hat Wasserstoff das Potenzial, ein wichtiger Energieträger in einer nachhaltigen Energiezukunft zu werden (Hamacher, 2014). Dieses Kapitel liefert grundlegende Informationen um das Thema Wasserstoff, einschliesslich seiner Eigenschaften zu verstehen.

### 3.2.1 Die Geschichte des Wasserstoffs

In dieser Arbeit geht es prinzipiell um Wasserstoff als Kraftstoff der Zukunft. Aber um für die Zukunft bereit zu sein, müssen wir die Vergangenheit studieren. Daher wird in diesem Kapitel ein kurzer Rückblick in die Geschichte von Wasserstoffs gegeben. Die Zusammenstellung basiert auf dem Buch «Hydrogen Energy, Challenges and Solutions for a Cleaner Future» (Zohuri, 2019).

- 1776** Wasserstoff wurde erstmals vom britischen Wissenschaftler Henry Cavendish als eigenständiges Element identifiziert, nachdem er durch die Reaktion zwischen Zinkmetall und Salzsäure Wasserstoffgas produziert hatte.
- 1788** Der französische Chemiker Antoine Lavoisier gab dem Wasserstoff einen Namen, der sich aus den griechischen Wörtern *hydro* und *gene* abgeleitet hat, was «Wasser» und «geboren von» bedeutet.
- 1800** Die englischen Wissenschaftler William Nicholson und Sir Anthony Carlisle entdeckten, dass das Anlegen eines elektrischen Stroms an Wasser, Wasserstoff- und Sauerstoffgas erzeugt. Dieser Prozess wurde später als «Elektrolyse» bezeichnet.
- 1838** Die Brennstoffzelle wurde vom Schweizer Chemiker Christian Friedrich Schoenbein entdeckt.
- 1845** Sir William Grove demonstrierte die Entdeckung von Schoenbein in praktischem Massstab durch die Schaffung einer «Gasbatterie».
- 1889** Ludwig Mond und Charles Langer, bauten die erste nutzbare Brennstoffzelle
- 1920** Der britische Wissenschaftler J.B.S. Haldane stellte in seinem Buch «Daedalus or Science and the Future» das Konzept des erneuerbaren Wasserstoffs vor, indem er vorschlug, dass es grosse Kraftwerke geben wird, in denen bei windigem Wetter die überschüssige Energie für die elektrolytische Zersetzung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff verwendet wird.
- 1937** Nach zehn erfolgreichen Transatlantikflügen aus Deutschland in die Vereinigten Staaten stürzte die Hindenburg, ein mit Wasserstoffgas gefülltes Luftschiff, bei der Landung in Lakewood, New Jersey, USA ab.
- 1959** Francis T. Bacon von der Cambridge University in England baute die erste praktische Wasserstoff-Luft Brennstoffzelle. Das 5-Kilowatt (kW)-System trieb eine Schweißmaschine an. Später im Jahr 1959 zeigte Harry Karl Ihrig, ein Ingenieur der Allis-Chalmers Manufacturing Company, das erste Brennstoffzellenfahrzeug: einen 20-PS-Traktor.
- 1973** Das Ölembargo der OPEC und die daraus resultierende Knappheit förderten weltweit alternative Kraftstoffe. Die Entwicklung von Wasserstoff-Brennstoffzellen für konventionelle Anwendungen begann.
- 1974** Die International Energy Agency (IEA) wurde als Reaktion auf die weltweiten Störungen des Ölmarktes gegründet. Die Aktivitäten der IEA umfassten auch die Erforschung und Entwicklung von Wasserstoffenergie-technologien.

- 1988** Die sowjetische Firma Tupolev baute erfolgreich einen TU-154 Verkehrsjet um und betrieb eines der drei Triebwerke des Jets mit Flüssigwasserstoff. Der Erstflug dauerte 21 Minuten.
- 1990** Die weltweit erste solarbetriebene Wasserstoffproduktionsanlage, eine Forschungs- und Testanlage in Bayern, geht in Betrieb.
- 1994** Daimler-Benz präsentierte auf einer Pressekonferenz in Ulm sein erstes Brennstoffzellenfahrzeug NECAR-I.
- 1997** Der deutsche Automobilhersteller Daimler-Benz und Ballard Power Systems gaben eine Forschungskoooperation über 300 Millionen US-Dollar zum Thema Wasserstoff-Brennstoffzellen für den Verkehr bekannt.
- 1999** In den deutschen Städten Hamburg und München wurden die ersten europäischen Wasserstofftankstellen eröffnet.
- 2000** Ballard Power Systems präsentierte auf der Detroit Auto Show die weltweit erste serienreife Brennstoffzelle für Automobilanwendungen.
- 2003** Präsident George W. Bush kündete eine 1.2 Milliarden US-Dollar Initiative zur Entwicklung der Wasserstofftechnologie für kommerziell nutzbare Brennstoffzellen an.
- 2005** 23 Staaten in den USA haben Wasserstoffinitiativen ins Leben gerufen.
- 2013** Die erste kommerzielle (2 MW) Power-to-Gas Anlage in Falkenhagen geht in Betrieb und speichert Wasserstoff im Erdgasnetz.
- 2016** Toyota präsentiert sein erstes Wasserstoff-Brennstoffzellenauto, den Mirai.
- 2017** Gründung des Wasserstoffrates «Hydrogen Council» zur Beschleunigung der Entwicklung und Kommerzialisierung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien

### 3.2.2 Vorkommen und Stoffeigenschaften

Wasserstoff ist das leichteste und am häufigsten vorkommende Element im Universum; etwa 75% des Universums, aber nur ein kleiner Bruchteil der Erde, besteht aus Wasserstoff. Im Weltall kommt Wasserstoff aufgrund der niedrigen Temperatur und Druck in seiner atomaren Form vor. Das interstellare Gas besteht fast vollständig aus Wasserstoff. Auf der Erde ist Wasserstoff in atomarer Form, zumindest in der Natur, nicht zu finden. Das liegt an der hohen Reaktivität von Wasserstoff, welcher unter normalen Bedingungen sofort mit anderen Atomen Verbindungen eingeht, bevorzugt mit sich selbst zu  $H_2$ . Auch dieses Wasserstoffmolekül kommt auf der Erde nur in Vulkangasen und geothermalen Quellen in reiner Form vor. Ansonsten geht es wieder Verbindungen ein, am häufigsten mit Sauerstoff, in Form von Wasser  $H_2O$ . Wasserstoff ist in zahlreichen weiteren Verbindungen enthalten, wie zum Beispiel in anorganischen Hydriden und in organischen Verbindungen wie Kohlenwasserstoffen (Methan  $CH_4$ , Ethan  $C_2H_6$ , Benzol  $C_6H_6$ ). (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Die eine kurze Auswahl von Stoffeigenschaften und andere Fakten zum Thema Wasserstoff sind hier zusammengefasst, sie beruhen auf (Zohuri, 2019):

- Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron und ist das erste Element im Periodensystem
- Wasserstoff ist bei Raumtemperatur ein farbloses und geruchloses Gas.
- Wasserstoff ist das leichteste Element. Es ist so leicht und diffus, dass ungebündelter Wasserstoff aus der Atmosphäre entweichen kann. Es ist etwa 14-mal leichter als Luft.
- Wasserstoffgas ist eine Mischung aus zwei molekularen Formen (ortho- und para-Wasserstoff), die sich durch die Drehungen ihrer Elektronen und Kerne unterscheiden. Die beiden Formen von Wasserstoff unterscheiden sich in der Energie, so dass sich auch ihre physikalischen Eigenschaften unterscheiden.
- Wasserstoffgas ist hochentzündlich.

- Wasserstoff kann eine negative Ladung ( $H^-$ ) oder eine positive Ladung ( $H^+$ ) in Verbindungen annehmen.
- Wasserstoffverbindungen werden als Hydride bezeichnet.
- Wasserstoff hat den höchsten Energiegehalt aller gängigen Kraftstoffe in Gewichtsprozent, aber den niedrigsten Energiegehalt auf das Volumen bezogen.

### 3.3 Technische Grundlagen Wasserstoff

---

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen in Bezug auf Wasserstoff und die Wasserstoffmobilität besprochen. Ziel dieses Kapitel ist, die Darstellung der nötigen und relevanten Grundlagen, die für ein grundlegendes Verständnis der nachfolgenden Kapitel notwendig ist, aufzubauen. Dafür werden zuerst die verschiedenen Methoden Wasserstoff zu erzeugen präsentiert. Anschliessend wird die Brennstoffzelle als Antriebstechnologie der Wasserstoffmobilität und weitere Anwendungen besprochen. Zum Schluss des Kapitels wird die für die Wasserstoffmobilität relevante Infrastruktur, von der Verteilung, Speicherung bis zur Betankung, dargestellt.

#### 3.3.1 Erzeugung von Wasserstoff

Wasserstoff kommt in seiner reinen Form in der Natur auf der Erde nicht vor, er muss unter Einsatz von zugeführter Energie hergestellt werden. Es sind unterschiedliche Verfahren im Einsatz, die verschiedene Primärenergieträger und Wasserstoffverbindungen nutzen. Für die Beurteilung dieser Verfahren sind der Wirkungsgrad und die Emission von Kohlendioxid wichtige Kriterien. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Herstellungsverfahren. Die Elektrolyse wird in einem separaten Kapitel beschrieben.

Weltweit werden etwa 50 Mio. Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugt und verbraucht. Etwa 40% des erzeugten Wasserstoffs stammen aus Industrieprozessen, bei denen Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt. Die gängigsten dieser Prozesse sind (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018):

- Die Herstellung von Chlor mittels der Chlor-Alkali-Elektrolyse,
- die Rohölraffinerieprozesse, wie die Benzinreformierung,
- die Herstellung von Ethen oder Methanol.

Etwa 60% des benötigten Wasserstoffs wird als Hauptprodukt erzeugt, wobei die Herstellung von Wasserstoff derzeit zu rund 95% aus fossilen Kohlenwasserstoffen (wie z.B. Methan ( $CH_4$ ), Ethan ( $C_2H_6$ ) und Propan ( $C_3H_8$ )) erfolgt, nur 5% aus Wasser durch Elektrolyse. Ein Grund dafür sind die höheren Erzeugungskosten. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

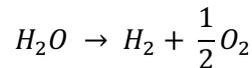
#### Elektrolytische Spaltung von Wasser

Das einzige bekannte emissionsfreie Herstellungsverfahren von Wasserstoff, ist die elektrochemische Wasserspaltung in der Elektrolyse, insofern die benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen stammt. Dieses Verfahren ergibt hohe Reinheitsgrade und erreicht üblicherweise Wirkungsgrade, bezogen auf den Brennwert, von bis zu 80%. Je nach Verfahren können auch bis zu 85% erreicht werden. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Auf Grund der anhaltenden Kostenreduktionen der Anlagen findet die Elektrolyse vermehrt Anwendung und gilt als Schlüsseltechnologie für den Ausbau der erneuerbaren Stromproduktion und der Sektorenkopplung. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Die Herstellung von Wasserstoff (und Sauerstoff als Nebenprodukt) aus Wasser mittels Elektrolyse ist ein technisch altes Verfahren, das seit über 100 Jahren weltweit etabliert ist (vgl. Kapitel 3.2.1). Für

dieses Verfahren werden zwei Elektroden, typischerweise inerte Metallplatten, in Wasser platziert und ein Gleichstrom angelegt. Wasserstoff entwickelt sich an der Kathode und Sauerstoff wird an der Anode produziert, gemäß der folgenden allgemeinen Reaktionsgleichung:



Die freie Energie der Reaktion beträgt 237 kJ/mol und die Reaktionsenthalpie 286 kJ/mol, beide unter Standardbedingungen. Theoretisch bedeutet dies, dass zur Wasserspaltung ein elektrischer Energieeintrag von 237 kJ/mol und ein zusätzlicher thermischer Energieeintrag von 49 kJ/mol erforderlich ist (Tremel, 2018). Das heisst pro Kilogramm Wasserstoff werden im Idealfall 143 MJ (39.7 kWh) an Energie benötigt (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018). Die verschiedenen Elektrolyse-Technologien unterscheiden sich durch ihren Ladungsträger und ihre Betriebstemperatur. Die wichtigsten Technologien lassen sich in alkalische Elektrolyseure, Protonenaustauschmembran-(PEM-) Elektrolyseure und Festoxid-Elektrolyseure gruppieren. Eine graphische Übersicht ist in der Abbildung 2 und die jeweiligen Vorteile sind in der Tabelle 2 zu finden. (Tremel, 2018)

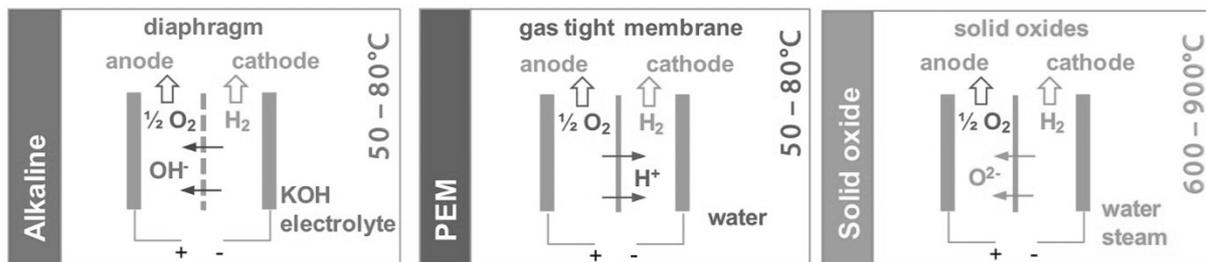


Abbildung 2: Verschiedene Arten von Wasserelektrolyse-Technologien

Quelle: (Tremel, 2018)

Tabelle 2: Vergleich Elektrolysen

Alkalische Elektrolyse	PEM-Elektrolyse	Hochtemperatur-Elektrolyse
	<i>Vorteile</i>	
etablierte Technologie, keine Edelmetallkatalysatoren, hohe Langzeitstabilität, relativ niedrige Kosten, Module bis 760 Nm <sup>3</sup> /h (3,4 MW)	hohe Stromdichten, hoher Spannungswirkungsgrad, einfacher Systemaufbau, gute Teillastfähigkeit, Fähigkeit zur Aufnahme extremer Überlast, extrem schnelle Systemantwort für Netzstabilisierungsaufgaben, kompaktes Stackdesign erlaubt Hochdruckbetrieb	Wirkungsgrade über 100 % bezogen auf die thermoneutrale Zellspannung, da Wärme eingekoppelt werden kann keine Edelmetallkatalysatoren
	<i>Nachteile</i>	
geringe Stromdichten, geringer Teillastbereich Systemgröße und Komplexität, aufwändige Gasreinigung, korrosiver flüssiger Elektrolyt	korrosive Umgebung, hohe Investitionskosten durch kostenintensive Komponenten	Labor- und Versuchsstadium, Langzeitstabilität (mechanisch), Wärmemanagement

Quelle: (Tremel, 2018)

### Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe

Das weltweit meist genutzte Herstellungsverfahren für die Herstellung von Wasserstoff ist die Reformierung fossiler Kohlenwasserstoffe. Das wirtschaftlichste Reformierungsverfahren ist die Dampfreformierung kurzkettiger Kohlenwasserstoffe (meist Methan). Dabei werden hohe Wirkungsgrade von bis zu 80% erzielt. In der partiellen Oxidation werden Kohlenwasserstoffe und Rückstandsöle (z.B. Schweröl) bei Wirkungsgraden um 70% mit Sauerstoff exotherm umgewandelt. Die autotherme Refor-

mierung ist eine Kombination der Reformierung und der partiellen Oxidation. Alle Reformierungsverfahren erfordern eine aufwändige Reinigung des Produktgases und emittieren Kohlendioxid. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

### **Vergasung von fossilen Kohlenwasserstoffen**

Ein weiteres Verfahren zur Wasserstoffherstellung ist die Vergasung von fossilen Kohlenwasserstoffen (meist Kohle). In der Forschung wird aber zunehmend auf die Vergasung von Biomasse (Holz, Torf, Klärschlamm oder organischen Abfällen) als Primärenergieträger gesetzt. Das so erzeugte Produktgas enthält neben Wasserstoff eine Reihe anderer Komponenten und erfordert eine aufwändige Reinigung. Der Vergasungsprozess emittiert Kohlendioxid, wobei bei Biomasse von «CO<sub>2</sub>-Neutralität» gesprochen werden kann. Die Wirkungsgrade dieses Verfahren variieren je nach Ausgangsstoff und erreichen Werte bis 55%. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

### **Weitere Verfahren**

Es werden verschiedene weitere Verfahren und Prozesse zur Wasserstoffgewinnung erforscht, wie z.B. biologische und photochemische Prozesse. Dazu zählen die Biophotosynthese von photosynthetisch aktiven Mikroorganismen wie Grünalgen oder Cyanobakterien, sowie die Fermentation verschiedener Bakterienarten. Ein eher energieintensives Verfahren ist die direkte thermische Spaltungen von fossilen Kohlenwasserstoffen bei sehr hohen Temperaturen. Wasserstoff kann aber auch aus der chemischen Spaltung von Wasser mit Alkalimetallen oder mit Metalloxiden gewonnen werden. Es handelt sich dabei um einen sehr aufwändigen Prozess. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

### **3.3.2 Brennstoffzelle**

Bereits im Jahr 1838 wurde das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle entdeckt (vgl. Kapitel 3.2.1), konnte sich aber nicht gegen die gleichzeitig stattfindende Entwicklung der mechanisch angetriebenen Dynamomaschinen zur Stromerzeugung durchsetzen. In Folge dessen blieb die Anwendung der Brennstoffzellen lange auf Spezialgebiete, wie die Raumfahrt, beschränkt. Erst in den letzten Jahren wird wieder verstärkt an der Weiterentwicklung der Brennstoffzelle gearbeitet, um Energie emissionsfrei und mit einem hohen Wirkungsgrad unabhängig von fossilen Brennstoffen umzuwandeln. Obwohl die Brennstoffzelle vor dem Verbrennungsmotor erfunden wurde, steht ihre technische Optimierung erst am Anfang. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der die chemische Reaktionsenergie des Brennstoffs direkt in elektrische Energie wandelt. Anders als bei einer Batterie, werden die Reaktoren kontinuierlich von aussen zugeführt. Dabei findet eine Redoxreaktion statt, bei der durch den Elektronenfluss Arbeit verrichtet wird. Das Oxidationsmittel ist meist Sauerstoff aus der Umgebungsluft. In dieser Arbeit ist immer von der Brennstoffzelle mit Wasserstoff als Brennstoff die Rede. Vorteile der Brennstoffzelle als Energiewandler sind (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018):

- Direkte Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie
- Potential zu hohen Wirkungsgraden bei niedrigen Temperaturniveaus (nicht an den Carnot-Prozess gebunden)
- Keine Emissionen von Schadstoffen, Lärm oder CO<sub>2</sub>.
- Keine bewegte Bauteile.
- Hohes Potenzial für niedrige Herstellungskosten bei hohen Stückzahlen

Herausforderungen der Brennstoffzelle beim derzeitigen Stand der Technik sind (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018):

- Hohe Herstellkosten bei geringen Stückzahlen, und
- die Lebensdauer und der Wirkungsgrad sind weiter zu erhöhen.

Obwohl die Brennstoffzelle keine bewegliche Teile hat, unterliegt sie einem Alterungsprozess. Mit fortschreitender Zyklenzahl nimmt die Alterung zu und die Zellspannung sinkt. Strukturänderungen in den Elektroden sind meist für die Alterung hauptverantwortlich. Je nach Technologie, Anwendungsbereich und Informationsquelle variieren die Betriebsstunden der Brennstoffzelle zwischen 2'000 -5'000 Stunden bei mobilen Systemen. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) Wobei das britische Chemietechnik-Unternehmen ACAL Energy Ltd. im Jahr 2013 bekannt gegeben hat, dass eine PEM-Brennstoffzelle eine Lebensdauer von 10'000 Stunden erreicht hat. Dies entspricht einer Fahrstrecke von etwa 500'000 km und kann somit mit einem Dieselfahrzeug verglichen werden (Going Electric, 2013). Grosse Anlagen (SOFC) erreichen in Tests 20'000 Stunden (McPhail, Kiviaho, & Conti, 2013). In der Tabelle 3 ist eine Übersicht über verschiedene Brennstoffzellentypen und die relevanten Eigenschaften zu finden. Für eine weiterführende technische Beschreibung der Brennstoffzelle wird auf die Fachliteratur (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) verwiesen.

Tabelle 3: Eigenschaften von Brennstoffzellen

Brennstoffzelle		Leistung [kW]	Betriebstemperatur	El. Wirkungsgrad	Anwendung
Alkalisch	AFC	10–100	60 bis 80 °C	System 60%	Fahrzeuge & Raumfahrt
Polymerelektrolytmembran	PEMFC	0,1–500	*NT: 60 bis 120 °C HT: 120 bis 200 °C	System 45–60%	Fahrzeuge & Raumfahrt
Direktmethanol	DMFC	0,01–1	ca. 80 °C	Zelle 20–30%	Kleingeräte
Phosphorsäure	PAFC	Bis 10.000	160 bis 200 °C	System 40%	Kleinkraftwerke
Schmelzkarbonat	MCFC	Bis 100.000	ca. 650 °C	System 50%	Kraftwerke
Oxidkeramisch	SOFC	Bis 100.000	ca. 1000 °C	System 55–60%	Kraftwerke und APU

\* NT: Niedertemperatur, HT: Hochtemperatur

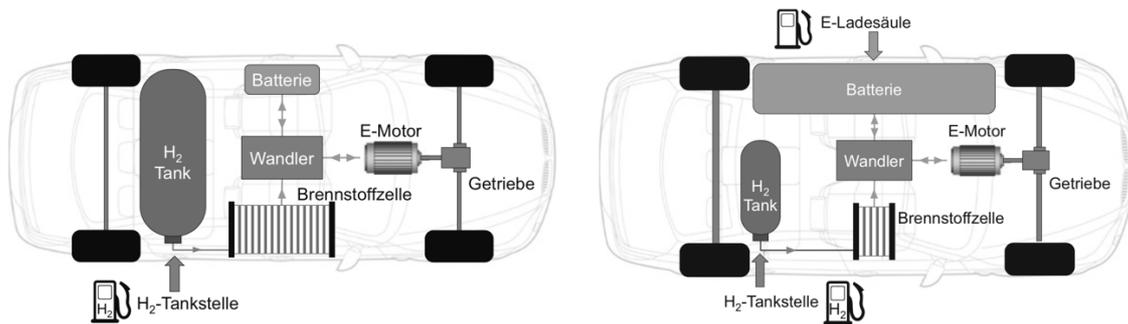
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

### 3.3.3 Brennstoffzellen in der Fahrzeugtechnik

Typischerweise besteht der Antriebsstrang von Brennstoffzellenfahrzeugen (FCV) aus dem Wasserstofftank, einer zusätzlichen Batterie, der Brennstoffzelle als Energiewandler, mehreren Spannungswandlern, Elektromotor, Getriebe und mechanischem Antrieb der Räder. Ein FCV ist im Grunde ein Elektro-Wasserstoff-Hybride. Die Ausführungen des Antriebsstrangs werden nach der hauptsächlichlichen Bereitstellung der Antriebsenergie meist in den «dominanten Brennstoffzellenantrieb» und den «Range Extender» Antrieb unterteilt. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Beim «dominanten Brennstoffzellenantrieb» (vgl. Abbildung 3, links) wird der Fahrleistungsbedarf mit der Brennstoffzelle gedeckt, die Batterie dient ausschliesslich der Rekuperation von Bremsenergie beim Verzögern und der Leistungsunterstützung beim Beschleunigen. Der Standard Brennstoffzellenpersonenwagen (FC-PW) hat daher eine leistungsstarke Brennstoffzelle (100 bis 150 kW), eine Batterie üblicherweise mit hoher Leistungsdichte und geringer Kapazität (1 bis 2 kWh) und einen Wasserstofftank als Hochdrucktank mit mehreren Kilogramm H<sub>2</sub>. Die Energiezufuhr erfolgt durch die Betankung von Wasserstoff an speziellen Wasserstofftankstellen (HRS) (vgl. Kapitel 3.3.5). (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Abbildung 3: Dominanter Brennstoffzellenantrieb (links) und Range Extender Antrieb (rechts)



Quelle: (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Der «Range Extender» (vgl. Abbildung 3, rechts) deckt den Fahrleistungsbedarf mit der Batterie, die Brennstoffzelle dient nur der Ladung der Batterie während des Fahrbetriebs und erhöht somit die Reichweite des Fahrzeugs. Der Range Extender Personenwagen hat in der Regel eine Batterie mit geringerer Leistungsdichte und einer hohen Kapazität. Die Brennstoffzelle auf der anderen Seite hat eine geringere Leistung (20 bis 30 kW) und einen kleinen Wasserstoffdrucktank. Bei Range Extender Antrieben bietet sich auf Grund der grösseren Batterie die Ausführung als Plug-In an, das heisst, dass die Energiezufuhr des Fahrzeugs zusätzlich zur Wasserstoffbetankung mittels Ladung der Batterie über das Stromnetz erfolgt. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Die verschiedenen Antriebstechnologien unterscheiden sich zum Teil deutlich. Zur präzisen Einordnung der FCV und der anderen Antriebstechnologien ist ein direkter Vergleich sinnvoll. Dafür ist in der Tabelle 4 eine Übersicht von vier, für diese Arbeit relevanten, Antriebstechnologien zusammen gestellt. Zu jeder Antriebstechnologien werden die Vor- und Nachteile kurz genannt, sowie aktuelle Probleme erwähnt. Diese Tabelle 4 hat nicht den Anspruch eines komplexen und detaillierten Vergleichs hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Aspekte der verschiedenen Antriebsarten zu geben. Damit soll dem Leser lediglich ein allgemeines Verständnis der aktuellen Herausforderungen gegeben werden. Für weitere Informationen wird auf die Lektüre von (Jochem, Poganietz, & Grunwald, 2013) verwiesen.

Tabelle 4: Vergleich ausgewählter Antriebstechnologien

Antriebstechnik	Vorteile	Nachteile	Probleme
<b>ICE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausgereifte Technologie</li> <li>▪ Vollständig kommerzialisiert</li> <li>▪ Bessere Leistung</li> <li>▪ Einfache Bedienung</li> <li>▪ Zuverlässig und langlebig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringe Effizienz</li> <li>▪ Schlechter Kraftstoffverbrauch</li> <li>▪ Schädliche Emissionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kraftstoffeinsparung</li> <li>▪ Schädliche Emissionen</li> <li>▪ Hohe Abhängigkeit von Erdölprodukten</li> </ul>
<b>BEV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hocheffizient</li> <li>▪ Sehr emissionsfrei</li> <li>▪ Unabhängigkeit von Erdölprodukten</li> <li>▪ Reibungsloser Betrieb</li> <li>▪ Kommerzialisiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrenzte Reichweite</li> <li>▪ Höhere Aufladezeit</li> <li>▪ Schlechtes dynamisches Verhalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grösse und Gewicht der Batterien</li> <li>▪ Fahrzeugleistung</li> <li>▪ Infrastruktur Ladestation</li> </ul>
<b>Hybrid BEV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Emissionsarm</li> <li>▪ Lange Fahrstrecke</li> <li>▪ Zuverlässig und langlebig</li> <li>▪ Kommerzialisiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kostspielig</li> <li>▪ Komplexes System</li> <li>▪ Mehrere Komponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leistungsmanagement</li> <li>▪ Grösse und Gewicht des Batteriepacks und des ICE</li> <li>▪ Integration von mehreren Komponenten</li> </ul>
<b>FCV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extrem emissionsarm</li> <li>▪ Energieeffizient</li> <li>▪ Unabhängigkeit von Erdölprodukten</li> <li>▪ Hohe Reichweite</li> <li>▪ Geringe Wartung</li> <li>▪ Kurze Betankungszeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Kosten</li> <li>▪ Schwere Drucktanks</li> <li>▪ Noch nicht kommerzialisiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kosten der Brennstoffzelle</li> <li>▪ Unklare Zykluslebensdauer</li> <li>▪ Infrastruktur nicht vorhanden</li> </ul>

*Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Rashid, 2018)*

Die Anzahl der Wasserstofffahrzeuge mit Brennstoffzelle und ihre Anwendungsbereiche wachsen stark. Aus Anhang 10-XVI kann entnommen werden, dass bis 2021 elf Fahrzeughersteller FCV im Angebot haben wollen. Ausgeführte Fahrzeuge und Konzepte bestehen bereits für Gabelstapler, Personenwagen (PW), Kleinbusse, Busse, Lastkraftwagen (LKW), Schienenfahrzeuge, Traktoren, Spezialfahrzeuge und viele mehr. In den folgenden Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Fahrzeuge (PW & LKW) kurz thematisiert und direkt mit anderen Antriebstechnologien verglichen.

### Personenwagen

Die Entwicklungsfortschritte der Brennstoffzellentechnologie in den letzten Jahren führten zu den ersten Serienproduktionen von PWs, Hyundai ix35 FCEV (2015), Toyota Mirai (2016) und Honda Clarity (2017) (Stand 2017). Alle drei Fahrzeuge sind als dominanter Brennstoffzellenantrieb ausgeführt, mit Leistungen der Brennstoffzelle von 100 bis 114 kW. Als Brennstoffzellentyp wird die PEM - Brennstoffzelle verwendet (vgl. Kapitel 3.3.2). Die zusätzliche Batterien weisen nur geringe Kapazitäten von weniger als 2 kWh auf. Der Treibstoff wird bei hohem Druck von rund 700 bar in einem Tank als gasförmiger Wasserstoff gespeichert. Die gespeicherten 5 bis 6 kg Wasserstoff ermöglichen Reichweiten von 500 bis 600 km, welche durchaus mit konventionellen Diesel- oder Benzin- Fahrzeugen (ICE) verglichen werden können (vgl. Kapitel 3.3.3). Auch bei niedrigen Temperaturen bleibt die Leistung und Reichweite annähernd konstant. Die Daten der Fahrzeuge sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. (Klell, Eichseder, & Trattner, 2018)

Tabelle 5: Vergleich ausgewählter FCV

Fahrzeug	Hyundai ix35 FCEV	Toyota Mirai	Honda Clarity
Leistung Brennstoffzelle (kW)	100	114	103
Leistung Elektromotor (kW)	100	113	130
Kapazität Akkumulator (kWh)	0,95	1,59	1,73
H2-Tankinhalt (kg)	5,63	4,92	5,46
Reichweite (km)	594	502	589
Betankungsdauer (min)	< 3	< 3	< 3
Anschaffungspreis	€ 68'000 (Österreich)	\$ 57'500 (Kalifornien)	\$ 369 /Monat – Leasing (Kalifornien)

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

FCV weisen gegenüber Batteriefahrzeugen (BEV) Vorteile wie grössere Reichweiten, geringere Betankungsdauer und dadurch mehr Komfort auf. Die genannten FC-PW sind jedoch auf Grund der hohen Anschaffungskosten nicht wettbewerbsfähig gegenüber BEV und ICE. Der Grund für die hohen Investitionskosten liegt hauptsächlich bei den noch geringen Stückzahlen der Produktion.

Sowohl bei den FCV als auch bei den ICE treten Verluste auf, so dass die theoretischen Wirkungsgradwerte nicht erreicht werden. Tendenziell gilt, dass BEV und FCV vor allem im Stadtbetrieb einen Wirkungsgradvorteil gegenüber ICE aufweisen. Eine Analyse des Hyundai ix35 FCV zeigt Wirkungsgrade um 43%, ein Vergleich mit baugleichen ICE ergibt Werte um 22 und 24%. Das World Electric Vehicle Journal (Matsunaga, Fukushima, & Ojima, 2009) berichtete bereits im Jahr 2009 von Japanischen Herstellern mit Brennstoffzellensystemen, die im Stadtzyklus Gesamtwirkungsgrade der Fahrzeuge bis 60% erreichen. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

### Lastkraftwagen

Bis jetzt befindet sich die Brennstoffzellentechnologie für leichte und schwere Nutzfahrzeuge nur in Konzept- und Prototypenausführungen. Nach aktuellem Kenntnisstand sind derzeit nur zwei FC-LKW im Betrieb. Der erste ist der Coop ESORO Truck (Factsheet Coop Esoro Truck, 2016) in der Schweiz. Ausserdem plant Hyundai zusammen mit H2 Energy noch in diesem Jahr (2019) weitere FC-LKW in die Schweiz zu liefern (vgl. Kapitel 3.4.1). Der zweite ist der FC-LKE von Toyota, der derzeit im Hafen von Los Angeles im Einsatz ist (Hawkins, 2017). Andere LKW-Hersteller haben ebenfalls eigene FC-LKW (VDL, Scania, Nikola Motors und Kenworth) angekündigt. (Çabukoglu, Georges, & Küng, 2019)

Das Positionspapier «Wasserstoffmobilität in der Schweiz» (BFE, 2016) hält fest: *«Hohe Energiedichte – Potenzial für nachhaltige Mobilität bei schwereren Fahrzeugen Brennstoffzellensysteme mit Wasserstoff erreichen deutlich höhere Energiedichten als batterieelektrische Systeme. Damit kommt der Wasserstoffmobilität (mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen) in Teilbereichen der Mobilität – insbesondere bei schwereren Fahrzeugen mit grösserer Reichweite sowie für den Einsatz bei Bussen und Lastfahrzeugen – eine Bedeutung zu.»*

Prinzipiell kann für die Entwicklung von Anwendungen im LKW auf die umfangreichen Erfahrungen mit Bussen zurückgegriffen werden. In einer vom Fraunhofer ISI & IML (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017)

durchgeführten Befragung, betonen die Expertinnen und Experten, dass die Zuverlässigkeit der Brennstoffzellen nach den Erfahrungen mit Projekten von FC-Bussen sehr hoch ist. Die Lebensdauer einer Bus-Brennstoffzelle ist dabei vergleichbar mit der von ICE Bussen, etwa 800'000 km. ICE Busse werden alle zwölf Jahre ausgetauscht, das scheint auch für FC-Busse erreichbar. Die Konkurrenzfähigkeit besteht dem entsprechend. Bis heute kann auch festgestellt werden, dass FC-LKW die Leistungen ebenfalls konkurrenzfähig erbringen, wobei gesagt werden muss, dass es keine Langzeiterfahrungen gib. Bei Batterie-Bussen müssen die Batterien nach Auskunft der Experten bereits zur Hälfte der Reichweite (ca. 250'000 km) ausgetauscht werden und stellen damit einen limitierenden Faktor dar. Brennstoffzellen arbeiten deutlich länger und sind im Betrieb konstanter. Deshalb werden BZ-Busse bei Demonstrationsprojekten von den beteiligten Busbetrieben gut angenommen (vgl. Kapitel 3.4.1 PostAuto). Die Demonstrationsprojekte laufen erst seit zwei bis drei Jahren. Um verlässliche Aussagen betreffend der Lebensdauer und Reichweite abschliessend zu machen, ist es daher noch zu früh. Hier gilt es zuerst, weitere Erfahrungswerte zu sammeln. (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017)

(Gnann, Kühn, & Plötz, 2017) stellt fest, dass die eigentliche Herausforderung für die Entwicklung der FC-LKW nicht die Brennstoffzellen an sich darstellen, sondern die Speicherung von ausreichenden Mengen an Wasserstoff. Das Volumen des eingesetzten Wasserstofftanks unterscheidet sich dabei je nach Anwendungsfall und steigt bei grösser werdenden Gewichtsklassen deutlich an. Je nach Anwendungsfall gibt es hierbei Schwierigkeiten, die Tanks in das Fahrzeug zu integrieren. Dies führt entweder zu niedrigerer Reichweite oder geringeren Ladeflächen, was wiederum reduzierte ökonomische Werte bedeuten würde.

Bis heute gibt es noch keine Langzeiterfahrungen zum Einsatz von FC-LKW. Für die Schwerlast ist unklar, ob und wie der Ersatz von Diesel überhaupt möglich ist. In einer Studie der ETH Zürich (Çabukoglu, Georges, & Küng, 2019) wurde diese Fragestellung untersucht. Es werden die folgenden Ergebnisse für Brennstoffzellenantriebssysteme aufgezeigt:

- Würde jeder Schweizer LKW mit grünem Wasserstoff fahren, würde dies über 8 TWh Strom aus erneuerbaren Energien (13% des nationalen Verbrauchs) benötigen. Das entspricht z.B. einer Fläche von rund 60 km<sup>2</sup> Photovoltaikmodulen mit 1.5 GW Spitzenleistung.
- Theoretisch ist dies möglich, vorausgesetzt, die Fahrzeuge können tagsüber betankt werden.
- Die Reichweite von FC-LKW ist im Allgemeinen besser, als bei BEV-Systemen und das ohne signifikante Gewichtszunahme.
- Die Betankung der FC-LKW könnte mehr als eine halbe Stunde dauern, was eine dichte Betankungsinfrastruktur erfordert, welche in der Lage ist, Hunderte von Fahrzeugen parallel zu betanken, um Wartezeiten zu vermeiden.
- Wasserstoff ist technisch gesehen ein sehr attraktives Dekarbonisierungsmittel für schwere Nutzfahrzeuge, aber es können erhebliche Investitionen erforderlich sein, um sicherzustellen, dass (a) die Wasserstoffherzeugung wirklich erneuerbar ist und (b) die Fahrzeuge tagsüber einen angemessenen Zugang zu Tankanlagen haben.

### 3.3.4 Weitere Anwendungen von Wasserstoff

Wasserstoff gilt als einer der vielversprechendsten Energieträger für die Zukunft. Es handelt sich um einen hocheffizienten, umweltfreundlichen Brennstoff, der für Transport, Heizung und Stromerzeugung eingesetzt werden kann. (Zohuri, 2019)

Wasserstoff ist ein Molekül mit einem enorm breiten Anwendungsbereich. Es wird derzeit in vielen Branchen eingesetzt, wie zur Stromspeicherung, Wärmeproduktion und in der Industrie: von der Chemie

und Raffination bis hin zur Metallurgie, Glasherstellung und Elektronik. Es wird in erster Linie als Reaktionsmittel eingesetzt. Aber auch als Brennstoff in der Raumfahrt, bei der Wärmebehandlung von Metallen sowie wegen seiner niedrigen Viskosität und Dichte wird er eingesetzt. Derzeitig ist eine vermehrte Verwendung von Wasserstoff in verschiedenen Industriezweigen auf der ganzen Welt zu beobachten. Wegen der zunehmenden Verwendung von schwereren Rohölen mit höheren Schwefel- und Stickstoffanteilen, wächst der Bedarf an Wasserstoff in der Erdölraffinerieindustrie zur Erfüllung strenger Emissionsnormen sehr schnell. (Zohuri, 2019) Wasserstoff kann ebenfalls verwendet werden für:

- Verbrennungsmotoren
- Antrieb von Raumschiffen
- Zeppeline und Luftschiffe
- Wasserstoff-Fusionsbombe
- Schiffe, Flugzeuge und Züge
- Gabelstapler
- Motor- und Fahrrad

In der Abbildung 4 sind verschiedene Anwendungen von Brennstoffzellensysteme auf einer «Technology Readiness Levels» (TRL) -Skala aufgetragen. Die Bewertung wurde von Shell Deutschland Oil GmbH in ihrer «Hydrogen Study» (Adolf, Fishedick, & Arnold, 2017) erstellt. Es ist zu beachten, dass es sich dabei um eine Bewertung aus dem Jahr 2017 handelt. Nach heutigem Stand dürften die LKW einen TRL von 7-8 haben, da Hyundai ein marktreifes Produkt hat (vgl. Kapitel 3.4.1).

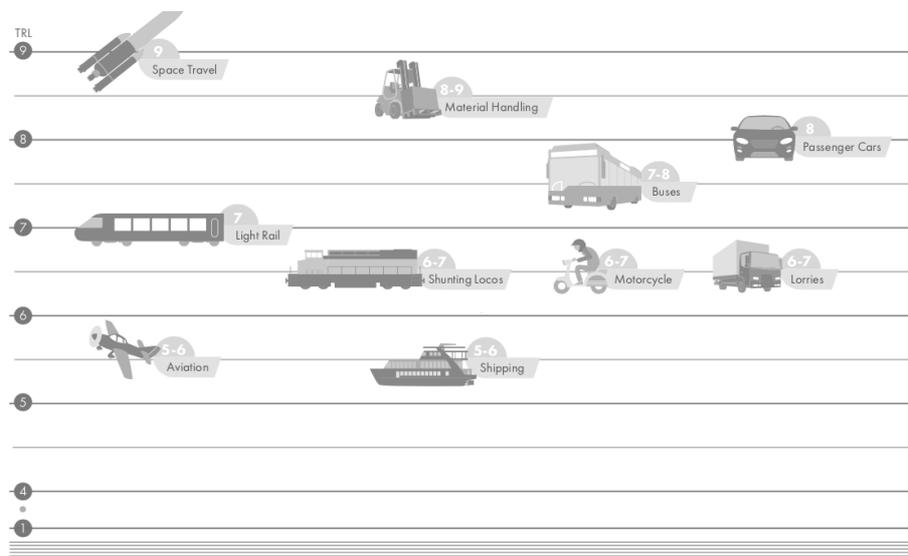


Abbildung 4: TRL von Brennstoffzellenanwendungen

Quelle: (Adolf, Fishedick, & Arnold, 2017)

### 3.3.5 Infrastruktur

Die Gesamtzahl, das Interesse und das Angebot an Wasserstofffahrzeugen wächst weltweit (vgl. Abbildung 6). Entsprechend steigt auch der Bedarf nach der Infrastruktur, die benötigt wird, um den Bedarf dieser Nachfrage decken zu können. Aufgrund der geringen Dichte des Wasserstoffs stellen Speicherung und Transport, bei ausreichender Energiedichte, technische und wirtschaftliche Herausforderungen dar. In diesem Kapitel wird die grundlegende Thematik der Wasserstoffinfrastruktur, sprich die verschiedenen Möglichkeiten der Verteilung und Speicherung, besprochen. Insgesamt bestehen bei Transport und

Speicherung Ähnlichkeiten zwischen den gasförmigen Brennstoffen Wasserstoff und Erdgas (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018).

### **Speicherung**

Elektrische Energie wird in Industrieländern mehrheitlich in Grosskraftwerken und zunehmend auch in dezentralen kleineren Anlagen erzeugt und über ein Verbundnetz an die Verbraucher verteilt. Im Gegensatz zum Gasnetz, besitzt das Stromnetz keine eigene Speicherfähigkeit. Folglich muss elektrischer Strom praktisch immer zum Zeitpunkt des Verbrauchs erzeugt werden. Der massive Zubau von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien, führte zu einer stark fluktuierenden Stromproduktion, speziell in Deutschland, aber auch zunehmend in der Schweiz. Ab einem gewissen Anteil fluktuierender, erneuerbarer Energien an der Erzeugung, reicht auch ein ideal ausgebautes Stromnetz nicht mehr aus, um die erzeugten Energiemengen zu jedem Zeitpunkt aufnehmen zu können. Für die Nutzung der überschüssigen Energiemengen ist dann ein zeitlicher Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch notwendig. Für die grosstechnische Speicherung elektrischer Energie, stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die sich in ihrer Kostenstruktur, in ihren Potentialen und ihrer Effizienz unterscheiden. Eine viel versprechende Technologie ist die Nutzung von Wasserstoff zur Speicherung elektrischer Energie. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Speicherung von verdichtetem Wasserstoff in einem geschlossenen System auf lange Zeit ohne Verluste erfolgen kann. (Kuhn, Kühne, & Heilek, 2014)

Im Vergleich zu anderen Formen potentieller Energiespeicher (z.B. Pumpspeicherwerke oder Druckluftspeicherwerke), lässt die hohe spezifische Energiedichte von Wasserstoff die Speicherung grosser Energiemengen zu. Wasserstoff kann als Druckgas, als Flüssigkeit, in einer chemischen Verbindung oder physikalisch in Strukturen wie Metallhydriden oder Kohlenstoff-Nanofasern gespeichert und transportiert werden. Die Lagerung kann in verschiedenen Grössenordnungen erforderlich sein: in Fahrzeugen, an Wasserstofftankstellen (HRS), in Produktionszentren und als strategische Reserve. (Ekins, 2010) Die Rückumwandlung in elektrische Energie ist durch Verbrennung in speziellen Gas-und-Dampf-Kraftwerken oder durch Brennstoffzellen denkbar. Bei beiden Umwandlungsmethoden fallen keine klimaschädlichen Emissionen an. (Kuhn, Kühne, & Heilek, 2014)

Eine in der Literatur oft beschriebene Speichervariante für Wasserstoff sind Salzkavernen, die seit vielen Jahren erfolgreich zur Speicherung von Erdgas eingesetzt werden. Mit Speichervolumen von 500'000 m<sup>3</sup> könnten bei Drücken zwischen 60 und 180 bar an die 5 Mio. kg Wasserstoff gespeichert werden. Andere Optionen zur Speicherung von grossen Mengen Wasserstoff bieten Erdgas- oder Erdöllagerstätten, stillgelegte Bergwerke oder Aquiferstrukturen. Die spezifischen Investitionskosten für die Speicher in Salzkavernen (0.09 €/kWh) sind damit deutlich niedriger, als die spezifischen Speicherkosten für andere Technologien, insbesondere anderer Stromspeicher. Die niedrigen Speicherkosten erlauben eine saisonale Speicherung. Damit kann diese Art des Speichers, Kurzzeitspeicher (z.B. Batterien) sinnvoll ergänzen (Kuhn, Kühne, & Heilek, 2014)

Der Gesamtnutzungsgrad des Wasserstoffspeichersystems wird gemäss (Kuhn, Kühne, & Heilek, 2014) aus den Nutzungsgraden der Einzelkomponenten bestimmt. Wenn bei der alkalischen Elektrolyse ein Nutzungsgrad von rund 65% angenommen wird, für den Gas-und-Dampf-Kraftwerk-Prozess 60% und bei der Verdichtung 97%, beträgt der Gesamtwirkungsgrad des Speichersystems etwa 38%. Durch weitere Entwicklungsschritte ist eine Erhöhung auf 45% denkbar. (Kuhn, Kühne, & Heilek, 2014)

### **Pipelineverteilung**

Wasserstoff kann wie Erdgas als Flüssigkeit oder als Gas transportiert werden. Im Unterschied zu Erdgas ist beim Wasserstoff in beiden Fällen ein grösserer Energieaufwand notwendig, was auf die niedri-

gere volumetrische Energiedichte und die niedrigere Verflüssigungstemperatur zurückzuführen ist. Erdgas wird heute grösstenteils über Pipelines transportiert. Dabei werden in den Leitungen typische Verluste von 0.1 bar/km erreicht. Wird davon ausgegangen, dass die Druckverluste für Wasserstoff und Erdgas in etwa gleich sind, dann kommt es durch die deutlich niedrigere volumetrische Energiedichte des Wasserstoffs spezifisch zu deutlich höheren Verlusten beim Wasserstoff. Wird der Wasserstoff aber verflüssigt, erhöht sich die volumetrische Energiedichte etwa um den Faktor 100. Dadurch bieten sich ganz andere Transportmöglichkeiten an, insbesondere bei Transporten über grosse Strecken, wie z.B. eines transkontinentalen Wasserstofftransports. Der Transport verflüssigten Erdgases (LNG) ist schon heute eine viel eingesetzte Form des Erdgastransportes (Bsp.: in Japan und Südkorea). Das Problem ist, dass sich Wasserstoff in einem meist mehrstufigen Verfahren erst bei  $-252.9\text{ °C}$  verflüssigt. Bereits jetzt hat sich in vielen industriellen Zentren ein Wasserstoffverteilnetz etabliert, das eine Vielzahl von (meist industriellen) Kunden mit Wasserstoff versorgt. Ein Netz dieser Art findet sich zum Beispiel im Ruhrgebiet, mit einer Länge von 240 km. Das längste Wasserstoff-Pipelinennetz befindet sich in Texas und versorgt dort Raffinerien und Ammoniakproduzenten. Diese Beispiele belegen, dass auch eine Verteilung durch Pipelines von Wasserstoff machbar ist. (Hamacher, 2014)

### **Tankwagenverteilung**

Gasförmiger Wasserstoff kann in kleinen bis mittleren Mengen in Druckgasbehältern per LKW transportiert werden. Für den Transport grösserer Mengen Wasserstoff werden mehrere Hochdruck-Wasserstoff-Flaschen in einem Schutzrahmen gebündelt. Die Tanks sind in der Regel aus Stahl gefertigt und haben ein hohes Eigengewicht, welches wegen dem hohen Gewicht zu Transportbeschränkungen führen kann. Die neuesten Druckspeichersysteme verwenden leichtere Verbundlagerbehälter für den LKW-Transport. (Hamacher, 2014)

Die geringe Dichte von Wasserstoff wirkt sich auf diese Transportvariante aus: Ein Rohranhänger kann Druckgas nicht so kompakt speichern, dass die gleiche Energiedichte erreicht wird, wie sie ein Tankwagen für flüssige Kraftstoffe (Benzin oder Dieselmotorkraftstoff) erreicht. Das bedeutet, dass das verfügbare Tankvolumen für Wasserstoff pro Tankwagen, im Vergleich zu Benzin oder Dieselmotorkraftstoff, geringer ist. Die grössten Tankmengen für den gasförmigen Wasserstofftransport liegen derzeit bei 26 Kubikmetern. Unter Berücksichtigung des niedrigen Wasserstoffdichtefaktors bei 500 bar, ergibt sich daraus eine Gewichtsbelastung von rund  $1'100\text{ kg}$  Wasserstoff pro LKW. (Hamacher, 2014) & (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018) Der Transport von Wasserstoff mit LKW ist bei grösseren Mengen und Distanzen aufwändig und teuer ist (Stolten, Grube, & Mergel, 2012). Der Vorteil von LKW-Transportern ist die Unabhängigkeit von einer fest installierten Pipeline, die grosse Investitionskosten und lange Bauzeiten voraussetzt, der flexible Einsatz und die schrittweise aufbaubare Integration in das Versorgungssystem.

### **Wasserstofftankstellen**

Tankstellen für Wasserstoff (HRS) sind mit Erdgastankstellen zu vergleichen. Bei solchen Gastankstellen wird der Kraftstoff (in Form von Wasserstoff oder Erdgas) in grossen Druckbehältern bei Drücken um 40 bar gelagert. Das Gas wird auf hohe Drücke verdichtet und in Hochdruckbehältern zwischengespeichert. Um die hohen Drücke (500 bis 900 bar) zu erreichen, die für Speicherung erforderlich sind, werden zur Verdichtung von Wasserstoff meist elektrische, mehrstufige Kolbenkompressoren eingesetzt. Nach dem Ankuppeln der Tankstelle ans Fahrzeug, erfolgt ein Druckstoss zur Dichtheitsprüfung, ist diese erfolgreich, wird das Gas vom Hochdruck-Zwischenspeicher in den Fahrzeugtank gefüllt. Dabei erwärmen sich das Gas und der Tank, in kommerziellen Anlagen wird daher der Wasserstoff gekühlt eingefüllt. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Ein wichtiger Aspekt der Tankinfrastruktur ist die Betankungsdauer. Die Betankung eines Fahrzeugs mit gasförmigem Wasserstoff erfolgt innerhalb weniger Minuten. Bei einer Befüllung fliessen rund 5

kg Wasserstoff in 5 min, daraus resultiert eine Betankungsleistung von 2 MW (600 MJ / 300 s). Dieser Wert ist durchaus mit der Betankung bei Benzin oder Diesel zu vergleichen und übersteigt klar die Möglichkeiten einer Batterieaufladung. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

Im Gegensatz zu herkömmlichem Erdgas besteht die Möglichkeit, dass Wasserstoff Vorort, bei der Tankstelle, direkt produziert wird. Dies wurde zum Beispiel, zu 90%, bei der PostAuto Tankstelle in Brugg (vgl. Kapitel 3.4.1) gemacht. Dafür braucht es eine Elektrolyseanlage, um den Wasserstoff zu erzeugen. Wird dieser vom Netz ausserhalb eines Kraftwerks bezogen, fallen Netznutzungskosten für den Stromtransport an. Im Gespräch mit (Bach, 2019) wurde diese Option unter den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen als schwierig umsetzbar eingestuft, da sie als nicht wirtschaftlich betrachtet wird.

### 3.3.6 Sicherheit in der Anwendung von Wasserstoff

Es gibt keine absolute Sicherheit. Der Umgang mit Energieträgern welcher Art auch immer (Öl, Gas, Kohle, Uran, Strom, usw.), ist stets mit Gefahren verbunden. Es liegt in der Natur der Energie, dass die unbedachte Freisetzung zu Schaden führen kann. Das ist bei Wasserstoff nicht anders. Gefahren müssen durch sachgemässes und vernünftiges Verhalten minimiert werden. Ziel dieses Kapitel ist es, aufzuzeigen, wie gefährlich Wasserstoff im Vergleich zu anderen, etablierten Energieträgern wie Öl oder Erdgas ist und ob die Risiken zumutbar sind. (Schmidtchen & Wurster, 2014)

Die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff birgt Gefahren für die Öffentlichkeit, was aber immer der Fall ist, bei der Verwendung von brennbaren Materialien. Aktuell wird Wasserstoff hauptsächlich, auf Grund des Anwendungsgebietes, von hoch qualifizierten Spezialisten gehandhabt. Damit Wasserstoff sicher in der Öffentlichkeit eingesetzt werden kann, müssen ungeschulte Menschen in der Lage sein, mit Wasserstoff mit dem gleichen Vertrauen und ohne grössere Risiken umzugehen, wie mit konventionellen Kraftstoffen. Grundvoraussetzung ist das Verständnis der wichtigsten risikorelevanten Eigenschaften von Wasserstoff, zumal sich der Charakter von Wasserstoff stark von anderen Kraftstoffen unterscheidet, was je nach Situation schädlich, aber auch günstig sein kann. Der sichere Umgang mit Wasserstoff könnte durch Normen und Standards geleitet werden, die bereits vorhanden sind. (Lemke, 2016)

Bei Standardtemperatur und -druck ist Wasserstoff ein farbloses, geruchloses, geschmackloses, nicht sichtbares, ungiftiges, nicht reizendes, leichtflüchtiges und leicht brennbares Gas. Aufgrund seiner sehr niedrigen Molekularmasse vermischt sich austretender Wasserstoff sehr schnell mit der Umgebungsluft. Eine Wasserstoffflamme strahlt hauptsächlich im UV-Spektrum, so dass die Flamme bei Tageslicht nahezu unsichtbar ist. Dies steht im starken Gegensatz zur Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Kraftstoffen. Im Freien bildet sich Wasserstoff und Luft kaum zu einem explosiven Gemisch. In Innenräumen kann dies aber der Fall sein. (Lemke, 2016)

Ausserdem ist die laminare Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff hoch im Vergleich zu anderen Treibstoffen. In der Praxis kommt es zu einer turbulenten Flammenausdehnung, bei der hohe Geschwindigkeiten erreicht werden. Bei Vergleichen von brennenden Autos (Müller-Syring, 2010) zeigte sich, dass sich der Wasserstofftank innerhalb von Minuten, durch eine Stichflamme entleert. Im Gegensatz dazu entleert sich das Benzin auf den Boden und bildet brennende Flächen, durch die das gesamte Auto ausbrennt. Der Schaden durch die Wasserstoffflamme ist deutlich begrenzter. Den Rettungskräften wird empfohlen, im Falle eines Unfalls mit einer Wärmebildkamera die Wasserstoffflamme zu erkennen. (Lemke, 2016)

Diese Risiken können mit angepasster Technologie, Normen und Standards gut bewältigt werden. Unter dem Aspekt der Sicherheit gibt es keinen Grund, auf die Verwendung von Wasserstoff als Energieträger zu verzichten. (Schmidtchen & Wurster, 2014)

### **3.4 Wasserstoffmarkt**

---

Weltweit werden rund 50 Mio. Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugt und verbraucht, was mit einem Energiegehalt von knapp 6 EJ (bzw. 1.7 PWh) gut 1% des globalen Gesamtenergieverbrauchs entspricht. Etwa 40% des benötigten Wasserstoffs stammen aus Industrieprozessen, bei denen Wasserstoff als Nebenprodukt anfällt, und zwar aus der Herstellung von Chlor mittels der Chlor-Alkali-Elektrolyse, aus Rohölraffinerieprozessen wie der Benzinreformierung, sowie aus der Herstellung von Ethen oder Methanol. Etwa 60% des benötigten Wasserstoffs werden eigens erzeugt, wobei grosstechnisch die Herstellung von Wasserstoff derzeit zu 95% aus fossilen Kohlenwasserstoffen (wie Methan und Propan) erfolgt, nur zu 5% aus Wasser durch Elektrolyse. (Klell, Eichlseder, & Trattner, 2018)

In den folgenden zwei Kapiteln werden die Marktentwicklungsaktivitäten der Schweiz und von ausgewählten Projekten weltweit dargestellt. Ziel dieser zwei Kapitel ist es, aufzuzeigen wie sich der Wasserstoffmarkt aktuell entwickelt und welche Aktivitäten im Gang sind. Zusätzlich soll eine Grundlage für spätere Analysen geschaffen werden, bei welchen die thematisierten Projekte relevant sind.

#### **3.4.1 Marktentwicklungsaktivitäten Schweiz**

Auf Schweizer Strassen verkehren erst einige Dutzend Personenwagen, die Wasserstoff als Treibstoff nutzen, es gibt zwei Wasserstofftankstellen. Zusätzlich dazu gibt es einen LWK, wie bereits im Kapitel 3.3.3 besprochen, ist dies einer der ersten weltweit. In diesem Kapitel werden die fünf wichtigsten Projekte und Marktentwicklungsaktivitäten für die Wasserstoffmobilität der Schweiz besprochen.

##### **Tankstelle Coop in Hunzenschwil**

Im Jahr 2016 hat der Detailhändler Coop in Hunzenschwil die erste öffentliche HRS der Schweiz eröffnet und gleichzeitig den weltweit ersten mit Wasserstoff betriebenen Lastwagen und zwölf FCV in die eigene Wagenflotte aufgenommen. Der für den Antrieb notwendige Wasserstoff wird am wenige Kilometer entfernten Laufwasserkraftwerk der IB Aarau, in Aarau durch die H2 Energy AG produziert. (Coop, 2016)

Ursprünglich wollte Coop für dieses Projekt eine Kooperation mit Axpo, einem der grössten schweizerischen Produzenten von erneuerbaren Energien, eingehen. Diese kam aber nicht zustande. Dafür sprang dann die H2 Energy AG ein, ein Schweizer Projektierungsunternehmen, an dem Coop eine Minderheitsbeteiligung hält (Hydrogeit, 2017). Coop will mit diesem Projekt, gemäss eigener Aussage, die Initialzündung geben und dazu beitragen, dass eine zukunftsweisende Technologie den Durchbruch schafft. Indem Coop die HRS in der Schweiz eröffnet, einen ersten Wasserstoff-Lastwagen und zwölf FCV einsetzt, sorgt Coop für Angebot und Nachfrage in der Wasserstoffmobilität. (Coop, 2016)

##### **Joint Venture «Hyundai Hydrogen Mobility»**

Hyundai und H2 Energy gründeten im April 2019 ein gemeinsames Joint Venture (JV), mit dem Zweck damit eine führende Rolle in der Einführung der Wasserstoffmobilität in der Schweiz zu übernehmen. In einer ersten Phase wird Hyundai Motor dem neuen JV zwischen 2019 und 2025 insgesamt 1'600 schwere, mit Wasserstoff betriebene LWKs zu liefern. Einen grossen Teil davon wird das neue JV für die Mitglieder des Fördervereins H2 Mobilität Schweiz (vgl. Kapitel 3.4.1) einsetzen. Zudem ist eine Tochtergesellschaft geplant, die Wasserstoff produzieren und zu den Tankstellen zu liefern soll. (H2 Energy, 2019)

In einer zweiten Phase will das JV seine Marktpräsenz auf weitere europäische Länder ausdehnen. Auf längere Sicht strebt Hyundai eine führende Stellung auf dem europäischen Markt der CO<sub>2</sub>-neutralen Nutzfahrzeuge an. (H2 Energy, 2019)

Die H2 Energy AG verfügt in der Schweizer Wasserstoffwirtschaft über branchenweite Kompetenzen, die sich auf die Produktion und Versorgung mit Wasserstoff, auf die Tankstellen, deren Infrastruktur, die Beschaffung von Brennstoffzellenfahrzeugen und weitere Bereiche erstrecken. Zudem bietet das Schweizer Unternehmen Beratungen und Lösungen an, die auf dem firmeneigenen Know-how, Infrastruktur, Marktpräsenz und Netzwerk aufbauen. (H2 Energy, 2019)

### **Projekt Brennstoffzellenpostauto & Schweizer Wasserstofftankstelle**

PostAuto war mit dem Projekt «Brennstoffzellenpostauto & Schweizer Wasserstofftankstelle» Partner im EU-Projekt «Clean Hydrogen in European Cities» (CHIC). Das Ziel von CHIC ist die vollständige Kommerzialisierung von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellenbussen, durch intensiven Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur. Das Projekt hatte ein Budget von 81'956'227 € und umfasste 26 Brennstoffzellenbusse, welche im täglichen öffentlichen Verkehr eingesetzt wurden. PostAuto hat in Zusammenarbeit mit der EU und nationalen Partnern ein Projekt mit 5 Brennstoffzellenbussen und einer Wasserstofftankstelle in Brugg (CH) umgesetzt. (FCH JU, 2019) & (Krieger, 2017)

Die obersten Ziele des 5-jährigen Projektes waren der Aufbau von Know-how rund um die Wasserstoffmobilität, das Aufzeigen, dass Mobilität ohne fossile Treibstoffe funktioniert und der Einsatz von Brennstoffbussen als Alternative im öffentlichen Verkehr. Die Fahrzeuge hatten einen Einkaufspreis von 1.2 Millionen Euro pro Fahrzeug. Dazu kamen 600'000 Euro für ein Servicepaket, das die Wartung und Instandhaltung der Fahrzeuge für 5 Jahre umfasste. Diese Fahrzeugpreise sollen, so sagt es eine FCH JU Studie (Berger, 2015), in den kommenden Jahren deutlich reduziert werden. (Krieger, 2017)

Im Betrieb mit den fünf Brennstoffzellenbussen konnten wertvolle Erfahrungen im täglichen Betrieb gesammelt werden. Es gab bei den Fahrzeugen unterschiedliche Herausforderungen. Die Fahrzeuge wurden bereits mit technischen Problemen angeliefert. Einige technische Probleme wurden behoben, andere sind bis Projektende geblieben. Allgemein war auffällig, dass nicht die wasserstoffführenden Bauteile Probleme machten, sondern die damals schon durch die Diesel-Hybrid-Technologie bekannten Hochvoltbauteile. Das Fazit von PostAuto ist, dass die Technologie noch nicht ausgereift ist, der Betrieb aber möglich ist. (Krieger, 2017)

Die Produktion des Wasserstoffs erfolgte zu 90% vor Ort mittels eines Elektrolyseurs. Der Elektrolyseur erreichte 98.75% Verfügbarkeit. Der durchschnittliche Stromverbrauch betrug rund 130'000 kWh/Monat. Die restlichen 10% des Wasserstoffs stammten aus der Anlieferung per Trailer durch die Fa. Cabb in Schweizerhalle. Dort wird bei der Herstellung von Chlor über die Chlor-Alkali-Elektrolyse Wasserstoff als Nebenprodukt erzeugt. Dieser wurde auf bis zu 200 bar verdichtet und zur Wasserstofftankstelle in Brugg geliefert. Probleme bei der Bereitstellung des Wasserstoffs machte nur der Kompressor, der die 400 bar im Hochdruckspeicher erzeugte. Gemäss PostAuto hatte dieser einen sehr auffälligen und instabilen Betrieb mit 93% Wirkungsgrad. Die Investitionskosten der gesamten Wasserstofftankstelle betrug 2.2 Millionen Franken. Das PostAuto-Fazit HSR ist, dass gewisse Bauteile noch sehr pannen anfällig sind (Kompressor), und noch viel Know-how für den Betrieb benötigt wird. Es wird empfohlen den Wasserstoff als Massenprodukt einzukaufen und auf einen eigenen Betrieb der Tankstelle zu verzichten. Für Wasserstoff als Massenprodukt wird eine Preisspanne von 7.5 bis 10 CHF/kg-H<sub>2</sub> angegeben. (Krieger, 2017)

PostAuto schlussfolgert in ihrem Abschlussbericht, dass das gesamte Projekt ein Erfolg war. Es konnte gezeigt werden, dass Brennstoffzellen ein funktionierender Ersatz für Dieselsebusse darstellen. Die Alternative, rein batteriebetriebene Busse, sind für die geforderten Reichweiten im öffentlichen Verkehr noch nicht ausreichend. Ein mögliches Szenario für die PostAuto ist, dass sich batteriebetriebene Busse und Brennstoffzellenbusse den Markt aufteilen: Für kurze Strecken batteriebetriebene Busse und für längere Strecken Brennstoffzellenbusse. (Krieger, 2017)

Abschliessend ist zu erwähnen, dass der Fahrzeughersteller EvoBus (Daimler Buses) während der Projektlaufzeit seine Strategie änderte. Der für 2017 angekündigte Brennstoffzellenbus wurde auf nach 2020 verschoben, auch konnten die Ersatzteilversorgung nur noch für zwei Jahre nach Projektende garantiert werden. Folglich hat sich PostAuto entschieden, das Projekt nach Ende der Laufzeit nicht zu verlängern. (Krieger, 2017)

### **Projekt «move»**

Im dem Projekt «move», dem Future Mobility Demonstrator, will das Forschungsinstitut Empa in Zusammenarbeit mit Partnern aus Forschung, Wirtschaft und öffentlicher Hand zeigen, wie die Mobilität der Zukunft ohne fossile Energie funktionieren könnte. «move» zeigt exemplarisch den gesamten Pfad auf, wie sich überschüssige erneuerbare Elektrizität für die Mobilität nutzen lässt, in Form von Wasserstoff, synthetischem Methan und in Netzbatterien. Beim Wasserstoff wird sowohl die reine Nutzung als Treibstoff, wie auch die Beimischung zu Erdgas/Biogas betrachtet. (Bach, move., 2019)

Die Aktivitäten der ersten Phase starteten im Jahr 2014 und wurden im Jahr 2017 abgeschlossen. Sie betraf die Realisierung einer Power-to-Gas-Anlage mit lokaler Wasserstoffherzeugung durch einen PEM-Elektrolyseur, sowie eine 35 MPa HRS und eine CNG-Tankstelle. Die Wasserstoffproduktions- und Betankungsanlage wurde 2015 fertiggestellt und in Betrieb genommen. Anhand von Messungen am Demonstrator wurden verschieden Analysen durchgeführt. Im Rahmen von Nachfolgeprojekten ist die Erweiterung der Anlage durch eine Methanisierung (Phase 2) und einen Netzspeicher (Phase 3) geplant. In Phase 2 soll aus einem Teil des produzierten Wasserstoffs und aus CO<sub>2</sub>, welches aus der Luft gewonnen wird, synthetisches Methan hergestellt werden. Die dritte Phase sieht eine Ergänzung der bereits installierten Elektroladesäule durch einen vorgelagerten elektrochemischen Speicher vor. (Bach, Brügger, & Cabalzar, Schlussbericht: Future Mobility Demonstrator – Phase 1, 2017)

### **Förderverein H2 Mobilität Schweiz**

Der Förderverein H2 Mobilität Schweiz setzt sich selbst das Ziel, in der Schweiz ein flächendeckendes Netz an Wasserstofftankstellen aufzubauen. Die Gründungsmitglieder (Agrola AG, AVIA Vereinigung, Coop, Coop Mineraloel AG, fenaco Genossenschaft, Migrol AG und der Migros-Genossenschaftsbund) gründeten im Mai 2018 den Verein, um den Aufbau der Wasserstoffmobilität in der Schweiz aktiv zu fördern und zu beschleunigen. Damit wollen die Mitglieder einen Beitrag zur Erreichung der CO<sub>2</sub>-Ziele im Strassenverkehr leisten. In den Jahren 2018 und 2019 schlossen sich weitere Unternehmen (SOCAR Energy Switzerland GmbH, Emil Frey Group, Shell, Galliker Transport & Logistics, Camion Transport, G. Leclerc Transport, F. Murpf und Tamoil) dem Verein und dessen Ziel an. Ziel des Vereins ist der Aufbau eines kosten- und flächendeckenden Netzes von Wasserstofftankstellen in der Schweiz bis im Jahre 2023. (Förderverein H2 Mobilität Schweiz, 2019)

Der Vorteil des Förderverein ist, dass ein Teil der Vereinsmitglieder selbst über grössere Flotten an Nutzfahrzeugen mit einer grossen jährliche Fahrleistung verfügt und auch über eigene Tankstellen. Die Mitglieder betreiben zusammen ein Netz von mehr als 1'500 Tankstellen und haben einen Fahrzeugpark von mehr als 1700 schweren Nutzfahrzeugen. Damit verfügen sie über die Standorte, die Infrastruktur und die Verbraucher, um das HRS Netz systematisch aufzubauen und zu nutzen. Dies stellt ein grosses

Potenzial dar, mit wenigen Verbrauchern viel Wasserstoff umsetzen zu können. (Förderverein H2 Mobilität Schweiz, 2019)

### 3.4.2 Marktentwicklungsaktivitäten weltweit

In diesem Kapitel wird die weltweite Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität anhand von vier Ländern, die in der Umsetzung voranschreiten, beschrieben. Ein Überblick über verschiedene Förderprogramme und Marktentwicklungsaktivitäten ist in Abbildung 5 zu finden. Die anschließend besprochenen Länder, bzw. Staaten, welche auch die bedeutendsten Kernmärkte sind, sind Deutschland, Kalifornien, Japan und Südkorea. Eine Übersicht in Zahlen über die vier besprochenen Kernmärkte, aber auch von den angekündigten Zielen, Visionen und Projekten ist am Schluss dieses Kapitels in einer Timeline zusammen gestellt (vgl. Abbildung 6).

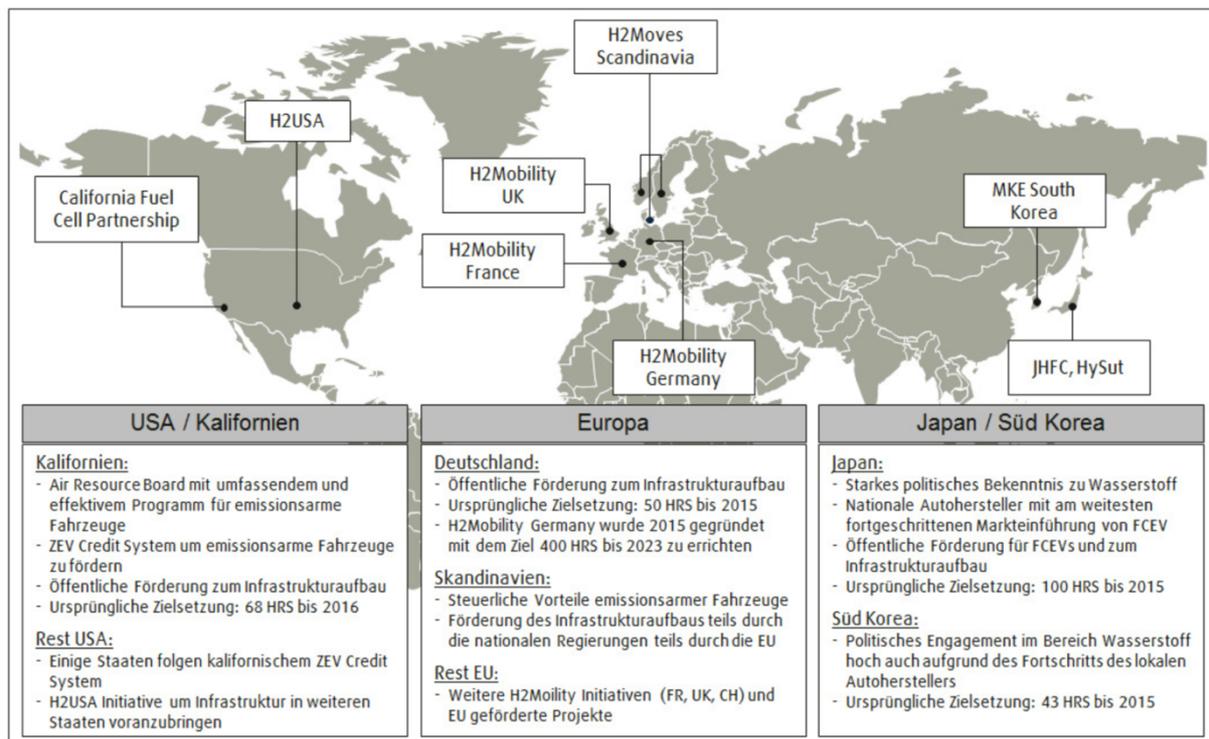


Abbildung 5: Marktentwicklungsaktivitäten

Quelle: (Bielmeier, 2016)

#### Deutschland

Die initiale Bemühung der Markteinführung der Wasserstoffmobilität fing in Deutschland im Jahr 2002 mit der Gründung der «Clean Energy Partnership» (CEP) an. Die CEP ist ein Leuchtturmprojekt von Politik und Industrie der mittlerweile 19 Partner angehören. Seit 2008 gehört das Projekt auch dem «Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie» (NIP) an, welches 2006 initiiert wurde und bis zum Jahr 2016 mit Finanzmitteln in Höhe von 1.4 Mrd. € ausgestattet wurde. (Bielmeier, 2016)

Die Initiative arbeitet an der Umsetzung eines Geschäftsmodells für den Aufbau einer flächendeckenden Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur in ganz Deutschland. Ziel der Initiative war es, die Markteinführung von Brennstoffzellenfahrzeugen mit einer entsprechenden Infrastruktur für HRS vorzubereiten. Im September 2009 startete die branchenweite H2-Mobility-Initiative im Rahmen einer Studie zur Entwicklung von Szenarien für eine Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland. Auf Basis dieser Studie hat H2-

Mobility in einer zweiten Phase die Erfolgsaussichten eines Infrastrukturaufbaus und mehrerer Geschäftsmodelle bewertet und einen Zeitplan für die Umsetzung entwickelt. Im Jahr 2013 wurde die dritte Vorbereitungsphase gestartet. Es handelt sich dabei um die Verhandlung der Partner über die Gründung eines Joint Ventures, die Umsetzung des Geschäftsmodells und die Investitionen in den Infrastrukturaufbau. Diese Phase endete mit der Gründung des Joint Ventures Anfang 2015. (Töpler & Lehmann, 2016)

Ziel ist es vor allem, die Infrastruktur der HRS in Deutschland für die Nutzung von FCV zu schaffen, konkret sind 400 HRS bis 2023 und eine Gesamtinvestition von rund 350 Mio. EUR geplant (Linde, 2019). Ein weiterer wichtiger Aspekt der Initiative ist es, weitere H2-Mobilitätsprojekte sowie die Wasserstoffinfrastruktur in anderen europäischen Ländern zur Förderung und zu initiieren. Die CEP befasst sich mit der Produktion von Wasserstoff, Infrastruktur (Ausbau Tankstellennetz und technische Standards), sowie den Fahrzeugen (Optimierung der Effizienz und Zuverlässigkeit, sowie der Kundenakzeptanz). (Bielmeier, 2016)

### Kalifornien

Mit rund 1.99 Millionen Neuwagenverkäufen im Jahr 2018 (CNCDA, 2018) ist Kalifornien der grösste Automarkt innerhalb der USA und damit für alle Automobilhersteller von zentraler Bedeutung. Bereits im Jahre 1990 wurde in Kalifornien das Regelwerk «Low Emission Vehicles» (LEV) und «Zero Emission Vehicles» (ZEV) lanciert (State of California, 2014). Mit den ZEV Regularien sollten die Automobilhersteller motiviert werden, PKWs mit wenig CO<sub>2</sub>-Ausstoss auf den Markt zu bringen. Die Regularien beinhalten ein Creditsystem, mit dem durch die Produktion von CO<sub>2</sub>-armen Fahrzeugen die Produzenten Kreditpunkte erhalten. Schafft es ein Automobilhersteller nicht, die erforderlichen «ZEV Credits» im jeweiligen Jahr zu generieren oder durch Kredite aus vergangenen Jahren zu erbringen, wird eine Strafzahlung von \$5'000 je fehlendem Punkt fällig. Es gibt aber noch die Möglichkeit, diese «ZEV Credits» zwischen den Automobilherstellern zu handeln was z.B. Tesla Motors im ersten Quartal 2015 \$51 Millionen eingebracht hat. Im Zeitraum von 2009 bis 2017 wurden verschiedene Anpassungen an den Regularien vorgenommen, welche Technologien, die näher an der Marktreife sind (z.B. Batteriefahrzeuge), mit weniger «ZEV Credits» belohnen, als Technologien, welche für die zukünftige Markteinführung noch stark weiterentwickelt werden müssen, wie es bei dem FCV der Fall ist. (Bielmeier, 2016)

Im Zuge, der von der kalifornischen Regierung verabschiedeten Assembly Bills wurden zwei neue Förderprogramme geschaffen: das «Alternative and Renewable Fuel and Vehicle Technology Program» (ARF VTP), sowie das «Air Quality Improvement Program» (AQIP). Das ARF VTP hat ein Jahresbudget von \$100 Millionen und hat einen gezielten Fokus auf den Ausbau der Betankungsinfrastruktur. Wobei davon wiederum jährlich 20% in den Ausbau eines HRS-Netzwerkes investiert werden müssen, bis 100 öffentliche HRS in Kalifornien verfügbar sind. Dies führt zu einer staatlichen Förderquoten von ca. 50% bis 70% für HRS. Das zweite Programm hat Mittel in der Höhe von \$20 bis 25 Millionen zur Verfügung und fokussiert sich hauptsächlich auf CO<sub>2</sub>-arme Fahrzeuge. (Bielmeier, 2016)

Tabelle 6: Marktentwicklung USA und Kalifornien

FCV	USA	6'547
Brennstoffzellenbusse	Kalifornien	30
HRS	Kalifornien	39
HRS (im Bau)	Kalifornien	25

\*Stand 1. Mai 2019

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (CAFCP, 2019)

Erfahrungen und Erkenntnisse aus den Marktentwicklungsaktivitäten in Kalifornien zeigen, dass insbesondere Genehmigungsaspekte zu Verzögerungen in der Implementierung neuer HRS führten. Auch die im Zuge der Förderung durchgeführte jährliche Umfrage unter den Automobilherstellern zeigte reduzierte Erwartungen in Bezug auf die FCV. Der aktuelle Stand (Mai 2019) des HSR-Netzausbaus und der FCV in Kalifornien sind in der Tabelle 6 zu finden. (Bielmeier, 2016)

## **Japan**

Japan, als eine der Kernregionen für Wasserstoffmobilität, zeichnet sich durch vielseitige F&E Aktivitäten aus. Im Jahr 2002 startete das staatlich geförderte «Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project» (JHFC), welche bis 2005 dauerte (JHFC, 2019). Die Ziele waren die Erforschung und Sicherung der Technologie entlang der gesamten Supply Chain, insbesondere die hohe Energie-Effizienz der Brennstoffzellen. Es sollte eruiert werden, ob Wasserstoffmobilität in «Well-to-Wheel» einen technologischen Fortschritt und positiven Beitrag leisten kann. Nachdem diese Phase erfolgreich verlief, wurden in einem zweiten Schritt die Untersuchungen in grössere Regionen, Flotten und mehr HRS ausgeweitet. Ausserdem starteten Bestrebungen, Regulierungen und Standards für die Technologien zu entwickeln oder anzupassen. In der abschliessenden Phase des Programms kam die Aufgabe hinzu, den gesellschaftlichen Nutzen der Technologie zu demonstrieren, sodass Adoptionsbarrieren bei den Endkunden abgebaut werden. (Bielmeier, 2016)

2008 wurde die «Fuel Cell Commercialization Conference of Japan» (FCCJ) veröffentlicht, eine Roadmap für den Weg zur Kommerzialisierung der Wasserstoffmobilität bis ins Jahr 2015 (FCCJ, 2015). Dabei wurde ein Infrastrukturaufbau ab 2015 forciert, dem über die folgenden 10 Jahre eine zunehmende Anzahl von FCV im Markt folgen soll. Für das Jahr 2025 waren 1'000 HRS und ca. 2 Millionen FCVs anvisiert. Diese FCCJ Roadmap erhielt im Jahr 2011 Unterstützung von 13 japanischen Unternehmen die ankündigten, dass sie bis 2015 eigene FCV in den Markt bringen und dies mit dem Bau von 100 HRS zu fördern (Toyota, 2011). Diese Tankstellen wurden von der japanischen Regierung zu 50% subventioniert (je nach Grösse der HRS zwischen 1.4 Mio. € und 2.1 Mio. €). (Bielmeier, 2016)

Bei der Umsetzung der Pläne treten auch in Japan ähnliche Probleme wie in den anderen Kernmärkten auf. Insbesondere in den Metropolregionen stellt der Platzbedarf der HRS ein Problem dar. Ausserdem sind die technischen Standards und genehmigungsseitigen Anforderungen in Japan trotz aller vorangegangenen Bemühungen nach wie vor sehr hoch. Dies führt einerseits zu deutlich höheren Kosten als in anderen Regionen und andererseits zu einer Verzögerung im Aufbau der angekündigten 100 HRS. (Bielmeier, 2016) Nichtsdestotrotz verfügt Japan (Stand 2018) über etwa 90 Stationen und weitere 10 befinden sich in der Planungs- oder Bauphase (Reuters, 2018).

## **Südkorea**

Südkorea wird in der Literatur als einer der aussichtsreichsten «Fast Follower» Märkte beschrieben. Grund dafür ist der politische Rahmen, den die Regierung in der Vergangenheit etabliert und Ende 2015 mit einem neuen Fünfjahresplan ambitioniert erneuert hat (Bielmeier, 2016). Auch ist in Südkorea mit Hyundai-Kia einer der in der Wasserstofftechnologie aktivsten Fahrzeughersteller beheimatet und hat mit einem nationalen Marktanteil von 77% starken Einfluss (Marklines, 2019).

Mit dem «Domestic Fleet Program» wurden von 2006 bis 2011 mit Förderung durch die koreanische Regierung mehr als 100 FCVs und 4 FC-Busse im Markt getestet. Ausserdem wurde die Anzahl der HRS auf 13 erhöht. Mit den so gewonnenen Erkenntnissen hat die koreanische Regierung Wasserstoff als wesentliche, neue Bereiche für kohlenstoffarmes, grünes Wachstum identifiziert. Im Dezember 2015 hat Südkorea ein neues Förderprogramm für die Jahre 2016 bis 2020 präsentiert, welches insbeson-

dere darauf abzielt, die Anzahl umweltfreundlicher Fahrzeuge auf einen Marktanteil von 20% am Neuwagenmarkt im Jahr 2020 zu erhöhen (In-Soo Nam, 2015). Um das zu erreichen, wird die Entwicklung von grünen Fahrzeugen, wie auch die Ausweitung der erforderlichen Betankungsinfrastruktur gefördert. Neben der Förderung von Forschung und Entwicklung (ca. \$ 130 Mio.), sollen dafür ca. 22'000 € pro Fahrzeug als direkter Kaufanreiz für Brennstoffzellenfahrzeuge bereitgestellt werden. Mit diesen Massnahmen, will die Regierung 80 HRS und 9'000 FCVs im Jahr 2020 erreichen. (Bielmeier, 2016)

<b>2018</b>	Total: 12'952 FCV, 376 HRS					
<b>2019</b>	Korea: 35 H2-Buse					
<b>2020</b>	California: 13'400 FCV	China: 5'000 FCV, 100 HRS	Deutschland: 100 HRS	Hydrogen Mobility Europa Project: 1'400 FCV, 49 HRS	Japan: 40'000 FCV, 160 HRS	Spanien: 500 FCV, 20 HRS
<b>2022</b>	Korea: 81'000 FCV, 310 HRS					
<b>2023</b>	California: 37'400 FCV, 94 HRS	Europa: 291 Buse	Frankreich: 5'000 FCV, 100 HRS	Schweiz: 1'000 H2-LKW, 100 HRS		
<b>2025</b>	California: 200 HRS	China: 50'000 FCV, 300 HRS	Europa: min. 747 HRS	Deutschland: 400 HRS	Japan: 200'000 FCV, 320 HRS	
<b>2028</b>	Frankreich: 20'000- 50'000 FCV, 400 - 1'000 HRS					
<b>2030</b>	California: 1'000'000 FCV, 1'000 HRS	China: 1'000'000 FCV, 1'000 HRS	Deutschland: 1'000 HRS	Hydrogen Council vision Global: 10-15 Mio FCV & 500'000 LKW	Japan: 800'000 FCV	
<b>2040</b>	Korea: 5'900'000 FCV PW, 120'000 FCV Taxi, 60'000 Buse, 120'000 LKW, 1'200 HRS					
<b>2050</b>	Hydrogen Council Vision Global: 400 Mio. FCV & 15-20 Mio LKW, 5 Mio Buse					

Abbildung 6: Angekündigte Ziele, Visionen und Projekte in Zahlen.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (IEA, 2018)

### 3.5 Staatliche Steuern und Abgaben

Als Grundlage und um die steuerliche und rechtliche Situation der Wasserstoffmobilität in der Schweiz darzustellen, sind in diesem Kapitel die relevanten staatlichen Steuern und Abgaben für den Verkehr thematisiert. Dabei wurde versucht, speziell jene Steuern und Abgaben zu identifizieren, die von relevanter Bedeutung für die Wasserstoffmobilität sind.

#### 3.5.1 CO<sub>2</sub> - Emissionsvorschriften

Neben den CO<sub>2</sub>-Abgaben (seit 2018 beträgt die Steuer CHF 96.- pro Tonne CO<sub>2</sub> und fällt für fossilen Brennstoffe wie Heizöl oder Erdgas an, betrifft den Verkehr aber nicht (BAFU, 2019)), gibt es ein zweites staatliches Instrument zur Erreichung der gesetzlichen Klimaschutzziele. In der Schweiz gelten die CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue PWs. Diese wird im Jahr 2020 für leichte Nutzfahrzeuge erweitert. In den nächsten zwei Unterkapiteln wird diese Lenkungsabgabe für die PWs und LKW separat besprochen. (BAFU, 2019)

#### Neue Personenwagen

Seit Juli 2012 gelten in der Schweiz CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue PWs, eine Vorschrift die analog wie in der EU erstellt wurde. Seit 2015 dürfen neue PWs im Durchschnitt höchstens 130 Gramm

CO<sub>2</sub> pro Kilometer ausstossen, dies entspricht einem Durchschnittsverbrauch von ca. 5.6 Liter Benzin pro 100 km (im Vergleich, die CO<sub>2</sub>-Vorgabe der EU betrug im gleichen Zeitraum 120 g CO<sub>2</sub>/km (BFE, 2017)). Diese Zielvorgabe gilt bis Ende 2019. Ab 2020 gilt für Personenwagen ein Zielwert von 95 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer. Des Weiteren werden CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften ab 2020 auch für LKWs eingeführt (vgl. Kapitel 3.5). In der Pflicht stehen die Schweizer Fahrzeugimporteure. Auf Basis des Zielwerts, muss die Flotte jedes Importeurs eine individuelle Zielvorgabe einhalten. Überschreitet er diese, wird eine Sanktion fällig. Diese gesetzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue PW und LKW sollen kontinuierlich verschärft werden. (BAFU, 2019)

Im Jahr 2018 wurde vom Bundesrat ein Bericht über die Auswirkungen der Sanktion auf die Jahre 2012 bis 2015 veröffentlicht. Es konnte gezeigt werden, dass die Zielvorgaben, von 130 Gramm CO<sub>2</sub> pro Kilometer, von den Importeuren nicht vollumfänglich erreicht wurden. Nachdem die Schweizer Autoimporteure diesen durchschnittlichen Zielwert in den Jahren 2015 bis 2016 nicht erreicht hatten, verfehlten sie ihn mit rund 134.1 g CO<sub>2</sub>/km auch im Jahr 2017. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von neuen Personenwagen stiegen 2017 gegenüber 2016 sogar leicht (um 0.4%) an. Die Überschreitungen wurde mit Sanktionen in der Höhe von rund 2.9 Millionen Franken gebüsst. Von der nächsten Verschärfung der Zielvorgabe (per 2020), sind die Importeure durchschnittlich noch rund 40 g CO<sub>2</sub>/km entfernt. (Der Bundesrat, 2018)

Es ist nicht klar, wie die Importeure auf die Sanktionen reagieren werden und wo der Markt sich letztlich einpendeln wird. Es aber davon auszugehen, dass die Massnahmen der EU einen unterstützenden Mitnahmeeffekt haben. Je nach Szenario geht die Studie (BFE, 2017) davon aus, dass im Jahr 2030 neuimportierte PW im Schnitt noch 70 g CO<sub>2</sub>/km haben. Ohne diese Massnahme würde dieser Wert zwischen 95 und 100 g CO<sub>2</sub>/km liegen. Dies soll vor allem durch Effizienzsteigerung der Fahrzeuge erreicht werden. (BFE, 2017)

### **Neue Lieferwagen und leichte Sattelschlepper**

Unter leichten Nutzfahrzeugen (LNF) werden Fahrzeuge zum Sachentransport verstanden, deren zulässiges Gesamtgewicht 3.5 Tonnen nicht übersteigt. Die übrigen Sattelschlepper gehören zu den schweren Motorwagen und sind von der Massnahme ausgenommen. Im Jahr 2015 wurden total 1'085 Sattelschlepper neu in Verkehr gesetzt, davon waren 109 leichte Sattelschlepper. LNF sind bezüglich Fahrzeugbestand und CO<sub>2</sub>-Emissionen von deutlich geringerer Bedeutung als die Personenwagen. Sie machen rund 6% des Gesamtverbrauchs von Benzin und Diesel aus. LNF-Bestand und Neuzulassungen sind aber namentlich in den letzten Jahren stetig angestiegen.. (BFE, 2017)

Mit der Annahme des ersten Massnahmenpakets der Energiestrategie 2050 gelten ab 2020 CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue LNF. Wie bei den neuen Personenwagen werden die Importeure von LNF verpflichtet, ab 2020 die CO<sub>2</sub>-Emissionen ihrer Fahrzeugflotte im Durchschnitt auf 147 Gramm pro Kilometer zu senken. Die Umsetzung erfolgt grundsätzlich analog zu den PW. Dem Importeur wird eine individuelle Zielvorgabe auf der Grundlage des durchschnittlichen Ziels von 147 g CO<sub>2</sub>/km auferlegt. Erreicht ein Importeur die individuelle Zielvorgabe mit seiner Fahrzeugflotte nicht, fällt pro Gramm CO<sub>2</sub>-Emission über dem Zielwert und pro Fahrzeug ein Sanktionsbetrag an. Damit wird ein Schritt in Richtung Gleichbehandlung verschiedener Fahrzeugkategorien gemacht. (Der Bundesrat, 28)

Eine weitere, schrittweise Verschärfung der Sanktionen auf LNF, wie es bei den PWs der Fall ist, konnte nicht gefunden werden. Gemäss (Bach, 2019) ist davon auszugehen, dass bis 2030 LNF den CO<sub>2</sub>-Ausstoss um 30% reduzieren müssen. Sollte dies umgesetzt werden, schätzt er, dass rund 20% der LNF CO<sub>2</sub>-neutral sein werden. Die Studie (BFE, 2017) geht davon aus, dass der durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Ausstoss der neuen LNF von rund 200 g CO<sub>2</sub>/km (Stand 2015) bis 2030 um rund 40% auf 120 g CO<sub>2</sub>/km

reduziert wird. In der Studie wird aber von 5% LNF CO<sub>2</sub>-Neutral LNF bis 2030 ausgegangen. Diese 5% sind nur von BEV-LNF, der Anteil FCV soll 0% sein. (BFE, 2017)

### 3.5.2 Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe

Die leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA) wird in der Schweiz seit 2001 erhoben. Sie wird auf dem ganzen Schweizer Strassennetz erhoben und gilt für inländische und ausländische Fahrzeughalter. 2015 betrugen die Nettoeinnahmen aus der LSVA 1'457 Milliarden Franken. Der Abgabe unterliegen Fahrzeuge mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3.5 Tonnen und betrifft den Personen- und Gütertransport. Fahrzeuge für den Personentransport werden pauschal, Fahrzeuge für den Gütertransport leistungsabhängig besteuert. Die LSVA wird nach dem höchstzulässigen Gesamtgewicht, den gefahrenen Kilometern und den Schadstoffwerten des Zugfahrzeugs berechnet. Es gibt drei Kategorien, die unterschiedlich besteuert werden. Am höchsten ist die Abgabe in der Kategorie 1, die Lastwagen mit dem grössten Schadstoffausstoss umfasst. Während die 3. Kategorie die modernen Fahrzeuge beinhaltet, die am geringsten belastet werden. Seit dem 1. Juli 2012 erhält diese 3. Kategorie einen Rabatt von 10%, um über diesen Anreiz eine raschere Flottenerneuerung zu fördern. Eine Übersicht der Abgabekategorie und der Tarife ist in Tabelle 7 zu finden.

Tabelle 7: Übersicht der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe

Abgabekategorie	Eurokategorie	Tarif
1	EURO 3, 2, 1, 0	3.10 Rp./tkm
1*	EURO 2, 3	2.79 Rp./tkm
2	EURO 4, 5	2.69 Rp./tkm
3	EURO 6	2.28 Rp./tkm

\* Tarif bei Fahrzeugen mit einem Partikelfiltersystem

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EZV, 2019)

Mit dem Rechenbeispiel der Tabelle 8 wird die Relevanz der verschiedenen Kategorien, anhand eines 40-Tonnen-LKW auf der Strecke von Basel – Chiasso (rund 300 km) verdeutlicht. Im Durchschnitt über die drei Kategorien wird eine LSVA von rund 327 Franken für diese Strecke bezahlt. LKW der Kategorie 3 (EURO 6) bezahlen rund 26% weniger LSVA als die Fahrzeuge der Kategorie 1. Dies ist ein signifikanter Wert und zeigt die Bedeutung der LSVA für den Schwerverkehr. Gemäss (Bach, 2019) machen LSVA und Mineralölsteuer gegen 50 % der Vollkosten des LKW aus. LKW mit einem elektrischem Antrieb (zu denen auch FC-LKW gehören) ist zurzeit von der LSVA-Abgabepflicht befreit. (EZV, 2019)

Tabelle 8: Vergleichs- und Beispielrechnung LSVA

Abgabekategorie		1	2	3
Gewicht	[t]	40	40	40
Tarif	[Rp./t km]	3.10	2.79	2.28
Distanz	[km]	300	300	300
Kosten	[CHF]	372	334.8	273.6
Reduktion zu Kat. 1	[%]	-	10%	26%

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (EZV, 2019)

### 3.5.3 Weitere Abgaben und Steuern

Die **Motorfahrzeugsteuern** werden von den Kantonen erhoben und basieren auf unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen. In den meisten Schweizer Kantonen basiert diese jährliche Steuer für Personewagen auf dem Hubraum oder dem Gewicht, aber auch andere Kombinationen kommen vor. Diverse

Kantone gewähren für sparsame und emissionsarme Fahrzeuge wie Elektro-, Hybrid-, Brennstoffzellen- oder Energieeffizienzklasse A- und B-Fahrzeuge sowie für Fahrzeuge mit Alternativtreibstoffen wie Erdgas, Biogas und Wasserstoff eine Reduktion auf der Motorfahrzeugsteuer (BFE, 2019). Für einen VW Golf 1.4 TSI Comfortline DSG mit 92 kW Leistung (E-Kategorie D) und Gesamtgewicht von 1'780 kg beträgt die Motorfahrzeugsteuer im kantonalen Durchschnitt rund CHF 330.-. Für das Elektroauto Tesla Model S 75 D liegt der kantonale Durchschnitt bei CHF 279.-. (TCS, 2018)

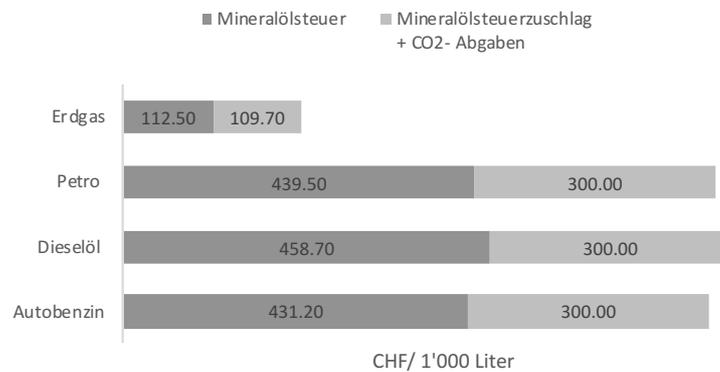


Abbildung 7: Steuersätze gemäss Mineralölsteuerverordnung

\*Angaben je 1'000 Liter bei 15 °C, Mineralölsteuergesetz (MinöStG) vom 21.6.1996 (SR 641.61)

Quelle: (EFD 641.612, 2017)

In der Schweiz ist die **Mineralölsteuer** eine spezielle Verbrauchsteuer, mit der Mineralöle besteuert werden. Diese Steuer erhebt der Bund auf Rohöl, andere Mineralöle, Erdgas und die aus ihrer Verarbeitung gewonnenen Produkte sowie auf Kraftstoffe, für die ein zusätzlicher Mineralölzuschlag erhoben wird. Die Mineralölsteuer wird durch Art. 131 Abs. 1 Bst. e und Abs. 2 BV Mineralölsteuergesetz vom 21. Juni 1996 (MinöStG) geregelt. Damit die Mineralölsteuer auf den Verbraucher überwältigt werden kann, wird die Steuerpflicht auf der Handelsstufe angesetzt. Die Höhe der Steuer variiert je nach Produkt (Brennstoff, Treibstoff, technische Zwecke) und dessen Verwendung. Die Steuerbelastung ist in Abbildung 7 zu sehen. (EFD 641.612, 2017)

Seit Juli 2008 werden zudem Steuererleichterungen für biogene Treibstoffe gewährt, sofern die vom Bundesrat festgelegten ökologischen und sozialen Mindestanforderungen erfüllt sind. Auf Wasserstoff wird keine Mineralölsteuer erhoben. (EFD 641.612, 2017)

Die **Automobilsteuer** in der Schweiz ist ähnlich wie die Mehrwertsteuer eine Besteuerung des Wirtschaftsverkehrs und damit eine Verbrauchssteuer. Die Steuer wird vom Bund auf PKW und LKW erhoben und beträgt einheitlich 4 Prozent des Fahrzeugwertes (Art. 13 AStG). Gemäss Art. 12 AStG sind Elektro-Automobile vom Bundesrat ganz oder teilweise befreit worden. Für Wasserstoff betriebene Fahrzeuge ist noch keine Steuerreduktion vorgesehen. (AStG 641.51, 2017)

### 3.6 The Automotive Deployment Options Projection Tool

Das ADOPT wurde entwickelt, um die Auswirkungen von Verbesserungen der Fahrzeugtechnologie auf den Erdölverbrauch und die Treibhausgasemissionen abzuschätzen. ADOPT ist ein von dem «U.S. Department of Energy's Vehicle Technologies Office» finanziertes Stock-Flow Model, welches die dynamischen Auswirkungen der Antriebstechnologieentwicklung auf den zukünftigen Verkauf von Fahrzeugen, den Erdölverbrauch und die Treibhausgasemissionen simuliert. Es verwendet Techniken aus dem Logit-Verfahren (Regressionsanalysen), um den Fahrzeugverkauf zu prognostizieren. Insbesondere wird der Absatz basierend auf dem gewichteten Wert der wichtigsten Attribute wie Fahrzeugpreis,

Kraftstoffkosten, Reichweite und historische Entwicklungen geschätzt. Wobei sich diese Attribute nichtlinear über den betrachteten Zeitraum entwickeln. Für mehrere Attribute wird eine Verteilung um den Mittelwert verwendet, um die Heterogenität der Verbraucher darzustellen. Die Mehrheit der bestehenden Fahrzeugmarken und -modelle ist als Datenbank hinterlegt, um den US-Markt vollständig zu repräsentieren. In einem zukünftigen Update sollen die Daten in verschiedene Regionen aufgeteilt werden können, um die Schwankungen der Kraftstoffpreise, Einkommensklassen und Infrastrukturausbau zu erfassen und zu bewerten. (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015)

Während die Verbraucher bei der Entscheidung für ein neues Fahrzeug viele verschiedene Fahrzeugattribute berücksichtigen können, geht ADOPT davon aus, dass ihre endgültige Entscheidung in erster Linie von wenigen Schlüsselfaktoren bestimmt wird. Die Bedeutung dieser Attribute variiert je nach Einkommen, zeitlichen Entwicklungen und historischen Absätzen. Die meisten der bestehenden Fahrzeugmodelle wurden berücksichtigt, um eine umfassende Validierung und eine vollständige Marktdarstellung zu ermöglichen. Das Flow-Stock-Model von ADOPT verwendet die Verkäufe, um den Kraftstoffverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu ermitteln. Zusätzlich werden Aspekte, wie die Änderung der gefahrenen Fahrzeugleistung (durch altern), der Einführung neuer Fahrzeugmodelle und der Ausschussrate, berücksichtigt. Es gibt verschiedene zeitbasierte Annahmen mit denen die Szenarien individuell beschreiben werden können. ADOPT hat, wie zuvor erwähnt, eine integrierte Datenbank, die teils auf eigenen Annahmen und Prognosen aufbaut. Andere Prognosen beruhen auf externen Zahlen, zum Beispiel beruht die Entwicklung des Kraftstoffpreises auf dem «Annual Energy Outlook» (EIA, 2013). Anschliessend werden die Attribute beschrieben, die für die im Kapitel 5.3 definierten Szenarien relevant sind. Ebenfalls wird die wichtige Sekundärliteratur genannt, für weitere Informationen ist auf (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015) zu verweisen.

### 3.6.1 Kraftstoffpreis

Der Kraftstoffpreis ist eine zentrale Eingabegrösse des ADOPT, da er basierend auf dem Stock-Flow Model, einen direkt Einfluss auf die geschätzten Verkäufe hat, weil ADOPT den Kraftstoffpreis als einen der relevanten Kaufentscheide simuliert (vgl. Abbildung 12: CLD Wasserstoffmobilität Schweiz). Die quantitativen Zahlen der ADOPT Datenbank für die Kraftstoffpreisdaten stammen aus dem «Annual Energy Outlook 2013» (AEO) der «Energy Information Administration» (EIA, 2013). Das für diese Arbeit massgebende Szenario basiert auf der Prognose des «AEO 2013» (EIA, 2013) und beschreibt einen Anstieg des Ölpreises bis 2050. Dies widerspiegelt sich im Benzin-, Diesel- und Strompreis. Im Gegensatz dazu ist der Wasserstoffpreis, welcher auch auf den Prognosen von «AEO 2013» beruht, aber, gemäss (EIA, 2013), nicht an den Ölpreis gekoppelt. Dieser sinkt im Gegensatz zu den fossilen Treibstoffen in den Jahren bis 2050 von rund 9 \$/Kg auf 6 \$/Kg ab. Dieser Trend ist mit der Entwicklung der grundlegenden Technik, Infrastruktur und Skaleneffekten zu begründen. Eine genaue Beschreibung der Baseline ist im Kapitel 5.3.1 zu finden.

### 3.6.2 Technologische Entwicklung

Ein weiteres zentrales Element von ADOPT ist die technologische Entwicklung der verschiedenen Fahrzeugtechnologien und die damit verbundene Auswirkung auf die jeweilige Attraktivität, die Kaufentscheidungen und somit auf die Absatzzahlen.

Die technologische Entwicklung über die Zeit werden auf alle Fahrzeuge in der ADOPT-Datenbank angewendet. Für die Simulation dieser zeitbasierten technischen Entwicklung wurde von (Brooker, Gonder, & Wang, FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance, 2015)

das Excel-Tool « Embedded Future Automotive Systems Technology Simulator» (FASTSim) entwickelt, welches auch in ADOPT integriert ist. FASTSim versucht, zum Beispiel, die Auswirkungen von zunehmenden Leichtbausystemen auf den Wirkungsgrad und die Kraftstoffkosten zu approximieren. Es gibt 30 zeitbasierte Optionen (vgl. Anhang 10-XVII), die im ADOPT die Technologieentwicklung über 35 Jahre beschreiben, dazu gehören (Brooker, Gonder, & Lopp, 2015):

- Batteriepreis
- Motorpreis
- Effizienz des Fremdzündungsmotors
- Effizienz des Kompressionszündungsmotors
- Effizienz des Atkinson-Zyklus-Motors
- Leichtbau
- Wirkungsgrade

## 4 Potentialanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität

---

Ziel dieses Kapitels ist, dem Leser einen Überblick zum Potential der Schweizer Wasserstoffmobilität zu geben. Dafür wird in diesem Kapitel ein Vergleichsmarkt analysiert, um daraus zentrale Erfolgs- oder Risikofaktoren zu erkennen. Darauf aufbauend werden die verschiedenen Treiber und Barrieren der Wasserstoffmobilität besprochen, sowie die wichtigsten Stakeholder Gruppen identifiziert, bewertet und klassifiziert. Anschliessend gibt die durchgeführte PEST-Analyse einen allgemeinen Überblick über die wichtigsten politischen, wirtschaftlichen, soziologischen und technologischen Faktoren der gesamten Automobilindustrie. Mit der Branchenstrukturanalyse wird dann ein gezielter Fokus auf die Wasserstoffmobilität der Schweiz gelegt und die spezifischen Wettbewerbsbedingungen besprochen. Als nächstes wird auf Basis des bis dahin erlangten Wissen, die in der Schweiz aktuell diskutierte Markteinführung der Wasserstoffmobilität durch den Schwerverkehr besprochen. Zum Schluss werden die Erkenntnisse aus diesem Kapitel in Form einer SWOT-Analyse der Wasserstoffmobilität zusammengefügt und umfassend dargestellt.

### 4.1 Analogien und Erkenntnisse aus dem Erdgasfahrzeugmarkt

---

In diesem Kapitel wird der Erdgasfahrzeugmarkt als Vergleichsmarkt für die Wasserstoffmobilität besprochen. Dieser Markt wurde gewählt, da es sich um einen entwickelten Markt handelt, der vergleichbare Treiber und Barrieren hat wie der Wasserstoffmarkt (Adaption der Käufer, fehlende Infrastruktur, neue Technologie). Mit diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, wie sich der Erdgasfahrzeugmarkt in verschiedenen Ländern unter verschiedenen Umständen entwickeln konnte. Dafür wurden Länder ausgewählt, in denen sich der Erdgasfahrzeugmarkt unterschiedlich entwickelt hat. Aufbauend auf diesen Fallstudien wurden die kritischen Erfolgsfaktoren, die wichtigsten Treiber und Barrieren identifiziert.

#### 4.1.1 Wege zur Entwicklung eines Erdgas-Fahrzeugmarktes

Erdgas spielt im Brennstoffmix vieler Länder von der Stromerzeugung bis zur Düngemittelproduktion eine bedeutende Rolle. Auch im Transportsektor vieler Länder spielt Erdgas eine Rolle. Erdgasfahrzeuge (NGV), die komprimiertes Erdgas (CNG) oder verflüssigtes Erdgas (LNG) als Kraftstoff verwenden, existieren als Neuwagen oder nachträglich umgebaute Fahrzeuge. Trotz der bereits in den 1930er Jahren bewiesenen Machbarkeit der NGV-Technologie als Alternative zu Benzin- oder Dieselfahrzeugen, ist die globale Durchdringungsrate nach wie vor niedrig, je nach Schätzung um 2%. (IPCC, 2014)

Heute gibt es mehrere Faktoren, die das Wachstum von NGVs antreiben. Erstens ist die Erdgasproduktion in jüngster Zeit weltweit gestiegen, was das Interesse an der Nutzung von Erdgas im Transportsektor erhöht hat. Mit der Schieferrevolution in Nordamerika wurden die Vereinigten Staaten zum zentralen Exporteur von Erdgas und sollten bis 2022 zum weltweit grössten werden (Ricker, 2018). Darüber hinaus sind die weltweiten Kohlendioxidemissionen des Verkehrssektors auf rund 23% der Gesamtemissionen gestiegen (IPCC, 2014). NGVs mit ihren geringeren Feinstaubemissionen bieten eine Lösung für die zunehmende Bedrohung durch Luftverschmutzung. Während die NGV-Penetrationsrate weltweit niedrig bleibt, wurde in einzelnen Ländern der Einsatz von NGVs vorangetrieben. (Singh, 2019)

Anschliessend wurden fünf Länder mit bedeutenden NGV-Flotten untersucht und gezeigt, was zum bisherigen Wachstum ihres NGV-Marktes führte und welche Analogien zum Wasserstoffmarkt zu identifiziert werden können.

#### NGV Fallstudie Argentinien

In den letzten 20 Jahren verdreifachte Argentinien seinen NGV-Bestand auf 1.6 Millionen Fahrzeuge, u.a. auch dank seines 1984 gestarteten Programms zur Substitution flüssiger Kraftstoffe (Collantes & Melaina, 2011). Der Hauptzweck des Programms war es, mehr Ölressourcen des Landes für den Export

freizusetzen. Die argentinische Regierung konzentrierte sich darauf, günstige CNG-Preise aufrechtzuerhalten und Standards für CNG-Ausrüstung, Fahrzeugumrüstung und Tankstellen festzulegen. Für den Umbau der Taxiflotte in Buenos Aires wurden Kredite verlängert, und die Finanzierung von drei Tankstellen an wichtigen Standorten der Hauptstadt sollte die Angst der Bevölkerung vor der Nutzung von Erdgas als Kraftstoff für den Verkehr zerstreuen. Im Falle Argentiniens blieb der Preisvorteil von CNG gegenüber Diesel und Benzin der stärkste Treiber für den Wechsel von Benzin- oder Dieselfahrzeugen (ICE) zu CNG-Fahrzeugen. Das Wachstum der argentinischen NGV-Flotte beschleunigte sich Anfang der 2000er Jahre, als Argentinien in eine Wirtschaftskrise geriet. Der Preisfaktor wurde jedoch durch die Verknappung der Erdgasversorgung des Landes beeinflusst, was ab 2004 zu einer Stagnation der Flotte führte. Trotz dieser Herausforderungen unterstützt Argentinien weiterhin NGVs mit seinen ersten im Jahr 2019 gelieferten LNG-LKW und plant die Einführung von Einfuhrbestimmungen für CNG-Fahrzeuge. (Singh, 2019)

### **NGV Fallstudie China**

Mit der weltweit grössten NGV-Flotte von 6 Mio. NGV (rund 3.7 Prozent der gesamten Fahrzeuge des Landes) unterstützte China NGV, um die Luftverschmutzung durch Fahrzeuge zu verringern (Wanga, Fanga, & Yua, 2015). China hat 1999 erstmals die Clean Vehicles Action für 12 Demonstrationsstädte eingeführt. Das Programm legte Prozentziele für alternative Kraftstoffe fest, einschliesslich CNG in Bus- und Taxifloten, stellte F&E-Finanzierungen für die Industrie und finanzielle Zuschüsse für Käufer bereit. Bis 2015 regulierte die Regierung die CNG-Preise so, dass sie niedriger waren als bei Benzin. Das Wachstum des NGV-Marktes wurde auch indirekt durch Chinas Bemühungen um den Ausbau der Erdgasinfrastruktur unterstützt, wie beispielsweise durch Gaspipeline-Projekte. Diese Pipelines haben dafür gesorgt, dass auch Provinzen Netzzugang zu Erdgasressourcen haben. Allerdings sind die abgelegenen Gebiete noch weit von diesem Gasnetz entfernt. Ausserdem gibt es Sicherheitsprobleme mit CNG-Fahrzeugen in dichten Städten, dadurch haben einige Städte strenge Auflagen gegen CNG-Umwandlungen eingeführt. Die Zentral- und Kommunalverwaltungen haben in den letzten Jahren Entwicklungspläne zur Förderung von NGVs im öffentlichen Verkehr aufgestellt, den Bau von Betankungsinfrastrukturen unterstützt, finanzielle Unterstützung durch Subventionen und Steuerbefreiungen geleistet und die Beschränkungen der CNG-Umstellung gelockert. Um die Verschmutzung durch Dieselmotoren zu verringern, wurde 2012 LNG für schwere Nutzfahrzeuge eingeführt. China wird voraussichtlich weiterhin ein starker Markt für NGVs sein. In seinem 13. Fünfjahresplan für die Entwicklung von Erdgas (National Development and Reform Commission P.R.C., 2016) hat sich China das Ziel gesetzt, bis 2020 10 Mio. Erdgasfahrzeuge zu bauen und 12'000 Tankstellen für NGV einzurichten. (Singh, 2019)

### **NGV Fallstudie Indien**

Indiens Streben nach NGVs wird durch seine lange Geschichte bei der Bekämpfung der Luftverschmutzung durch Dieselmotoren, insbesondere in städtischen Regionen, bestimmt. Im Jahr 1999 traf der Oberste Gerichtshof Indiens seine Entscheidung, das von der «Environment Pollution Authority» entwickelte Umweltschutzprogramm Delhis zu übernehmen. Zu den wichtigsten Richtlinien des Vorschlags gehörten die Umstellung der Busflotte Delhis auf CNG, die Definition von CNG als zugelassene Art von sauberem Kraftstoff und die Schaffung finanzieller Anreize, um bestehende Autorikshas und Taxis durch solche mit CNG zu ersetzen oder umzurüsten (Mehta, 2002). Dieses Programm wurde die Grundlage für andere Städte ähnliche Anstrengungen zu unternehmen, da der Oberste Gerichtshof Mitte der 2000er Jahre weiterhin stark verschmutzte indische Städte identifizierte. Durch die Berufung auf die verfassungsmässigen Grundsätze des Rechts auf Leben und die Vorsorgeprinzipien für die öffentliche Gesundheit hat der Oberste Gerichtshof auch die Rolle der NGVs bei der Bekämpfung der Luftverschmutzung gefestigt, indem er der CNG-Allokation für den Verkehrssektor Vorrang einräumte. Signi-

fikante Preisvorteile von CNG gegenüber Diesel oder Benzin mit geschätzten 41-62 Prozent und geringere Betriebskosten von rund 20 Prozent sind ein wirtschaftlicher Anreiz für die Verbraucher, auf NGV umzusteigen (Bureau, 2018). Indien steht jedoch weiterhin vor vielen Herausforderungen, darunter Qualitäts- und Sicherheitsrisiken bei der Erdgasumrüstung, eine angespannte Betankungsinfrastruktur mit täglich langen Wartezeiten auf die Fahrzeugbetankung und die Expansion des NGV-Marktes in kleinere Städte ohne die Grössenvorteile, die normalerweise neue, kostspielige Infrastrukturinvestitionen rechtfertigen. Während die indische Regierung weiterhin eine gasbasierte Wirtschaftszukunft fördert, die durch die vom Ministerium für Erdöl und Erdgas im Jahr 2016 gestartete «Gas4India» Kampagne (Government of India, 2016) hervorgehoben wird, wird das potenzielle Wachstum für ihren NGV-Markt durch die Bemühungen der Regierung um eine nachhaltige Erdgasversorgung unterstützt. (Singh, 2019)

### **NGV Fallstudie Iran**

Die iranische Regierung begann zunächst mit der Förderung von NGVs als Reaktion auf die Luftverschmutzung. In die Entscheidung der Regierung, Erdgas zu fördern, sind aber auch andere Gründe eingeflossen. Obwohl der Iran reich an Rohöl ist, zwingt der Mangel an Öltraffinerien den Iran, einen Teil seines eigenen Rohöls in Europa zu veredeln. Als internationale Sanktionen den Verkauf von Benzin an den Iran verbot, musste er nach alternativen Quellen suchen, um den wachsenden Kraftstoffbedarf im Transportsektor zu decken. Erdgas war eine einfache Option, da der Iran über eine der grössten Gasreserven der Welt verfügt. Die iranische Regierung hat ihren Plan zur Förderung von NGVs erstmals im Jahr 2000 mit der Gründung der «Iranian Fuel Conservation Organization» (IFCO, 2019) vorgestellt. Der IFCO konzentrierte sich auf die Nachrüstung bestehender Fahrzeuge für die Erdgasnutzung und den Bau von CNG-Tankstellen. Im Jahr 2006 beschloss das iranische Parlament, die Ausrüstungskosten für alle CNG-Stationen zu übernehmen, was zu einem schnellen Wachstum der NGVs führte. Die NGV-Politik des Iran war ein Erfolg. Die Zahl der NGVs wuchs in etwas mehr als einem Jahrzehnt von fast Null auf 3.5 Mio. NGVs, was den Iran zu einem weltweit führenden Anbieter von NGVs machte. Die Popularität der NGVs übertraf jedoch die Erwartungen der Regierung, und es gibt nun im Iran nicht mehr genügend CNG-Tankstellen, um die Nachfrage zu decken. Bis 2017 gab es im Iran nur 2'380 CNG-Stationen, die ihre Flotte von 4.5 Millionen NGVs bedienen, das ist ein Verhältnis von 1 Tankstelle zu 1'890 Fahrzeugen (0.05%) (Financial Tribune, 2017). Da CNG in Iran deutlich günstiger als Benzin ist, wird auch trotz des Mangels an Tankstellen, das CNG wahrscheinlich beliebt bleiben. Schliesslich schreibt der sechste Landesentwicklungsplan des Iran den inländischen Herstellern vor (NGV Globa, 2015), 50 Prozent ihrer jährlich produzierten Fahrzeuge CNG-kompatibel zu machen, um die Verfügbarkeit von NGVs sicherzustellen. (Singh, 2019)

### **NGV Fallstudie Italien**

Die Nutzung von Erdgas als Kraftstoff begann in Italien etwa in den 1970er Jahren, als aufgrund der Ölkrise Autos für den Einsatz von CNG nachgerüstet wurden. Die Nachrüstung wurde in den 90er Jahren fortgesetzt, als beliebte kleine und mittlere Fahrzeuge für die Erdgasumrüstung zur Verfügung standen. Staatliche Anreizprogramme (wie z.B. eine niedrige Besteuerung von CNG-Umwandlungen) unterstützten das allmähliche Wachstum der NGVs in Italien in diesen Jahren. Die Besorgnis über die Luftverschmutzung veranlasste die Regierung NGVs zu fördern. Zwischen 2008 und 2010 führte die Regierung ein Subventionsprogramm durch, das sowohl die Umrüstung bestehender Autos auf CNG-Nutzung als auch den Kauf neuer NGVs unterstützte. Dadurch stieg die Zahl der NGVs in Italien um 68 Prozent und die Zahl der CNG-Tankstellen hat sich in diesem Zeitraum verdoppelt (Złoty, 2015). Der Erfolg des italienischen NGV-Programms ist auch auf die bereits bestehende Gasleitungsinfrastruktur zurückzuführen (Italien verfügt über das drittgrösste Erdgasfernleitungsnetz in Europa). Obwohl Italien den grössten Teil des Erdgases importieren muss (aus Russland und Algerien), sind die CNG-Preise immer noch deutlich niedriger als die Benzin- und Dieselpreise. Die Popularität von NGVs in Italien ist

nach wie vor hoch. Bis 2017 wurden in Italien mehr als 800'000 NGVs verkauft (ING World News, 2015), was 80 Prozent des gesamten NGV-Umsatzes in Europa ausmacht. (Singh, 2019)

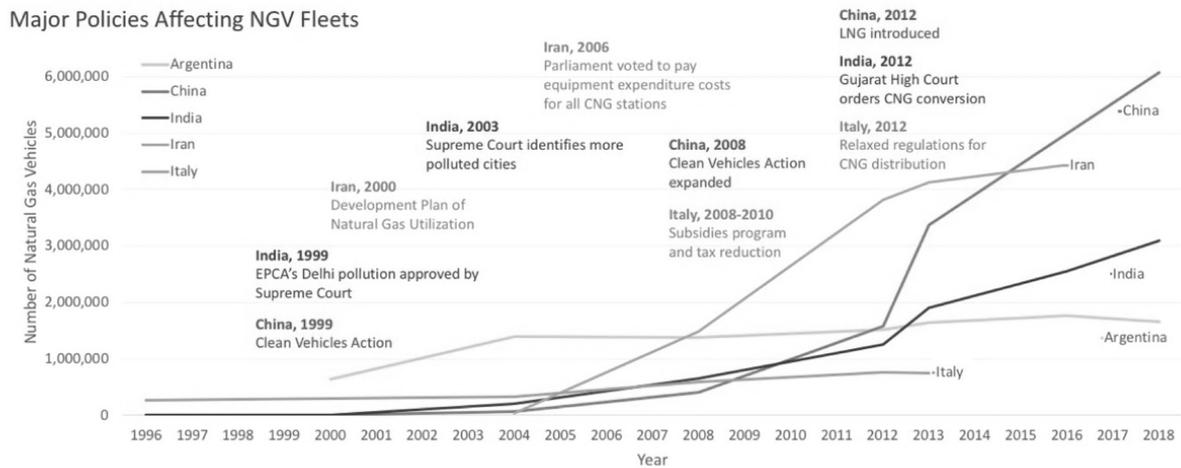


Abbildung 8: Zeitliche Entwicklung der fünf Fallstudien

Quelle: (Singh, 2019)

Die fünf Fallstudien sind in der Abbildung 8 als Diagramm dargestellt. Bei den Ländern Iran, Indien und China ist ein deutlicher bis sehr starker Wachstumstrend zu erkennen. Die Treiber und Barrieren, die in den jeweiligen Fallstudien thematisiert und identifiziert wurden, sind in der anschliessenden Tabelle 9 zusammengefasst. Die Erkenntnisse, die daraus gewonnen werden können, sind im folgenden Kapitel erläutert.

Tabelle 9: Zusammenstellung der Erkenntnisse aus den Fallstudien

	Argentinien	China	Indien	Iran	Italien
Zweck der NGV-Politik	Energiesicherheit	Luftverschmutzung	Luftverschmutzung	Luftverschmutzung Energetische Sicherheit	Luftverschmutzung
Faktoren, die die NGV-Entwicklung beeinflussen	1984: Subventionsprogramm für Flüssiggas 2000: Wirtschaftskrise 2004: Energiekrise	1999: saubere Fahrzeug Aktionsprogramm 2004: WEPP I 2008: Aktionsprogramm für saubere Fahrzeuge erweitert 2012: Einführung von LNG	Ab 1999: EPCA Delhi Vorschlag und Gerichtsmandate	2000: Entwicklungsplan für die Erdgasnutzung im Verkehrssektor 2006: Parlament stimmt für die Deckung der Ausrüstungskosten an CNG-Stationen ab	1970: Nachrüstung 2008-2010: Staatliche Subventionen für NGVs
Wesentliche Änderungen	Kraftstoffversorgung und Preis	Regionaler Zugang Sicherheitsbedenken	CNG Umwandlungsqualität Skaleneffekte Fehlende Tankstellen	Fehlende Tankstellen	Fehlende heimische Kraftstoffversorgung
Zukunftstrends	LNG für LKW Möglichkeiten für den Import von NGVs	LNG für LKW 13. Fünfjahresplan für die Entwicklung von Erdgas Neue Fahrzeugpolitik	15% Elektrofahrzeuge Ziel In Erwägung ziehen, Fahrzeuge, die nicht mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, zu verbieten.	6. Entwicklungsplan des Landes	NGV bevorzugt

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Singh, 2019)

### 4.1.2 Erfahrungen mit LNG als Kraftstoff

Die Entwicklung neuer Kraftstoffmärkte ist ein komplizierter Prozess, in dem viele Aspekte das Marktwachstum verlangsamen können. Unter diesen ist das Dilemma zwischen anfänglichem Mangel an Infrastruktur und engagierter Marktgrösse für den neuen Kraftstoff eine der grösseren Herausforderung in der Marktentwicklung. Es ist unwahrscheinlich, dass die Kunden einen neuen Kraftstoff verwenden, es sei denn, sie sind überzeugt, dass er durch eine ausreichende Infrastruktur unterstützt wird, die Flexibilität, Vielfalt, Reichweite, Widerstandsfähigkeit und Wettbewerb beim Zugang zu Kraftstoff gewährleistet. Auf der anderen Seite sind die Lieferanten nicht bereit, in teure neue Kraftstoffinfrastrukturen zu investieren, wenn sie nicht von der Marktgrösse überzeugt sind (Huhn-Ei-Problematik). Dieses Dilemma ist ein deutlich spürbares Hindernis für die Entwicklung von Naturgas als Kraftstoff. (Romsom, 2017)

Die Entwicklung von LNG als Transportkraftstoff hat eine lange Reifezeit. Anwendungen für LNG scheinen erst vor kurzem die Widerstände bei der Umsetzung überwunden zu haben. Das oben beschriebene Dilemma hat sicherlich zu diesem langsamen anfänglichen Wachstum beigetragen. In der Literatur wurden die folgenden «Key-Learnings» von der Marktentwicklung von LNG, für jene von Wasserstoff ermittelt (Romsom, 2017):

- Abstimmung verschiedener branchenübergreifender Stakeholder mit ihren eigenen spezifischen Interessen auf das gesamte Wasserstoff-Wertversprechen.
- Nutzung der steigenden Kosten für die Aufrechterhaltung der bestehenden Kraftstoffe (Regulierung, Umwelt, politische Akzeptanz usw.), um die Positionierung von Wasserstoff zu verbessern.
- Nutzung der Technologie zur Senkung der Investitionskosten.
- Schaffung von Kundennutzenversprechen für Wasserstoff, welche die Infrastrukturentwicklung rechtfertigen, um die Wasserstoffmarktpräsenz zu etablieren.
- Suche nach Synergien in der Wasserstoff-Infrastruktur für weitere Marktchancen.
- Sammeln von operativen Erfahrungen aus frühen Wasserstoffprojekten, um den Erfolg nachzuweisen und spezifische Beiträge für die Entwicklung von Standards und Verfahren für die globale Umsetzung zu liefern.

## 4.2 Barrieren des Wasserstoffmobilität

---

Als erster Schritt bei der Identifizierung von Implementierungsstrategien für Wasserstoff im Schweizer Markt ist es wichtig, die grundlegenden und spezifischen Barrieren für den Einsatz und die Finanzierung von Wasserstoff zu verstehen.

In der Literatur wurden drei Hauptklassen von Barrieren für Wasserstoff als Kraftstoff für den Verkehr identifiziert, die sich wie folgt zusammenfassen lassen (Wokaun & Wilhelm, 2011):

- Die Schaffung einer Wasserstoffverteilungsinfrastruktur.
- Die höheren Kosten von Wasserstofffahrzeugen.
- Die Notwendigkeit, die Akzeptanz der Verbraucher zu gewinnen, die sowohl mit den Kosten als auch mit der Kraftstoffverfügbarkeit zusammenhängt.

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten Barrieren der Wasserstoffmobilität thematisiert. Dabei werden Aussagen aus verschiedenen Quellen der Literatur, sowie aus den für diese Arbeit geführten Expertengesprächen verwendet. Zusätzlich ist im Anhang 10-XII eine umfangreiche Liste mit weiteren Marktbarrieren, die basierend auf Erkenntnissen aus Literatur und Expertengesprächen erstellt

wurde zu finden. Zum Schluss des Kapitels werden Erfragungen und Erkenntnisse aus dem NGV-Markt in Bezug auf die Barrieren aufgeführt.

### **Unreife von Markt und Infrastruktur**

Eine der wichtigsten oder - gemäss (Wokaun & Wilhelm, 2011) - die wichtigste Barriere, ist sicherlich die erforderliche zusätzliche Investition für die fehlende Infrastruktur (Produktionsanlagen, Pipelines und ein LKW-basiertes Verteilernetz). Die Bedeutung der Infrastruktur wurde in den meisten Experten-gesprächen betont, (z.B. von (Oberholzer, 2019) (Holdener, 2019) und (Vock, 2019)) aber auch in der Analyse der NGV-Marktentwicklung (vgl. Kapitel 4.1) erkannt. Der Bedarf an neuer Tankstelleninfrastruktur stellt das klassische «Huhn-Ei» Problemen dar. Für die Betankung der FCV ist ein dichtes Netz von Tankstellen gewünscht. Dies erfordert Investitionen und Kooperationen zwischen verschiedenen Branchen, welche wiederum einen hohe Anzahl FCV als Kundenstamm wollen. Ein zu niedriges Verhältnis zwischen der Anzahl der FCVs und HRS ist ein wesentliches Hindernis für die Marktentwicklung, da erst nach Erreichen von Skaleneffekten erhebliche Umsätze und Gewinne aus einem Infrastrukturwechsel entstehen. Ähnliche Hindernisse sind das Fehlen einer gut etablierten Fertigungsindustrie, das Fehlen von Lieferantennetzwerken und der Mangel an Wartungs-, Instandhaltungseinrichtungen und dem Fachpersonal. (Lemke, 2016) Diese weltweiten Kosten für den Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur werden in der Grössenordnung von insgesamt rund 25 Billionen Dollar bis zum Ende des Jahrhunderts geschätzt. Sie fallen jedoch nicht völlig aus dem Rahmen, wenn sie mit den jährlichen Zahlungen von 100 Milliarden US-Dollar der Industrieländern an die Entwicklungsländer verglichen werden, die fällig werden, um die Anpassung an den Klimawandel zu unterstützen (Wokaun & Wilhelm, 2011).

### **Individuelle Kosten**

Auf der Verbraucherseite ist ein kritischer Faktor der höhere Preis eines FCV im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug. Aus rein rationaler Sicht sind die «Total Cost of Ownership» (TCO) das Entscheidungskriterium (Wokaun & Wilhelm, 2011). Demzufolge zählen zu den wichtigsten finanziellen Barrieren für die Verbraucher: (a) die zusätzlichen Kosten für den Kauf eines FCV im Vergleich zu herkömmlichen Technologien; und (b) die Umstellkosten von herkömmlichen Fahrzeugen auf das FCV. Die Investitionskosten der FCV sind tendenziell höher als die Alternativen. Es ist zu erwarten, dass ein Grossteil der potenziellen Nutzer von FCV, solche nur dann einsetzen, wenn die TCO geringer sind als die Änderungskosten. Kein kleinerer Teil wird sich alleine vom ökologischen Nutzen, einem emotionalen Entscheidungskriterium, überzeugen lassen, einen Aufpreis zu bezahlen. (Lemke, 2016) geht davon aus, dass der Nutzer bestrebt ist, seinen eigenen Nutzen zu maximieren. Das bedeutet, dass er in einer Entscheidungssituation die Alternative wählt, die ihm den höchsten Nutzen bietet oder die niedrigsten Kosten verursacht. Im Allgemeinen werden sich die meisten Verbraucher nur dann für alternative Kraftstoffe entscheiden, wenn sie preislich zu fossilen Kraftstoffen konkurrenzfähig sind und Umweltaspekte eher im Schatten von Preis und Verfügbarkeit stehen. Für eine erfolgreiche Marktdurchdringung muss es daher spürbare Gründe und Möglichkeiten für die Verbraucher (Marktzugänge) geben, auf FCV umzusteigen. (Khan, 2017) & (Lemke, 2016)

(Wokaun & Wilhelm, 2011) argumentieren, dass als Orientierung für den akzeptablen Preisaufschlag einer alternativen Technologie der Zuschlag, den die Verbraucher heute für ein Hybridfahrzeug zu zahlen bereit sind, als Orientierungsgrösse verwendet werden kann. Aus dieser Leitlinie kommt man zu einer groben Schätzung, dass eine akzeptable Preiserhöhung in der Grössenordnung von CHF 3'000 pro Auto liegen könnte, was 100 CHF/kW für ein 30 kW und 50 CHF/kW für ein 60 kW Brennstoffzellensystem bedeuten würde. (Wokaun & Wilhelm, 2011)

## **Angebot und Auswahlmöglichkeiten**

Die von den Experten am häufigsten genannte Barriere, ist das Angebot und die Auswahlmöglichkeiten von FCV auf dem verfügbaren Markt. Speziell H2 Energy hatte grosse Schwierigkeiten einen Hersteller (OEM) für die Brennstoffzellen-LKW zu finden. Gemäss (Vock, 2019) wurden mehrere erfolglose Verhandlungen mit diversen OEM geführt, bis Hyundai als Partner zusagte. Auch die Beschaffungsabteilung der PostAuto AG hatte Interessen an Brennstoffzellenbussen geäussert, in der Schweiz gibt es aber, gemäss (Wüest, 2019), keinen solchen FC-Bus im Angebot. Im Marktsegment PW gibt es Fahrzeuge im Angebot, aber von einer grossen Produktauswahl kann mit zwei FCV-Modellen (Hyundai Nexo Fuell Cell & Toyota Mirai) (Räz, 2019) nicht die Rede sein. Auf der LKW-Seite gibt es mit Hyundai auch nur einen Anbieter. Auch (Werfeli, 2019) vom Verband der Schweizerischen Gasindustrie betont, dass die geringe Auswahl (rund 25 Fahrzeuge) von NGV ein wesentliches Hindernis in der Marktentwicklung der NGV darstellt.

## **Informationsbezogene Barrieren**

Unzureichende und ungenaue Informationen erschweren eine Kaufentscheidung allgemein. Die Markteinführung der FCV erfordert eine Vielzahl von speziellen Sensibilisierungsmassnahmen und Informationen für viele Gruppen. Dazu gehören Anwender, Techniker in Werkstätten und Servicestationen, Tankstellenbetreiber etc.. Gemäss (Lemke, 2016) sollen diese Informationen seriös und nicht sensationell sein.

Beispiele für solche Informationsfehler konnten durch die Analogie zum NGV-Markt identifiziert werden. Umfragen dazu zeigen, dass das Wissen der meisten Verbraucher über NGVs minimal und oft ungenau ist und dass viele darauf warten, eine grosse Anzahl von NGVs auf der Strasse zu sehen, bevor sie einen kaufen (Khan, 2017). Dies wurde auch im Expertengespräch mit (Werfeli, 2019) bestätigt.

## **Sicherheitsbedenken**

Die Wasserstofftechnologie hat sich über die Jahre bewährt und gilt heute in Fachkreisen als sicher. Die Technologie wird bereits seit Jahrzehnten in verschiedenen industriellen Anwendungen eingesetzt. Der technische Wandel erzeugt jedoch Ängste, speziell im Expertengespräch mit (Fröhlich, 2019) wurden diese thematisiert. Fröhlich führt diese Ängste auch auf das historische Hindenburg-Unglück von 6. Mai 1937 zurück, in dem sich die Wasserstofffühlung des Zeppelins «LZ 129» entzündete (vgl. Kapitel 3.2.1). Solche Ängste können nur durch öffentliche Aufklärung überwunden und abgebaut werden. Es müssen Erfahrungen mit Wasserstoff durch sichtbare lokale Projekte gesammelt werden, um eine grössere Akzeptanz in der Öffentlichkeit zu erreichen. Darüber hinaus darf die Sicherheit nicht beeinträchtigt werden, und es muss ein hohes Mass an Normung zur Verbesserung der Sicherheit und des Vertrauens bestehen. (Lemke, 2016)

## **Erkenntnisse aus den Barrieren des NGV-Marktes**

Durch Erfahrungen aus dem NGV-Markt und den Analogien im Kapitel 4.1 konnten verschiedene Erfahrungen aus den Marktbarrieren der NGV Entwicklung gewonnen werden, welche auch für die Wasserstoffmobilität relevant sind.

Trotz der diversen Vorteile, die der NGV im Vergleich zu ICE hat, sehen sich die NGVs nach wie vor mit erheblichen Barrieren konfrontiert. Gemäss (Khan, 2017) können diese Hindernisse überwunden werden. Es bedarf aber eines abgestimmten Vorgehen aller interessierten Beteiligten, einschliesslich Regierungen und Industrie. Insbesondere ist eine umfassende Kommunikationsstrategie erforderlich, um den Mangel an Sensibilisierung, Verständnislosigkeit und Vertrauen der Beteiligten zu beseitigen.

Die folgenden Erkenntnisse von (Khan, 2017), sind für diese Arbeit und die Wasserstoffmobilität interessant:

- Die Rolle der nutzerbezogenen Wirtschaft ist tiefgreifend, wenn es darum geht, die Menschen zur Umstellung auf Erdgas zu bewegen und Barrieren für deren Einführung zu beseitigen. Es ist wichtig, dass sie durch deutliche Einsparungen bei den direkten Betriebskosten überzeugt werden können, vom gewohnten System auf das neue CNG-System umzusteigen. Darüber hinaus ist die Rentabilität der CNG-Tankstelle wichtig für die Betriebskontinuität. Ein Versagen bei der Bereitstellung eines der beiden Vorteile kann zu einem Programmversagen führen. Daher ist es wichtig, dass der Preisunterschied zwischen dem CNG und konventionellen Kraftstoffen lukrativ ist, um Nutzer und Infrastrukturanbieter davon zu überzeugen, andere Anpassungskosten zu akzeptieren.
- Alle Stakeholder müssen einbezogen werden. Abbau der wichtigsten Barrieren, die jede Interessengruppe betreffen, deren Handlungen für den Erfolg der Politik entscheidend sind.
- Fahrzeughalter verlangen eine kurze Amortisation ihrer Umrüstinvestitionen, wenn sie auf die Verwendung eines alternativen Kraftstoffs umsteigen wollen. Die Regierung sollte sich bemühen, finanzielle Anreize zu schaffen, die zu einer Amortisationszeit von 2-3 Jahren oder weniger führen.
- Technische und leistungsbezogene Fragen, Tankstellen und öffentliche Wahrnehmungen werden als potenzielle Hindernisse für das Marktwachstum angesehen. Obwohl die Motivationen der NGV-Käufer komplex sind, sind Kaufpreis und Betriebskosten in der Regel die wichtigsten Überlegungen. Finanzielle Anreize sollten so konzipiert sein, dass sie für die Verbraucher leicht verständlich sind, und ihre Verfügbarkeit sollte gut bekannt gemacht werden. Mangelndes Bewusstsein, mangelnde Vertrautheit und das wahrgenommene Risiko beim Kauf einer CNG-Technologie scheinen die wichtigen nichtfinanziellen Hindernisse für die Einführung von NGVs zu sein.
- In den Ländern Pakistan, Indien, Brasilien und China ist die Verfügbarkeit von Erdgas für CNG-Stationen die grösste Hürde für das Wachstum von NGV.
- Um das Vertrauen der Verbraucher und der Industrie zu stärken, sollte die Regierung klare Normen festlegen und durchsetzen. Für alle Mechaniker, Techniker und Inspektoren, die in einer alternativen Kraftstoffindustrie tätig sind, muss eine angemessene Ausbildung und Zertifizierung durch die Industrie oder die nationalen Bildungssysteme gewährleistet sein.
- Um die hohen Kosten für den Bau einer CNG-Tankstelle zu vermeiden, sollte die Regierung modulare Ergänzungen zu den bestehenden konventionellen Flüssigtankstellen zulassen. Diese Lektion kann aus dem CNG-Markt Pakistans abgeleitet werden, wo die Infrastruktur der CNG-Tankstelle sehr stark expandiert, da über 50% der CNG-Tankstelle durch die Modernisierung der bestehenden Tankstellenanlagen zum Angebot von CNG errichtet wurde.

### **4.3 Treiber der Wasserstoffmobilität**

---

Die Markteinführung muss durch die Vorteile der FCV-Technologie vorangetrieben werden. Zu den technologischen Vorteilen von FCV gehört die Bereitstellung eines sauberen, effizienten und geräuscharmen «elektrischen» Antriebs, der auch für lange Strecken geeignet ist und zu einer Senkung der Energiekosten führen kann (vgl. Kapitel 3.3.3). Weitere häufig genannte Vorteile bei der Nutzung von Wasserstoff sind ein Beitrag zur nationalen Energiesicherheit und -effizienz, zur technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung, zur Emissionsminderung im Strassenverkehr und zum Klimaschutz (Lemke, 2016). Treiber können Entscheidungsträger veranlassen, Vorschriften einzuführen oder anzupassen, Marktinstrumente und ergänzende Massnahmen (z.B. Subventionen) festzulegen, um die Verwendung von kohlenstoffarmen Kraftstoffen, einschliesslich Wasserstoff, zu fördern (Fraile, Torres, & Rangel,

2016). In diesem Kapitel werden die spezifischen Antriebsfaktoren (Treiber) für die Marktdurchdringung der Wasserstoffmobilität besprochen.

Die wichtigsten politischen Treiber für die Nutzung von grünem Wasserstoff können klassifiziert werden als: (a) Klimaveränderungspolitische Massnahmen im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung des Verkehrs- und Industriesektors; (b) Energiesicherheit und Unabhängigkeit fossiler Brennstoffe; (c) Reduzierung der lokalen Luftverschmutzung zur Minimierung der Risiken für die menschliche Gesundheit; und (d) Industrielle Wettbewerbsfähigkeit durch Technologieentwicklung und Innovation (Fraile, Torres, & Rangel, 2016). Nach (Lemke, 2016) gibt es zusätzlich noch die folgenden spezifischen Treiber der Wasserstoffmobilität:

- **Staatliche Unterstützung und Regulatoren:** Dies könnte direkte oder indirekte steuerliche, rechtliche und finanzielle Unterstützung für die Wasserstoffmobilität beinhalten. In der Schweiz gibt es keine spezifische Förderung der Wasserstoffmobilität. Fahrzeuge können aber von Steuererleichterungen profitieren, wie im Kapitel 3.5 beschrieben ist. Ebenfalls können Regulatoren wie die CO<sub>2</sub>-Abgabe (vgl. Kapitel 3.5) die FCV im Vergleich attraktiver machen. Das solche staatlichen Unterstützungen funktional sind, konnte anhand der Fallstudien im Kapitel 4.1.1 dargestellt werden. Es muss aber auch gesagt werden, dass in den genannten Fallstudien ein bedeutender Eingriff des Staates in die Wirtschaft vorgenommen wurde.
- **Unternehmertum:** Die weit verbreitete Verwendung von erneuerbarem H<sub>2</sub>-Kraftstoff könnte grosse Geschäftsmöglichkeiten bieten. Es wurden mehrere Unternehmen rund um die Wasserstoff- und Elektromobilitätstechnik gegründet, wie das Beispiel H2 Energy zeigt. Solche Unternehmen haben das Potenzial, die Markteinführung der Wasserstoffmobilität wesentlich zu steuern und zu fördern und dabei selber zu profitieren.
- **Energiewende:** Dieser Übergang erfordert den Aufbau neuer Energiesysteme, insbesondere Energiespeichersysteme, um die CO<sub>2</sub>-Ziele bis 2050 zu erreichen. Der Konsens über die Energiewende wurde von verschiedenen Parteien in Frage gestellt. Dennoch ist der Übergang des Energiesystems bereits im Gange und unterstützt auch die Wasserstoffmobilität.
- **Andere Anwendungen:** Die kontinuierliche profitable Entwicklung von Wasserstoff auch in anderen Wasserstoffsektoren (Industrie, Wärme, Elektrizität) fördert die Wasserstoffmobilität. Wasserstoff wird eine Rolle im neuen Energiesystem spielen und dadurch gefördert. Ein solcher Treiber wird die verstärkte Nutzung der Wind- und Solarenergie sein. Auch sind positive Effekte von kleinen Nischenmärkten für Brennstoffzellenanwendungen, wie zum Beispiel in der Camping-, Freizeit- und Kommunikationstechnik zu verzeichnen.

#### 4.4 Stakeholder Analyse

---

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Stakeholder Analyse, ist die kritische Betrachtung der verschiedenen Interessensgruppen der Wasserstoffmobilität Schweiz und ihre Wahrnehmung. Dabei werden die relevanten Stakeholder der Wasserstoffmobilität analysiert und anschliessend werden ihre Interessen und ihre relative Macht bewertet. Der Zweck der angewandten Stakeholder-Analyse ist es, eine effektivere Koordination der Stakeholder-Interaktionen zu ermöglichen. Die grundlegende Methodik ist im Kapitel 2.5 einzusehen. Das Kapitel wird mit den gewonnenen Schlussfolgerungen abgeschlossen.

##### 4.4.1 Stakeholder-Beschreibungen

Abbildung 9 zeigt die Aufteilung der wichtigsten Stakeholder Gruppen in spezifische Untergruppen. Anschliessend werden die identifizierten Stakeholder entsprechend der Abbildung diskutiert. Als Grundlage für diese Stakeholder-Beschreibung dient (Janssen, 2005). Da es sich dabei um eine ältere

Arbeit handelt, wurde diese mit neuen Fakten und Zahlen auf den aktuellen Stand gebracht, erweitert und neu aufgearbeitet.

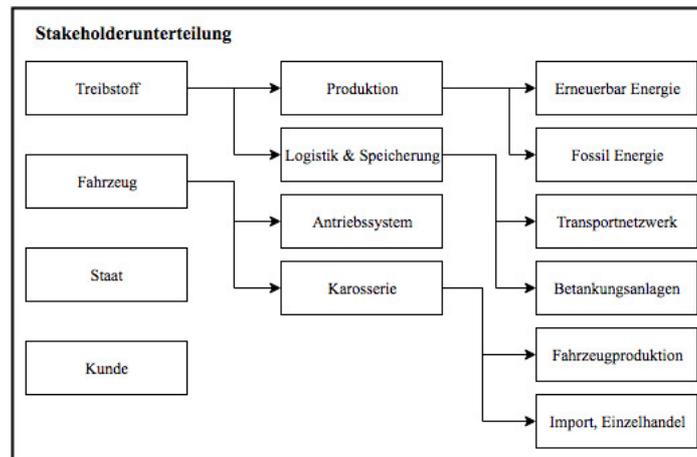


Abbildung 9: Darstellung der Stakeholderunterteilung

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Janssen, 2005)

## Erneuerbare Energie

Erneuerbare Energiequellen sind vielfältig und werden stark gefördert. Die am weitesten verbreiteten erneuerbaren Energiequellen in der Schweiz sind Biomasse, Wind, Solar- und Wasserkraft. Als gebirgiges Land mit vergleichsweise häufigen Niederschlägen eignet sich die Schweiz gut für die Stromproduktion aus Wasserkraft. Knapp 60% des Schweizer Stroms stammt aus Wasserkraft. Aus anderen erneuerbaren Energiequellen wurden (Stand 2015) 4.3% der gesamten Schweizer Stromproduktion gewonnen (UVEK, 2017). Im Jahr 2010 haben Unternehmen der Branche «Erneuerbare Energien», mit rund 22'800 Beschäftigten, eine Bruttowertschöpfung von 4.8 Mia. CHF erzielt. Seit dem Jahr 2000 ist die EE-Branche mit mehr als 4% pro Jahr überdurchschnittlich stark gewachsen. (BFE, 2013)

Eine der zentralen Stakeholdergruppen aus dieser Kategorie dürfte die der Versorgungsunternehmen sein. Im Expertengesprächen (Vock, 2019) wurde eine zunehmende Bedeutung der Stromversorger prognostiziert.

## Fossile Energie

Der derzeitige Markt für fossile Brennstoffe bildet einen der grössten globalen Märkte. Z.B. der kombinierte Marktwert der drei Mineralölunternehmen ExxonMobil (344.1 Mia. USD), Shell (306.5 Mia. USD) und BP (152.6 Mia. USD) beträgt mehr als 800 Milliarden US-Dollar (Statista, 2019). In den letzten Jahren haben einige dieser Energieunternehmen einen bedeutenden Einfluss auf Brennstoffzellenfahrzeuge genommen. Weltweit sind dies vor allem Shell und BP mit zum Beispiel Wasserstoff-Pipelines von BP in der USA (BP, 2005) oder der weltgrössten Wasserstoff-Elektrolyse in der Rheinland Raffinerie DE, bei welcher Shell massgeblich beteiligt ist (Shell, 2018). In der Schweiz sind Agrola AG, AVIA Vereinigung, Coop Mineralöl AG, Migrol AG, SOCAR Energy Switzerland und Shell New Fuels im Förderverein H2 Mobilität als Mitglieder aktiv (H2-Mobilität, 2019). Mit Ausnahme von Coop konnten aber keine laufenden Projekte der genannten Firmen gefunden werden.

Die Motivation der Mineralölunternehmen in Bezug auf die aktive Förderung von Brennstoffzellenfahrzeuge kann jedoch sehr unterschiedlich sein. Es bleibt ungewiss, ob diese Unternehmen die Einführung

von Brennstoffzellenfahrzeugen aktiv fördern werden und ob sie handeln werden, wenn die Haupthindernisse für den Übergang zu Brennstoffzellen überwunden sind, oder ob sie ihre Aktivitäten im Bereich Brennstoffzellen hauptsächlich für Marketingzwecke sehen.

### **Transportnetzwerk**

Das Kapitel Infrastruktur (vgl. Kapitel 3.3.5) zeigte, dass es mehrere Möglichkeiten gibt, Wasserstoff als Treibstoff zu transportieren. Bei der zentralen Produktion kann der Wasserstoff in Hochdrucktanks auf der Strasse oder über eine Hochdruckleitung zu den Tankstellen gebracht werden. Im ersten Fall sind bestehende Logistikanbieter, die bereits jetzt die Versorgung von Tankstellen übernehmen wahrscheinlich Kandidaten für diese Funktion. (Janssen, 2005) Dazu kommen neue Player, die als «First-Mover» speziell den Wasserstoffmarkt bearbeiten. Ein Beispiel dafür ist das Unternehmen H2 Energy, welches auch eine eigene Logistik aufbaut (H2 Energy, 2019). In der Schweiz gibt es zurzeit keine Wasserstoffleitungen. Daher sind die Verantwortlichkeit und der Besitz noch nicht geregelt. Es kann dementsprechend nicht beantwortet werden, ob diese im Besitz des Staates, von Versorgungsunternehmen oder von Dritten sein werden. Das existierende Erdgasnetz befindet sich in Besitz der Swissgas AG, Transitgas AG, diversen Gasverbänden und weiteren Gasversorgern, sowie vielen einzelnen Gemeinden (Swissgas, 2019).

Im Falle der lokalen Produktion von Wasserstoff können Energieträger Strom oder Methan sein. Die jeweiligen Versorgungsunternehmen haben mit hoher Wahrscheinlichkeit die Hauptrolle bei der Verteilung an die Tankstellen oder an private Betankungsgeräte. (Janssen, 2005)

### **Betankungsanlagen**

Auch bei der Wasserstoffbetankung müssen zwei Ansatzpunkte (zentrale- /lokale) der Wasserstoffherzeugung separat betrachtet werden. Bei der lokalen Erzeugung von Wasserstoff mit Elektrolyse kann dies entweder bei den Tankstellen, aber auch bei privaten Betankungsanwendungen erfolgen. Es konnten jedoch noch keine privaten Betankungsanlagen aufgefunden werden. Es ist aber davon auszugehen, dass dies technisch durchaus möglich sein wird und dass Hersteller von kleineren Elektrolyseanlagen diesen Innovationsprozess unterstützen werden. (Janssen, 2005)

Im ersten Fall der lokalen Produktion werden die Tankstellen eine wichtige Rolle als Interessensvertreter spielen. Tankstellen sind meist an einen Kraftstoffproduzenten (z.B. Shell oder BP) oder an eine allgemeinere Verkaufsgruppe (z.B. Migros, Coop oder Landi) angeschlossen. (Janssen, 2005)

### **Antriebssystem**

Es ist davon auszugehen, dass die strukturellen Effekte von alternativen Antriebsformen (wie die Brennstoffzelle) auf die Fahrzeugindustrie erheblich sein dürfte. Seit mehreren Jahren sieht sich die Automobilindustrie mit gewaltigen strukturellen Veränderungen konfrontiert. Über Jahrzehnte hat der Verbrennungsmotor in den Fahrzeugen alternativlos dominiert, nun droht dieser schrittweise von neuen Antriebsformen abgelöst zu werden. Für die etablierten Fahrzeughersteller kann dieser Wandel zu einer grossen Gefahr werden, da durch den Wegfall elementarer Bauteile im Fahrzeug erhebliche Wertschöpfungsverluste zu erwarten sind. Hatten die Automobilhersteller im Jahre 2010 noch einen durchschnittlichen Eigenentwicklungsanteil von 60% aufzuweisen, wird für das Jahr 2020 ein Anteil von nur noch 40% prognostiziert. Ein ähnlicher Trend wird auch im Bereich der Fertigung vermutet, so dass im selben Zeitraum die durchschnittliche Fertigungstiefe von 30% auf 25% sinkt. Vor allem die Elektroindustrie wird dank Brennstoffzellen und batteriebetriebenen Fahrzeugen stark an Wert gewinnen. (Seeberger, 2016)

Die Brennstoffzellenbranche selbst ist keine homogene Branche, sondern repräsentiert Unternehmen aus verschiedenen Branchen. Die Brennstoffzellenanwendungen entwickeln sich unterschiedlich schnell, wobei die gesamte Bandbreite derzeit von experimentellen Einzelprototypen, über Grossprojekte, bis hin zu kleinen Brennstoffzellen-Geräten, die bereits im Handel erhältlich sind, reicht. (Lemke, 2016)

### **Fahrzeugproduktion**

Die Schweiz hat keine bedeutende nationale Fahrzeugindustrie (OEM), praktisch alle Autos werden importiert. Schweiz ist aber als Automobilzulieferindustrie gut aufgestellt. Es ist unwahrscheinlich, dass sich diese Situation mit der Einführung des Brennstoffzellensystems ändert, so dass die Schweiz weiterhin von den Entwicklungen der ausländischen Fahrzeugindustrie abhängig sein wird (Janssen, 2005). Hier ist anzumerken, dass Hyundai Motor nur aufgrund der Initiative des Schweizer Unternehmens H2 Energy tausend schwere Nutzfahrzeuge mit Wasserstoff-Elektroantrieb für den Schweizer Markt produziert. (H2 Energy, 2019)

Die europäische Automobilindustrie unterliegt hohen gesellschaftlichen Anforderungen und steht vor einer grossen Herausforderung der Globalisierung (vgl. PEST). Die OEMs verwalten hochkomplexe F&E-Programme, die sich neben der FCV auf BEVs und fortschrittliche ICE-Technologien konzentrieren. Die Automobilindustrie ist eine der mächtigsten Branchen der Welt, die ohne Zweifel in der Lage ist, den Markteintritt von FCVs voranzutreiben. Die FCV-Technologie ist marktreif (vgl. Abbildung 4), aber die Markteinführung würde hohe Investitionen der Industrie in Produktionsanlagen erfordern. Derzeit sind die Marktstrategien der Branche vielfältig: Die asiatischen Unternehmen Toyota, Honda und Hyundai sind Befürworter von FCVs, Daimler ist ambivalent zwischen BEVs und FCVs, Nissan/Renault, BMW und VW setzen auf BEVs, GM/Opel haben ihre Interesse nicht offengelegt, Ford ist ziemlich stark auf dem US-HEV-Markt konzentriert. (Lemke, 2016)

### **Fahrzeugimporteure, Einzelhändler**

Da es in der Schweiz keine eigentliche Automobilindustrie, im Sinne von Fahrzeugherstellern (OEM) gibt, gewinnen die Importeure und Händler der Wasserstofffahrzeuge an Bedeutung. Der Service am Auto wird hauptsächlich von spezialisierten Werkstätten durchgeführt.

In der Schweiz gibt es 26 offizielle Importeure, die eine oder mehrere Marken importieren. Insgesamt stehen 36 verschiedene Automarken zur Auswahl (Blessing & Burgener, 2012). Die fünf Grössten (Amag-Gruppe, Emil-Frey-Gruppe, BMW Schweiz, Mercedes-Benz und Renault Suisse SA) importierten rund 70% der insgesamt 323'783 Autos (2015). Der grösste Importeur, die Amag-Gruppe, hat einen Marktanteil von 31%. (Haefeli, 2016)

In der Schweiz konnten zwei verschiedene Arten von Geschäftsformen der Fahrzeugimporteure erkannt werden. Die erste Art, zum Beispiel BMW Schweiz, Mercedes-Benz und Renault Suisse SA, sind Teil des übergeordneten Herstellers. Sie importieren die jeweilige Marke des Mutterkonzerns in die Schweiz und verkaufen ihre Fahrzeuge weiter an unabhängige Händler. Andere Importeure, wie die Amag-Gruppe oder die Emil-Frey-Gruppe, sind dagegen organisatorisch unabhängig von den Automobilunternehmen. (Janssen, 2005) & (Haefeli, 2016)

### **Staat**

Die Regierung und ihre Träger sollen die Interessen der Bürger vertreten, werden dabei aber auch durch eigene Interessen beeinflusst. In der Regel ist der Inhalt des staatlichen Förderprogramms ein Kompromiss zwischen den Parteien. Politiker müssen nicht über die fachliche Qualifikation zur Bewertung von

Details und Folgen einer bestimmten Technologie- und Innovationspolitik verfügen. Der technisch-wissenschaftliche Input für die politischen Programme erfolgt durch Bundesämter (z.B. BFE oder BAFU), unabhängige wissenschaftliche Institutionen zur Beratung der Regierung oder durch Studien verschiedener wissenschaftlicher Institute. Politische Programme müssen Konsens erzielen, und nicht zwingend die beste Lösung finden. Daher sind die Ergebnisse möglicherweise nicht immer rational, sondern eher allgemein akzeptierbar. (Lemke, 2016)

Die Forschungsabteilungen von Unternehmen, Universitäten und ähnlichen Institutionen sind der Ausgangspunkt für technologische Innovationen, die Regierung wirkt als Impulsgeber, indem sie einen innovationsfreundlichen Rechtsrahmen setzt oder steuerliche oder andere Fördermassnahmen einführt (vgl. Politische Treiber). Im Allgemeinen konzentrieren sich die Regierungen bei der Umsetzung alternativer Kraftstoffe auf Umwelt-, Klimaziele und Energiepolitik. Eine Politik für saubere Kraftstoffe verspricht Imagegewinn für die Regierung. Darüber hinaus sind saubere und sichere Autos nicht nur gesellschaftlich wünschenswert, sondern haben auch das Potenzial, einen Wettbewerbsvorteil für die Schweizer Industrie zu schaffen. Die Konsultation der Beteiligten, die Folgenabschätzung der politischen Massnahmen und die Leitlinien für die Verteilung der Mittel gewährleisten ein hohes Mass an Übereinstimmung mit den Interessen aller Beteiligten. Die Unterstützung durch lokale, nationale und internationale Politik wird eine entscheidende Rolle bei der Überwindung der Barrieren spielen (vgl. Kapitel 4.2). (Lemke, 2016)

## **Kunde**

Die Position des Kunden oder Benutzers ist unklar, da es derzeit nur eine geringe Anzahl von FCV-Anwendern gibt. Im Rahmen von verschiedenen Studien wie CHIC oder CEP (vgl. Kapitel 3.4.2) wurden Erfahrungen mit der Technologie im täglichen Leben gesammelt. In Deutschland wurden Fahrzeuge an gewerbliche Nutzer wie Deutsche Telekom, Hermes, BSR und BVG geleast. Im CEP-Projekt von 2013 wurden Fahrer verschiedener FCVs befragt, mit dem Ergebnis, dass die Zufriedenheit hoch war und mit der Zeit (2007 bis 2013) und der Entwicklung der Technologie anstieg. Nur 19% der Befragten würden FCVs nicht an Freunde weiterempfehlen, was hauptsächlich auf das Fehlen und die Unzuverlässigkeit von Tankstellen sowie den hohen Preis von FCVs zurückzuführen ist. (Lemke, 2016) In einer neueren Studie aus Kalifornien, USA von 2018 wurden die folgenden Erkenntnisse erlangt: (a) 80% der Studienteilnehmer gaben an, dass die FCV ihre Erwartungen «übertroffen» oder «weit übertroffen» haben; (b) 98% der Studienteilnehmer betrachten Wasserstoff als «sicher» oder «sicherer» als Benzin; und (c) 94% der Teilnehmer sehen den Prozess, ein Fahrzeug mit Wasserstoff zu betanken, als «sicher» oder «sicherer» als Benzinbetankung an. Weitere Ergebnisse der Studie sind, dass 85% der Studienteilnehmer, die Wasserstoffbetankung als «etwas» oder «sehr» einfach bezeichneten. Die Fahrzeugreichweite wurde von 75% der Teilnehmer als völlig oder weitgehend ausreichend eingestuft wurde. (Lipman, Elke, & Lidicker, 2018) Aber diese Akzeptanz des Nutzers darf nicht als ein statischer Faktor verstanden werden. Vielmehr ist zu erwarten, dass sich diese im Laufe der Zeit dynamisch verändert. Die Akzeptanz wird beeinflusst durch den Fortschritt der Wasserstofftechnologie selbst, durch die Ausrichtung des öffentlichen Diskurses über FCV- oder andere alternative Antriebstechnologien, sowie durch externe Ereignisse (Umweltkatastrophen oder politische Wendungen). Die Bedürfnisse der Zielgruppe müssen über alle Produktinnovationsschritte hinaus genau beobachtet werden. (Lemke, 2016)

### **4.4.2 Stakeholder Klassifizierung**

Die Stakeholder können nach ihrer Fähigkeit/Macht, die Markteinführung der Wasserstoffmobilität zu beeinflussen, und ihrem Interesse daran, unterschieden werden. Es kann sich um direkte, legislative oder indirekte Macht handeln. Die Methodik zur Bewertung der Stakeholder ist im Kapitel 2.5 erklärt. Die vorliegende Klassifizierung wurde im Expertengespräch mit (Bach, 2019) durchgeführt. In den übrigen

Expertengesprächen wurde ebenfalls nach den wichtigsten Experten und ihrer Rollen gefragt, um diese vergleichen zu können. Die detaillierten Aussagen von Bach sind im Anhang 10-XVIII zu finden. In der Abbildung 10 sind die Resultate in Bezug auf Macht und Interesse der Stakeholder qualitativ dargestellt. Die Stakeholder sind in der Matrix in vier Gruppen (Q1 bis Q4) aufgeteilt und können wie folgt klassifiziert werden:

- Q1. Die «weniger» Wichtigen: Sie haben wenig Interesse an der Markteinführung der Wasserstoffmobilität und ebenso wenig Einfluss darauf. Diese Klasse wird selbst wenig Möglichkeiten haben, den Markteinführungsprozess der Wasserstoffmobilität zu beeinflussen und darüber hinaus auch wenig Interesse daran. Dennoch muss diese Klasse beobachtet werden, denn Akteure können ihre Interessen und ggf. auch die Machtposition ändern. Diese Klasse darf nicht vergessen werden, gleichzeitig soll aber auch nicht zu viel Aufwand in deren Pflege investiert werden. Eine periodische Kontrolle der Macht- und Interessenpositionen ist zu empfehlen.
- Q2. Die «Mächtigen»: Sie haben Macht über den Markteinführungsprozess der Wasserstoffmobilität, aber kein direktes und hohes Interesse daran. Eine solche Gruppe bilden die Forschungsinstitute und NGOs. Sie haben keine direkte Macht, aber sie haben die Fähigkeit, die öffentliche und politische Meinung über alternative Technologien stark zu beeinflussen. Beide haben kein direktes Interesse an einer bestimmten Technologie, sondern an den Folgen ihrer Nutzung für Gesundheit, Umwelt und Natur. Es ist wichtig zu dieser Klasse gute Kontakte pflegen und Zufriedenheit zu schaffen.
- Q3. Die «Seismographen»: Sie haben ein grosses Interesse an der Markteinführung der Wasserstoffmobilität, haben aber nicht die Kraft, den Marktdurchdringungsvorgang zu beeinflussen. Dieser Gruppe wurden keine Stakeholder zugeteilt. Sollte sich das ändern, müssen die Seismographen stets und gezielt informiert und befragt werden. Wenn möglich können sie als Motivatoren im Projekt eingesetzt werden.
- Q4. Die «Macher»: Sie haben ein grosses Interesse und grosse Macht an der Markteinführung und -Durchdringung der Wasserstoffmobilität. In dieser Klasse befinden sich mit neun die meisten Akteure. Sie alle müssen so stark wie möglich eingebunden werden.

Macht	<b>Q3: Informieren</b> Forschung NGO*	<b>Q4: Integrieren</b> Betankungsanlagen Erneuerbare Energie Fahrzeugimport Fossile Energie H2-Branchenverband	H2-Unternehmen Kunde Transportnetzwerk Staat
	<b>Q1: Beobachten</b> Substitutionsprodukte Bevölkerung*	<b>Q2: Einsetzen</b>	
	Interesse		

Abbildung 10: Stakeholder Matrix

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme, EMPA, 2019)

Die Rolle der Stakeholder ist nicht statisch und kann mittels gezielten Managements, im eigenen Sinne, beeinflusst werden. Dafür muss die aktuelle Situation der wichtigsten Stakeholder und die gewünschte Situation bestimmt werden. Die Definition der Stakeholder Situation und die Strategie ist im Methodik Kapitel 2.5 zu finden und bezieht sich massgeblich auf (Weiland, 2012). Die Bewertung der aktuellen

Position und der gewünschten Position ist in der Abbildung 11 gemäss dem Expertengespräch mit (Bach, 2019) grafisch dargestellt. Aus der Abbildung lässt sich erkennen, dass sich kein Stakeholder an der gewünschten Position befindet. Es muss also noch in die richtige Strategie und in die Kommunikation mit den Stakeholdern investiert werden, um die Stakeholder in die gewünschte Position zu bringen. Eine mögliche Strategie für je eine Stakeholder Position ist in der Tabelle 1 genannt.

Stakeholderanalyse Wasserstoffmobilität			Bewusstsein	Verständnis	Zusammenarbeit	Verpflichtung	Befürwortung
Treibstoff	Produktion	Erneuerbare Energie		●		○	
		Fossile Energie			●		○
	Logistik & Speicherung	Transportnetzwerk		●		○	
		Betankungsanlagen			●		○
Fahrzeuge	Antriebssystem	Fahrzeugsproduktion	●			○	
		Import	●			○	
		EE-Konkurrenz	●	○			
		FE-Konkurrenz	●		○		
Branche	Branchenverband	Unternehmen				●	○
						●	○
Staat			●			○	
Kunde		●				○	
Forschung				●		○	

Aktuelle Situation
  Erwünschte Situation

Abbildung 11: Analyse der Stakeholderposition

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Bach, Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme, EMPA, 2019) & (Weiland, 2012)

## 4.5 PEST-Analyse der Automobilindustrie

Die PEST-Analyse ist eine Methodik, um die Kräfte zu analysieren, die das Marktumfeld auf der Makroebene einer bestimmten Branche beeinflussen. Mit dieser Analyse soll ein allgemeiner Überblick über die wichtigsten politischen, wirtschaftlichen, soziologischen und technologischen Faktoren gegeben werden, die den technologischen Wandel in der globalen Automobilindustrie antreiben. Anschliessend wird im Kapitel 4.6, in Form einer Branchenstrukturanalyse, ein gezielter Fokus auf die Wasserstoffmobilität der Schweiz gelegt. Die Methodik für die PEST-Analyse ist im Kapitel 2.6 zu finden.

### 4.5.1 Politische Rahmenbedingungen

Politische, vor allem regulatorische Massnahmen sind kritische Einflussgrössen der Zukunft der gesamten globalen Automobilindustrie. Das politische und regulatorische Umfeld ist ständig in Bewegung. Um die Automobilindustrie zur Entwicklung umweltfreundlicherer Fahrzeuge zu bewegen, haben viele Regierungen auf der ganzen Welt mit strengen Umweltauflagen für die Branche reagiert. Regierungen auf der ganzen Welt bevorzugen und fördern emissionsarme Fahrzeuge (vgl. Kapitel 3.4.2). Ausserdem sind die Steuern auf Luxusfahrzeuge und Fahrzeuge mit hohem Verbrauch allgemein gestiegen. Wichtige strategische Weichenstellungen werden auf europäischer Ebene abgestimmt und festgelegt (Schade, Zanker, & Kühn, 2012). Die im Jahr 2016 veröffentlichte «Strategy on Low Emissions Mobility» der Europäischen Union, prognostiziert eine grundlegende Verschiebung, weg vom Mineralöl, hin zu erneuerbaren Energiequellen. Das mit dem Pariser Klimaschutzabkommen beschlossene Ziel, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius zu begrenzen, macht deutlich, dass auch im Verkehrssektor ein Wandel bevorstehen muss (Harrison & Chucholowski, 2017). Umweltfreundliche Fahrzeuge sind weltweit gefragter denn je, aber im Gesamtanteil immer noch gering. Während die erneuerbaren Energien im Verkehrssektor zwischen 2018 und 2023 voraussichtlich zunehmen werden, wird ihr Anteil dennoch insgesamt klein bleiben. In der Verkehrsnachfrage wachsen die erneuerbaren Energien von 3.4% im

Jahr 2017 auf nur 3.8% im Jahr 2023 (IEA, 2019). Dieser Wachstum kann auf staatliche Unterstützungen für reduzierte Umweltauswirkungen zurückgeführt werden. Daher haben staatliche Vorschriften und Verordnungen einen starken Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Autobauer. Diese Regulationen und Subventionen sind von Land zu Land unterschiedlich. Alle EU-Länder verfügen zum Beispiel über nationale Aktionspläne. Das bedeutet, dass sie bei der Erfüllung ihrer Verpflichtungen aus der EU-Richtlinie über erneuerbare Energien, einschliesslich ihrer rechtsverbindlichen Ziele, unterschiedliche Wege gehen dürfen. Diese Ziele werden unterschiedlich erfolgreich erreicht (Europa, 2019). Technologien, die kraftstoffeffizient und emissionsarm sind, können leicht staatliche Vorschriften erfüllen, wie die im Kapitel 3.5.1 beschriebenen Vorschriften in der Schweiz. Darüber hinaus sind die Einfuhrbestimmungen und Steuern von Land zu Land unterschiedlich. Insgesamt gibt es viele politische Faktoren, die die Wasserstoffmobilität und die gesamte Autoindustrie beeinflussen. Veränderte Machtverhältnisse in nationalen Regierungen führen fortlaufend zu Änderungen in den jeweiligen Energiestrategien und Zielen. Diese politischen Faktoren liegen im Allgemeinen ausserhalb der Kontrolle der Unternehmen, mit Ausnahme von Lobbying. Allgemein beeinflusst die Regierungspolitik die Entwicklung der Automobilunternehmen in hohem Masse. (Pratap, 2018)

#### 4.5.2 Wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Wirtschaftliche und geschäftliche Faktoren sind für den Automobilsektor von erheblicher Bedeutung, sie wirken sich direkt auf die Einnahmen und Aktivitäten des Unternehmens aus. Trotz politischem Willen und technologischem Fortschritt reagiert die Verkehrsnachfrage nach wie vor in erster Linie auf das wirtschaftliche Umfeld. In der Vergangenheit gab es einen engen statistischen Zusammenhang zwischen dem Wachstum des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und dem Wachstum des Verkehrs, sowohl des Personen- als auch des Güterverkehrs (Banister, 2008). Die ökologische Entwicklung der Automobilität der letzten Jahre ist durch die folgenden makroökonomischen Haupttrends gekennzeichnet, die jeweils erhebliche Auswirkungen auf den Verkehrssektor haben (OECD/ITF, 2017):

- Das Wirtschaftswachstum bleibt unter den Erwartungen und ist weiterhin mit Risiken und Unsicherheiten behaftet.
- Der internationale Handel wächst heute im gleichen Tempo wie das BIP, während der Handel vor der Wirtschaftskrise 2008 doppelt so schnell wuchs wie das BIP.
- Die Handelsschwäche hat vor allem den Schifffahrtssektor getroffen, der in eine schwere Krise geraten ist. Dies hat Auswirkungen auf die gesamte Lieferkette.

Wirtschaftstätigkeit und Handel sind die Haupttreiber der Verkehrsnachfrage. Der niedrige Ölpreis hat die Mobilität der Passagiere aufrechterhalten, während der Güterverkehrssektor stark unter dem durchschnittlichen wirtschaftlichen Umfeld gelitten hat. Das Wachstum der PW-Nutzung, gemessen in Personenkilometern, hat sich in mehreren Volkswirtschaften mit hohem Einkommen verlangsamt, und in einigen Fällen ist das Wachstum gestoppt oder negativ geworden. In den meisten Ländern erklärt die geringere Abhängigkeit von Autos in städtischen Gebieten, die geringeren Kilometer, die mit Privatfahrzeugen zurückgelegt wurden. Die Landfrachtvolumina sind stark vom wirtschaftlichen Umfeld abhängig. Es ist gut belegt, dass das Volumen des Landverkehrs (Strasse und Schiene) mit dem BIP wächst. Der Güterverkehr ist direkt mit der Lieferkette verbunden und der Güterverkehr spiegelt das Wachstum des Umsatzes oder der Aktivität im verarbeitenden Gewerbe wieder (Garcia, 2008). Infolgedessen war der Landverkehr stark von der Wirtschaftskrise betroffen, ist aber seither insgesamt wieder gewachsen (OECD/ITF, 2017). Weitere wichtige wirtschaftliche Treiber der Automobilindustrie sind (Schade, Zanker, & Kühn, 2012):

- Zunehmende Knappheit fossiler Energieträger, welche auf das wirtschaftliche Wachstum der Schwellenländer und die damit verbundene Frage der Energieversorgungssicherheit Einfluss hat.
- Steigende Notwendigkeit und zunehmende Ambitionen der nationalen und europäischen Klimapolitik, die auch einen Treibhausgasreduktionsbeitrag des Verkehrs fordern.
- Die absehbare Verfügbarkeit von alternativen Antrieben mit nichtfossilen Energieträgern im Automobilverkehr, sowie die Verschiebung der Gewichtung der Produktions- und Absatzmärkte für Kraftfahrzeuge, hin zu stark und schnell wachsenden neuen Märkten in einigen Schwellenländern (China, Brasilien und auch Indien).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im Zusammenhang mit der Automobilindustrie die wirtschaftlichen Kräfte von besonderer Bedeutung sind. Wenn die wirtschaftlichen Bedingungen nicht gut sind, sinkt der Absatz von Fahrzeugen. Bei guten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, kann der Absatz von Fahrzeugen hoch bleiben. Die entwickelten Märkte sehen höhere Umsätze, da die Kaufkraft der Kunden höher ist. Die preisgünstigeren Fahrzeuge sind in der Regel in den Entwicklungs- und unterentwickelten Märkten gefragt. So haben die Macht der Wirtschaft und die wirtschaftlichen Bedingungen weltweit einen grossen Einfluss auf die Rentabilität der Automobilindustrie in verschiedenen Märkten. Es gibt verschiedene Blickwinkel, um die Bedeutung der wirtschaftlichen Faktoren für die Branche zu analysieren. Die am häufigsten verwendete Optik ist die Kaufkraft der Kunden. Sie sinkt in Zeiten des wirtschaftlichen Abschwungs. Die Branche ist stark von der Kaufkraft der Kunden abhängig. (Pratap, 2018)

#### 4.5.3 Soziale Bedingungen

Massnahmen der Regierungen weltweit, um die Abhängigkeit der Automobilindustrie von Erdölprodukten als Energiequelle zu verringern, haben die Verbraucher motiviert, ihre Präferenzen zu ändern. Im Wesentlichen gibt es vier Megatrends, die die Automobilindustrie bewegt (Harrison & Chucholowski, 2017): Nachhaltigkeit, Urbanisierung, Individualisierung und Digitalisierung. Sie treiben sowohl technologische, als auch soziale Innovationen der Mobilität an. War die Kaufentscheidung der Verbraucher im Jahr 2011 noch mehrheitlich von der persönlichen wirtschaftlichen Lage motiviert (KPMG, 2011), änderte sich diese Präferenz im Jahr 2018 Richtung Ökologie, Komfort und Sport (KPMG, 2018). Dieser Trend soll sich aber gemäss der Umfrage von KPMG für die Zukunft ändern: 2 von 3 befragten Führungskräften sind sich absolut oder teilweise einig, dass traditionelle Einkaufskriterien mit dem Aufkommen von selbstfahrenden Autos irrelevant werden. Autonomes Fahren bestimmt in Zukunft die Art und Weise, wie wir Autos nutzen werden. Sobald das Auto selbst fahren kann, spielt es keine Rolle mehr, ob der Kunde in einem reinen Batterie- oder Brennstoffzellen-Elektrofahrzeug sitzt (KPMG, 2018). Das Bevölkerungswachstum der nächsten Jahre konzentriert sich fast vollständig auf die Stadtregionen der Welt. Lebten um 1900 etwa 165 Millionen Menschen in Städten, werden es im Jahr 2050, Prognosen zufolge, 70 bis 80 Prozent von etwa 10 bis 12 Milliarden sein. Je mehr Menschen sich den immer engeren Raum teilen, desto knapper wird der Funktionsraum für die Automobilität. In den rasant wachsenden Metropolregionen der Welt, vor allem den asiatischen, ist schlicht zu wenig Platz für weiterwachsende Automobilflotten und deren externe Effekte. Gemäss dem «World Transport Outlook» des Internationalen Transport Forums der OECD wird sich das Verkehrsaufkommen bis 2050 weltweit mindestens verdreifachen (OECD/ITF, 2017). Während in allen anderen Sektoren Effizienzsteigerungen und Verbrauchssenkungen mehr oder weniger erfolgreich umgesetzt werden, wachsen die externen Effekte der Mobilität immer schneller. Wie unter diesen Umständen die Mobilitätsanforderungen von bis zu 12 Milliarden Menschen auf nachhaltige Weise gewährleistet werden kann, bleibt fraglich. Es ist davon auszugehen, dass bei einer ungesteuerten Entwicklung, die Nachfrage nach fossilen

Brennstoffen und die Emissionen von Klimagasen, Luftschadstoffen und Feinstäuben, die Lärmemissionen, die Unfallkosten und der Material- und Raumbedarf der Mobilität sprunghaft ansteigen wird. (Bormann, Fink, & Holzapfel, 2018) Dennoch gibt es hohe Erwartungen an umweltfreundliche Autos in der Zukunft. ExxonMobil prognostiziert, dass im Jahr 2040 noch ein Anteil von 63% der Deutschen PKWs durch herkömmliche Verbrennungsmotoren angetrieben wird (ExxonMobil, 2018). Szenarien der «European Climate Foundation» prognostizieren einen Anteil an Verbrennungsmotoren von 3% für das Jahr 2040 in Deutschland (in diesem Szenario beträgt der Anteil 2040 der FCV 4% und BEV 49%) (Harrison & Chucholowski, 2017). Der Megatrend, der die soziale Struktur der Automobilität beeinflusst, ist die Individualisierung, also der Übergang von der sozialen Fremd- zur Selbstbestimmung von Menschen. In der Verkehrssoziologie gilt die Regel: Je entwickelter eine Gesellschaft ist, desto höher der Grad der Individualisierung und umso flexibler und spontaner wird das Verkehrsverhalten und desto weniger bündelungsfähig ist die Nachfrage. Überall dort, wo Individualisierung stattfand, prägte sich deswegen die Automobilnutzung stärker aus. (Bormann, Fink, & Holzapfel, 2018)

#### **4.5.4 Technologische Bedingungen**

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen, für die Automobilindustrie relevanten, technischen Entwicklungen besprochen. In der Automobilindustrie sind Technologie und Innovation zu einem entscheidenden Faktor geworden. Die innovativsten Unternehmen dominieren den Markt. Alle grossen Automobilhersteller investieren grosse Summen in Forschung und Entwicklung von neuen und effizienteren Antriebstechnologien. (Chodakowska, 2018)

Im Laufe der Geschichte war die Automobilindustrie immer eine der empfänglichsten Branchen für neue Technologien. Technologie hat die Art und Weise, wie Autos Kraftstoff verwenden, neu definiert. Elektro-, Hybrid- und Brennstoffzellen beginnen, sich als Antriebskraft der Zukunft zu etablieren. Es gibt aber noch andere technologische Entwicklungen, die für die Entwicklung der Automobilindustrie von grosser Bedeutung sind (Utermohlen, 2018). Im Folgenden werden die wichtigsten Technologien besprochen, die bereits jetzt oder in naher Zukunft auf die Automobilindustrie zukommen. In einem zusätzlichen Unterkapitel werden die technologischen Bedingungen der Wasserstofftechnologie separat besprochen.

#### **Elektro- und Hybridfahrzeuge**

Immer mehr und effizientere Elektro- und Hybridfahrzeuge, die mit einer Ladung Hunderte von Kilometern Reichweite haben, kommen auf den Markt. Im Jahr 2016 wurden weltweit mehr als 2 Millionen Elektrofahrzeuge verkauft, und es wird erwartet, dass diese Zahl in naher Zukunft steigen wird, da immer mehr Automobilhersteller die Elektrofahrzeugtechnologie in ihre Produktion integrieren. Unternehmen wie VW und General Motors haben kürzlich Elektroautos für ihre Flotte vorgestellt, während Volvo sagte, dass alle von ihnen produzierten Fahrzeuge bis 2019 mit einem Elektromotor ausgestattet sein werden. Elektrofahrzeuge werden auch günstiger, wobei Unternehmen wie Hyundai, Kia und Toyota Hybridautos unter der 30'000 USD Marke vorstellen. (Utermohlen, 2018) Auf der Umfrage von KPMG aus dem Jahr 2018 war die Elektromobilität auf dem Platz 2 der Global Trends bis 2025. (Die Wasserstoffmobilität ist der wichtigste Trend im Jahr 2018 und hat gegenüber dem 5. Platz im Jahr 2016 an Bedeutung gewonnen.) Dies zeigt, dass traditionell produktorientierte Trends immer noch auf der Agenda der Automobilindustrie einen wichtigen Stellenwert haben. FCV gehören auch zu den Elektrofahrzeugen und sind hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

#### **Selbstfahrende Technologie**

Der Trend zu selbstfahrenden Fahrzeugen wurde bereits im Kapitel 4.5.3 angesprochen. Bis heute wurde viel an der autonomen Fahrtechnik geforscht. Einige Unternehmen oder Projekte, wie die Buslinie 12

in Neuhausen, haben die selbstfahrenden Funktionalitäten auf offenen Strassen getestet (Amotech, 2019). Generell sind wir aber noch weit davon entfernt, diese Fahrzeuge im Alltag einzusetzen. Eine Reihe von Fahrzeugen verfügen bereits über teilautonome Fähigkeiten, in Form von fahrerunterstützten Technologien, wie zum Beispiel Tesla (Tesla, 2019). Dazu gehören automatische Bremssensoren, Autobahnspursensoren, Kartierungstechnologie zur Überwachung blinder Flecken, Kameras vor und hinter dem Fahrzeug, adaptive Geschwindigkeitsregelungen und selbst parkierende Fahrzeuge (Utermohlen, 2018).

### **Digitalisierung in der Fahrzeugtechnik**

Künstliche Intelligenz und «Machine Learning» spielen in der Zukunft der Automobilindustrie eine wichtige Rolle, da prädiktive Fähigkeiten im Auto immer häufiger eingesetzt werden und das Fahrerlebnis personalisieren. Die Digitalisierung und neue Geschäftsmodelle haben verschiedene Branchen komplett revolutioniert, die Automobilindustrie wird da keine Ausnahme sein. Für den Automobilsektor beschreibt (McKinsey, 2016), basierend auf einer Branchenumfrage, vier disruptive, technologiegetriebene Trends: «Diverse Mobility», autonomes Fahren, Elektrifizierung und Vernetzung. Die meisten befragten Branchenakteure und Experten sind sich einig, dass diese vier Trends sich gegenseitig unterstützen und beschleunigen. Unter den Befragten besteht allgemeiner Konsens darüber, dass die Automobilbranche reif für eine disruptive Technologie ist. Folgende Beispiele für die verschiedenen disruptiven Trends konnten identifiziert werden (McKinsey, 2016):

- «Diverse Mobility»:
  - Neue On-Demand-Geschäftsmodelle
  - Verlagerung weg vom PW-Besitz hin zur gemeinsamen Mobilität
- Autonomes Fahren:
  - Regulatorische Herausforderungen werden gemeistert
  - Entwicklung sicherer und zuverlässiger technischer Lösungen
  - Akzeptanz und Zahlungsbereitschaft der Verbraucher
- Elektrifizierung:
  - Die Batteriepreise sinken weiter
  - Regulatorisch bedingte Emissionsbeschränkungen
  - Verbrauchernachfrage nach elektrifizierten Antrieben
- Vernetzung:
  - Einführung der globalen Fahrzeuganbindung
  - Verbraucher, die regelmässig kostenpflichtige Inhalte nutzen

Die intelligente Fahrzeugtechnologie kann auch in Form von Sensoren in einem Fahrzeug eingebaut werden, z.B. um den Eigentümer darüber informieren, ob das Fahrzeug gewartet werden muss. Je nach Kilometerstand und Zustand Ihres Fahrzeugs kann die Technologie die Leistung abschätzen, Termine in Echtzeit vereinbaren und die Benutzer über Sicherheitsrisiken im Zusammenhang mit einem defekten Fahrzeug aufgrund von Firmenrückrufen informieren. Damit kann die «Uptime», Lebenserwartung und Servicezeit für den Kunden optimiert werden. (Utermohlen, 2018)

Die Digitalisierung hat aufgrund der ihr Entwicklungsdynamik in den Feldern der digitalen Vernetzung, der Automatisierung und der künstlichen Intelligenz die potenziell stärksten disruptiven Innovationswirkungen. (Chodakowska, 2018)

## 4.6 Branchenstrukturanalyse der Wasserstoffmobilität

---

Spezifische Wettbewerbsbedingungen werden über die erfolgreiche Durchdringung der Wasserstoffmobilität als Ersatz für herkömmliche Antriebstechnologien entscheiden. Porter's Methodik der Branchenstrukturanalyse, das sogenannte «Five Forces» Model (eng. für Fünf-Kräfte), wird in dieser Arbeit verwendet, um einen Überblick über mögliche Wettbewerbskräfte der sich entwickelnden Wasserstoffmobilität zu geben. Eine weitere Erklärung der Methodik ist im Kapitel 2.7 zu finden.

Die erfolgreiche Markteinführung neuer Produkte wird massgeblich von den Wettbewerbsbedingungen beeinflusst. Diese Wettbewerbsbedingungen beziehen sich auf ein Unternehmen und auf sein Produkt in Bezug auf sein Umfeld. Obwohl das relevante Umfeld sehr breit ist und soziale und wirtschaftliche Kräfte umfasst, ist der Schlüsselaspekt des Unternehmens und seiner Produkte die Branche, in der es konkurriert. Im Kapitel 4.5 wurde eine detaillierte Analyse des Marktumfelds und der Branche durchgeführt. Die wichtigsten Erkenntnisse über treibende und hemmende Kräfte für die Marktdurchdringung von Wasserstoff wurden mit verschiedenen Experten und aus der Literatur erarbeitet (vgl. Kapitel 4.2 & 4.3). Massgebend für die hier dargestellte Branchenstrukturanalyse ist die Analyse von (Lemke, 2016) welche auf spezifischen Ergebnissen aus einer Expertengruppe in der Delphi-Analyse aufbaut.

### 4.6.1 Eintrittsbarrieren der Wasserstoffmobilität

Die Eintrittsbarrieren der Akteure zur Wasserstoffmobilität sind in der Regel hoch. Gründe dafür sind u.a. die bereits unternommenen hohen F&E-Aufwendungen der Wasserstofftechnologie. Weitere Faktoren, die von einem Eintritt abhalten können, sind strategische Entscheide, emotionale Barrieren und staatliche oder ökologische Restriktionen. Darüber hinaus benötigt Wasserstoffmobilität hoch spezialisierte Anlagen, was zu einer weiteren Erhöhung der Ein- und Austrittsbarrieren führt und das Gewinnpotenzial, aber auch die damit verbundenen Risiken erhöht. Für den Eintritt während der frühen Marktphase muss Kapital in Wasserstoffproduktionsanlagen, -Infrastruktur, -Verteilungs- und -Service investieren werden. Da alle Hersteller derzeit mit diesen Barrieren konfrontiert sind, gilt gemäss (Lemke, 2016) folgendes für Neueinsteiger und Interessenvertreter von Wasserstoffherstellern:

- **Kapitalbedarf:** Die Markteinführung der Wasserstofftechnologie hat einen enormen Kapitalbedarf für F&E, Montage von Produktionsanlagen, Steuerungssystemen, Wasserstoffproduktion- und Verteilsystemen usw. Diese Investitionen sind im Falle eines Technologieversagens als Verluste abzubuchen. (Lemke, 2016)
- **Wechselkosten:** Nach der Erstinvestition in ein FCV kommen weiterhin Wechselkosten auf den Kunden zu. In der frühen Markteinführungsphase muss er mit zusätzlichen Anstrengungen rechnen, um eine Tankstelle und eine spezialisierte Servicestelle zu errichten. FCV-Dienstleister werden mit höheren Kosten für die Umschulung von Personal, für neue Zusatzausrüstungen und Aufwand für die Prüfung der neuen Technologie konfrontiert. Flottenbetreiber, wie das Projekt von Coop und H2 Energy zeigen (vgl. Kapitel 3.4.1), müssen am Anfang in den Bau und Betrieb eigener Wasserstofftankstellen (HRS) investieren, um eine grössere Anzahl von FCVs zu füllen. Für diese Flottenbetreiber besteht das Risiko, dass die Wasserstoffmarkteinführung nicht gelingt. (Lemke, 2016)

Die Erfahrungen aus dem Markteintritt von NGVs haben gezeigt, dass auch begeisterte Kunden mit Schwierigkeiten beim Zugang zu den Vertriebskanälen rechnen müssen (vgl. Kapitel 4.1), z.B. bei der Suche nach einem Händler, der in der Lage ist, ein FCV zu verkaufen. Die Anzahl der verfügbaren Modelle ist während der Markteinführungsphase begrenzt. Die Industrie wird die richtige Marketingstrategie wählen müssen, um die Vorteile der Wasserstoffmobilität zu verkaufen und den Kunden

vom Wechsel zu überzeugen. In jedem Fall sind sinkende Preise für den Markterfolg unerlässlich. Darüber hinaus sind einige politische Rahmenbedingungen noch unklar (Infrastrukturbaugenehmigungen, Abgaben der CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen, weitere Subventionen usw.).

#### 4.6.2 Rivalitätsgrad der Wasserstoffmobilität

Akteure der Wasserstoffmobilität sind, in der aktuellen Phase der Markteinführung, voneinander abhängig. Diese wechselseitige Abhängigkeit der Akteure überlagert den üblichen Wettbewerb zwischen ihnen. Konventionelle Mechanismen zur Verteidigung von Marktanteilen funktionieren während der Markteinführungsphase nicht. Die Etablierung branchenübergreifender Allianzen zur Unterstützung des Vermarktungsprozesses ist ein wichtigerer Indikator, da sich die Unternehmen verpflichten, ihre zukünftigen Aktivitäten vertraglich und verbindlich zu ordnen. Dies kommt zum Beispiel beim «Förderverein H2», bei «move», «H2-Mobilität in Deutschland» oder weiteren Förderprojekten bzw. Kooperationen (vgl. Kapitel 4.1) zum Ausdruck. Eine Expertengruppe geführt von (Lemke, 2016) kam zur Erkenntnis, dass solche Kooperationsvereinbarungen gemeinsam auf eine kostengünstigere und schnellere Technologieentwicklung der Wasserstoffmobilität abzielen. Auch die Öffentlichkeitsarbeit wird, wie anhand der genannten Beispiele erkannt werden kann, bis zu einem gewissen Grad gemeinsam durchgeführt. Darüber hinaus beteiligen sich Regierungsvertreter (BFE) an diesen Allianzen, die an der Entwicklung neuer Technologie forschen. Dennoch ist in Zukunft nach erfolgreichem Einstieg in die Wasserstoffmobilität mit der gleichen Rivalität wie im konventionellen Fahrzeugmarkt zu rechnen. Der Grad der Wettbewerbsintensität in der Automobilbranche ist als hoch einzustufen. In den letzten Jahren fand eine starke Konzentration in der Branche statt. Die Marktsättigung, die Schrumpfung der Märkte in entwickelten Ländern und die daraus entstehenden Überkapazitäten führen zu einem harten Preiswettbewerb in der Automobilbranche (Steger, 2004). Die Marktbarrieren gegenüber neuen Wettbewerbern sind hoch aufgrund des hohen technischen Wissens und der genannten hohen Investitionen, die für die Entwicklung erforderlich sind. Es existiert jedoch eine enge technologische Verbindung von FCV zu anderen alternativen Fahrzeugen (BEVs, HEVs, PHEV). Diese würde auch einen späteren Zugang zur Technologie mit extern gekauften Brennstoffzellen und entsprechendem System-Know-how ermöglichen. (Steger, 2004)

Eine wachsende Marktteilnehmeranzahl in einer Branche bringt neue Marktkapazitäten mit sich. Dies könnte eine Chance für Wasserstoffproduzenten sein. Die Wasserstoffmobilität erhält dadurch eine grössere Anzahl verfügbarer FCV-Modelle auf der Strasse, das wiederum führt zu mehr Aufmerksamkeit für die Technologie und zu einer höheren Kapazitätsauslastung der Infrastruktur (vgl. Abbildung 12: CLD Wasserstoffmobilität Schweiz). Natürlich bringt das aber auch den Wunsch nach grösseren Marktanteilen und höheren Gewinnen der einzelnen Akteure mit sich. Die Wasserstoffpreise können sinken und sogar die Kosten für Fahrzeuge können dadurch reduziert werden. Diese Entwicklung wäre gut für die Wasserstoffmobilität, aber schlecht für die Kostendeckung durch die Wasserstoffhersteller. Im Allgemeinen hängt die Gefahr des Markteintritts von der Höhe der Markteintrittsbarrieren ab. Da alle Hersteller derzeit mit diesen Barrieren konfrontiert sind, gilt gemäss (Lemke, 2016) folgendes für die Neueinsteiger und Interessenvertreter von Wasserstoffherstellern:

- **«Economies of scales»:** die FCV-Kosten werden allein durch die Erhöhung der Anzahl der Einheiten, sowie den Gewinn an Lerneffekten reduziert. Die Anzahl der FCVs auf der Strasse beeinflusst den Marktpreis von Wasserstoff. Die Kapazität der Wasserstoffinfrastruktur wird bei zunehmender Anzahl FCV besser genutzt und die Fixkosten könnten auf ein grösseres Volumen verteilt werden. Ein erweitertes Wasserstoffproduktions- und Verteilsystem könnte langfristig von der verteilten Produktion und dem LKW-Transport zu einer effizienteren zentralen Produktion oder gar dem Pipelinetransport zu Verteilzentren für grosse Wasserstoffvolumina übergehen. Die in der Folge resultierende Preisreduktion des Wasserstoffs hat wiederum einen

erheblichen Einfluss auf die FCV, insbesondere im Schwerverkehr (LKW), der sich durch einen hohen spezifischen Treibstoffverbrauch und eine hohe Fahrleistung auszeichnet (vgl. Kapitel 3.3.3).

#### 4.6.3 Bedrohungspotenziale durch Substitutionsprodukte

Die Auswirkungen von Substitutionsprodukten, konventionellen oder alternativen Fahrzeugen, auf die Marktdurchdringung der Wasserstoffmobilität, hängen von der Qualität und dem Preis der Substitute, sowie der Ersatzbereitschaft des Käufers ab. Basierend auf verschiedenen Expertengesprächen und der Delphi-Analyse von (Lemke, 2016) sind die ernsthaften Ersatzkonkurrenten für die Wasserstoffmobilität:

- Vollständig hybridisierte und teilweise biobetriebene, etablierte Antriebssysteme (HEV)
- Batterie betriebene, voll elektrifizierte Fahrzeuge (BEV)
- Öffentlicher Verkehr und andere nicht motorisierte Mobilitätsoptionen, wobei gemäss (Lemke, 2016) und anderen Studien (KPMG, 2018) das Auto das wichtigste Verkehrsmittel für den Personenverkehr bleiben wird.
- Verteidigungsmassnahmen von konventionellen Fahrzeugenhersteller sind denkbar, analog zum Jahr 2007: Die europäische Automobilindustrie setzte sich gemeinsam gegen die Rechtsvorschriften der Europäischen Kommission ein, um das Ziel von 120 g CO<sub>2</sub>/km zu kippen (Nilsson, Hillman, & Rickne, 2012). Dies führte aber nur zu einer Verzögerung, die Verordnung wurde 2008 umgesetzt (BMU, 2019).

FCVs konkurrieren in mehreren Merkmalen mit den Ersatzprodukten. Die relevantesten Charakteristiken werden im Folgenden auf der Grundlage von (Lemke, 2016) aufgeführt und kurz bewertet:

- **Fahrzeugverkaufspreis:** hat einen hohen Marketingwert. Das heisst die Erreichung eines guten Kaufpreises trägt zur Kundenzufriedenheit bei. Substitute für FCV-Antriebssysteme setzen eine Obergrenze für FCV-Preise.
- **Kraftstoffpreis und -verbrauch:** Dieser unversteuerte Wasserstoff könnte bereits heute mit fossilen Brennstoffen konkurrieren. Dazu kommt, dass erwartet wird, dass die Wasserstoffkosten in den kommenden Jahren sinken werden, was auf eine höhere Auslastung der Infrastruktur und auf Skalenvorteile zurückzuführen ist.
- **Total Costs of Ownership (TCOs):** Für gewerbliche Verbraucher sind die TCOs meistens der wichtigste Entscheidungsfaktor. Bei der TCO-Berechnung sind Unterschiede in den Bereichen durchschnittliche Kilometerleistung, Kraftstoffkosten, CO<sub>2</sub>-Abgaben und Steuern, wie die LSVA, zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3.5)). Fahrzeuge mit einem herkömmlichen Verbrennungsmotor (ICE) haben derzeit die niedrigsten TCOs. BEVs und FCVs haben einen höheren Anschaffungspreis als ICEs, aber niedrigere Kraftstoffkosten (aufgrund höherer Effizienz und Steuervorteile und Subventionen). Die Wartungskosten konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht verifiziert werden, dürften aber aufgrund von weniger rotierenden Teilen niedriger sein.
- **Qualität des Substitutionsproduktes:** Die zentrale Frage nach der Qualität eines jeden Antriebssystems ist, welches System die Funktion des einzelnen Fahrzeugs unter den geltenden gesetzlichen Anforderungen am besten erfüllen kann. Die erste Funktion eines Autos ist die Bereitstellung von Mobilität (Reichweite, angemessene Grösse und Komfort). Hybridtechnologien mit verbesserter Energieeffizienz bieten die beste Reichweite und Betankungszeit bei den aktuellen Tankgrössen. BEVs sind durch Reichweite und Fahrzeuggrösse aufgrund von Energiespeicherbeschränkungen begrenzt. Ein durchschnittliches, mittleres BEV ist heute noch im

Stadtverkehr auf eine Reichweite von rund 200 Kilometer begrenzt. Die verfügbare Energiemenge schränkt auch den Einsatz von Klimaanlage, Heizungsanlagen und anderen elektrischen Verbrauchern ein, insbesondere im Winter. FCVs haben eine gute Reichweite (ca. 600 km bis zu 800 km mit Entwicklungspotential) und eine kurze Betankungszeit (< 5 Minuten) vergleichbar mit ICEs (vgl. Kapitel 3.3.3).

- **Öffentliche Infrastruktur:** Die Dichte der Betankungsinfrastruktur der konventionellen Kraftstoffe ist der Massstab für alle anderen Antriebssysteme. Heute fehlt den BEVs und FCVs eine dichte öffentliche Infrastruktur, aber es gibt bereits Konzepte für flächendeckende Infrastruktur (vgl. Kapitel 3.4). Öffentliche HRS können in das bestehende Tankstellennetz integriert werden. So wäre das Befüllen für die Nutzer in Bezug auf Service, Shop, Abrechnung, Nutzung und Abrechnung von Tankkarten bequem und schneller als bei BEV.

#### 4.6.4 Verhandlungsstärke der Abnehmer

Der Neuwagenmarkt verteilt sich auf gewerbliche und private Kunden. Beide Käufertypen versuchen, die Preise zu drücken oder höhere Qualität und bessere Dienstleistungen auszuhandeln. Die Macht der Käufer hängt von der relativen Bedeutung ihrer Einkäufe in der Branche im Vergleich zum Gesamtgeschäft und zu spezifischen Marktsituationen ab (Lemke, 2016). Die Abnehmer können die Preise stark verhandeln, höhere Qualität oder bessere Leistung verlangen und Wettbewerber gegeneinander ausspielen, was insgesamt zu Lasten der Rentabilität der Anbieter geht. Die Stärke jeder wichtigen Abnehmergruppe hängt von bestimmten Merkmalen ihrer Marktsituation und dem Anteil ihrer Käufe an den gesamten Verkäufen der Branche ab. (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2009)

Im Allgemeinen machen die Fahrzeugkosten einen wesentlichen Teil der Kosten des gewerblichen Käufers aus. Somit werden kommerzielle Flottenbetreiber anfällig dafür sein, zu einem günstigen Preis einzukaufen zu wollen, d.h. sie kennen die TCOs und die Wiederverkaufswerte der Fahrzeuge genau. Darüber hinaus sind gewerbliche Fuhrparkbesitzer nicht nur auf kosteneffiziente, sondern auch auf qualitativ hochwertige und zuverlässige Fahrzeuge angewiesen, da sie die Grundlage für ihr Geschäft bilden. Es ist daher zu erwarten, dass alternative Antriebssysteme nach mehreren Testläufen nur langsam und schrittweise in die kommerziellen Flotten gelangen können. Öffentliche Abnehmer sind verpflichtet, externe Emissionen und CO<sub>2</sub>-Kosten in die TCO-Berechnung zu integrieren, was sie zu einem interessanten Kunden macht. Auch «Carsharing»-Unternehmen können zu einem interessanten Kunden werden, da sie selten von einer ländlichen H<sub>2</sub>-Infrastruktur abhängig sind. Sie bieten einer Vielzahl von Kunden Mobilität und benötigen Fahrzeuge in ihrem Fuhrpark, die sie von den Wettbewerbern unterscheiden, allerdings wird die absolute Verkaufszahl gering sein. (Lemke, 2016)

Die Präferenzen der Privatkunden sind sehr unterschiedlich. Für Privatkunden ist der Kauf eines Fahrzeugs eine grosse Investition. Private Käufer reagieren empfindlicher auf Investitionskosten als auf TCOs. Image und Marke sind weitere wichtige Entscheidungskriterien. Insbesondere Privatwagen sind ein hochdifferenziertes Produkt, das nicht nur das Fahren von A nach B erlaubt, sondern selbst einen hohen emotionalen Wert hat. Diese individuellen Kaufentscheidungen werden stark von subjektiven Kriterien beeinflusst. Die Vermarktung alternativer Antriebssysteme muss nicht nur diese emotionalen Faktoren berücksichtigen, sondern auch umfassende Informationen liefern, um Technologie und TCOs zu erklären. Die Erfahrungen aus der Vermarktung von NGVs zeigen, dass diese Aufgabe schwierig umzusetzen sein kann. Allerdings werden alle alternativen Antriebssysteme unter dieser Einschränkung leiden. (Lemke, 2016)

Auf diese Weise können Einzelhändler eine erhebliche Verhandlungsmacht erlangen, wenn sie in der Lage sind, die Kaufentscheidung der Verbraucher zu beeinflussen. Der Händler kann es vorziehen, herkömmliche Technik zu verkaufen, um Probleme mit der neuen Technologie beim Käufer und in seiner

Garage zu vermeiden. Innovationsbereite Händler können jedoch weit über den normalen Geschäftskontakt hinaus Anerkennung finden. Darüber hinaus erfordert die Markteinführung neuer Fahrzeugtechnologien auch die Implementierung der zugehörigen Service-Infrastruktur bei Handel und Werkstätten. So hat Opel beispielsweise im Rahmen der Markteinführung des Opel Ampera sein europäisches Servicenetz für die Arbeit mit Hochspannungsanlagen, sowie die Reparatur von elektrischen Antrieben ausgebaut. (Lemke, 2016)

#### 4.6.5 Verhandlungsstärke von Lieferanten

Lieferanten können ihre Verhandlungsstärke ausspielen, indem sie drohen, die Preise zu erhöhen oder die Qualität zu senken. Mächtige Lieferanten können sogar die Rentabilität von ganzen Branchen drücken, die nicht in der Lage sind, die Kostensteigerungen in ihren eigenen Produkten weiterzugeben. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Produktauswahl, die der Lieferant bestimmt. (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2009)

Aktuell gibt es in der Schweiz nur zwei FC-PW im Handel, einen FC-Bus und einen FC -LKW (vgl. Kapitel 3.3.3). Die FCV- und Komponentenindustrie befindet sich noch in der Entwicklung. In den Gesprächen mit den Experten wurde immer wieder auf genau diesen Zustand verwiesen. Gemäss (Vock, 2019) und (Holdener, 2019) waren die Verhandlungen mit den europäischen Fahrzeughersteller (LKW) langwierig und ergebnislos. Im Projekt von PostAuto Schweiz hat der Hersteller (Daimler) während des Projektes die Strategie geändert, dies führte u.a. dazu, dass das Projekt nicht verlängert wurde (vgl. Kapitel 3.4.1). Die PostAuto AG wäre an neuen Brennstoffzellenbussen interessiert, aber es gibt noch kein Angebot, das ihren Anforderungen entspricht (Wüest, 2019).

Die Automobilindustrie selbst ist wiederum stark mit der Zulieferindustrie vernetzt. Beide Industriezweige sind hochkonzentriert und produzieren mit hohen Stückzahlen und in hohen Standards. Die Automobilindustrie ist ein sehr wichtiger, oft sogar der einzige Kunde der Komponentenindustrie. Daher hat die Komponentenindustrie ein grosses Interesse an der Entwicklung der Automobilindustrie. Einige der Komponentenanbieter sind in der Lage, Verhandlungsmacht auszuüben, indem sie drohen, die Preise zu erhöhen oder die Leistung zu verringern. Die Verhandlungsmacht hängt aber stark vom Produkt und dem Umfeld ab, sie können aber in den meisten Fällen ausgetauscht werden. Im Übrigen sind die Automobilhersteller dafür bekannt, dass sie die Drohung mit der Eigenfertigung als Verhandlungsdrohung nutzen. Dies verkürzt die Verhandlungsmacht der Lieferanten. (Lemke, 2016)

#### 4.7 Markteinführung durch den Schwerverkehr

---

Für eine zuverlässige Prognose wäre mindestens eine annähernd konstante strukturelle Beziehung zwischen den relevanten Variablen erforderlich. Solche sind in der frühen Phase der Marktentwicklung, in der sich die Wasserstoffmobilität befindet, ungenau. Es sollte vielmehr davon ausgegangen werden, dass strukturelle Disruptionen und unvorhersehbare Ereignisse eintreten. Daher entzieht sich diese Arbeit der Erstellung einer Prognose über eine detaillierte Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität. In diesem Kapitel wird aber ein möglicher Weg zur erfolgreichen Implementierung und Marktdurchdringung der Wasserstoffmobilität allgemein an Hand von fünf Erfolgsfaktoren, skizziert. Dieser Ansatz orientiert an der Delphi Analyse von (Lemke, 2016). Anschliessend wird die aktuell in der Schweiz diskutierte Markteinführung der Wasserstoffmobilität über den Schwerverkehr genauer betrachtet.

1. **FCV sowie Wasserstoffproduktions - und -Vertriebstechnologien haben ein hohes Mass an Marktreife erreicht:** Die Literaturrecherche und die Expertengespräche bestätigen, dass die Wasserstofftechnologie inzwischen eine hohe technische Einsatzbereitschaft erreicht haben: Die Phase der Grundlagenforschung geht dem Ende entgegen (vgl. Abbildung 4: TRL von Brennstoffzellenanwendungen). Die Unternehmen der Branche bereiten sich auf die

Markteinführung von (Stichwort: Coop, H2-Energy, Toyota, Honda, Hyundai und Daimler). Es sind die praktische Erfahrung und die Kostensenkung, die nach wie vor ein Thema sind. (Lemke, 2016)

2. **Ein stabiler und ambitionierter gesetzlicher Rahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie staatliche Anreize werden Branchen und Kunden zu Investitionen anregen.** In den letzten zehn Jahren hat die EU mit verschiedenen politischen Massnahmen (Flottenzielen, Steuern und anderen finanziellen Anreizen) experimentiert. Auch in der Schweiz gibt es solche Massnahmen (CO<sub>2</sub>- Emissionsvorschriften & LSVA Befreiung (vgl. Kapitel 3.5)). Unter der Annahme, dass sich die Kosten für eine Energiewende (kohlenstoffarmer Übergang) nicht wesentlich von den Kosten unterscheiden, die von steigenden Preisen für fossile Brennstoffe und der Einhaltung der bestehenden Klima- und Energiepolitik entstehen werden, sollten Entscheidungen durch einen gesellschaftlichen Konsens über zukünftige Ziele der Energie-, Klima- und Verkehrspolitik gesteuert werden. Dafür müssen die langfristigen Ziele aber noch in konkrete, gesetzliche Anforderungen oder andere Massnahmen umgesetzt werden. (Lemke, 2016)
3. **Die Wasserstoffmobilität hat einen hohen Grad an Übereinstimmung mit den gesellschaftlich angestrebten Zielen:** Recht auf Mobilität, Freizügigkeit, Klimaschutz, Schutz vor gesundheitlichen Auswirkungen durch Fahrzeugemissionen, nachhaltiges Wachstum, Energiesicherheit. (Lemke, 2016)
4. **Die Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur kann zum Erfolg der Wasserstoffmobilität führen.** Gemäss der der Delphi-Analyse von (Lemke, 2016) ist die geeignete Bereitstellung einer Wasserstoffinfrastruktur, zusammen mit zielgerichteten Massnahmen und Regulierungen, der zentrale Erfolgsfaktor für die Wasserstoffmobilität. Während der Markteinführungsphase ist ein starker Anstieg der FCV notwendig, um das Netz zu nutzen. Zusätzlich sind Investitionen in die Wasserstoffproduktion erforderlich. Denn beim aktuellen Kraftstoffverbrauch und den prognostizierten Kraftstoffkostenreduktionen, wären die Fahrkosten und somit die TCO ohne Steuern sehr günstig.
5. **Reduzierung hoher FCV-Kosten durch Skaleneffekte und Weiterentwicklung der Technologie.** F&E-Aktivitäten führen zu technischem Fortschritt. Der technische Fortschritt ermöglicht es, bestimmte technische Ziele zu erreichen und dadurch FCV attraktiver zu machen. Letztendlich ist F&E ein Wegbereiter für die Erreichung von FCV und Wasserstoff spezifischen Preiszielen, der zur Kundenakzeptanz beiträgt. (Lemke, 2016)

Die aktive Vermarktung der Wasserstoffmobilität durch die Interessengruppen und die wachsende öffentliche Akzeptanz der Technologie werden die Marktnachfrage weiter anregen. Die Delphi-Experten von (Lemke, 2016) bewerteten die Entwicklung des Umweltbewusstseins auf der Verbraucherseite sehr positiv. Umgekehrt spiegelte sich dies aber nicht in der Zahlungsbereitschaft wider. Strengere CO<sub>2</sub>-Autonormen werden die Kosten für etablierte Technologien erhöhen und dazu beitragen, die Kostenlücke zu schliessen, insbesondere nach 2021. Es wird aber nicht davon ausgegangen, dass in den nächsten 20-30 Jahren eine einzige Antriebstechnologie alle wichtigen Kriterien für Wirtschaftlichkeit, Leistung und Umwelt erfüllen wird.

Mehrere Markteinführungsstrategien für Wasserstoffmobilität werden derzeit weltweit diskutiert. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten vier grundlegende Strategien zur Einführung von FCV und zum Aufbau der Kraftstoffinfrastruktur identifiziert werden. (Janssen, 2005) fasst diese Strategien wie folgt zusammen:

1. **Entwickeln eines Rückgrats:** Die Regierung entwickelt, finanziert und festigt das «Rückgrat» der Wasserstoffinfrastruktur. Anschliessend fliessen private Mittel in die Entwicklung der lokalen Tankstellen ein, die an das Rückgrat angeschlossen sind.
2. **Wasserstoffversorgungszentren:** Frühe Wasserstoffversorgungszentren könnten im Zusammenhang mit Demonstrationsanlagen sowohl von Transport- als auch von stationären Brennstoffzellen entwickelt werden. Dies können Orte wie Universitäten oder Bürogebäude sein. Es wird argumentiert, dass dieser Ansatz die Investitionskosten für die beiden Brennstoffzellenanwendungen in der Stadt reduzieren könnte.
3. **Halten des Status-Quo:** Die Marktentwicklung sich selbst, bzw. der normalen Marktdynamik überlassen.
4. **Nischenmarktansatz:** Neue Technologien erobern typischerweise winzige Nischenmärkte, bevor sie sich in der breiten Anwendung verbreiten. Die Identifizierung der «Early Adapters», die eine hohe Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie haben und diese Nischenmärkte bilden, ist der Schlüssel zur erfolgreichen Einführung dieser neuen Technologien.

Der Ansatz, der in der Schweiz aktuell rege diskutiert wird und sich bereits auf dem Weg zur Umsetzung befindet, ist eine Kombination aus den eben aufgezählten Ansätzen. Ebenfalls sind die am Anfang des Kapitels aufgeführten fünf Erfolgskriterien ein wichtiger Bestand dieses Ansatzes. Grundsätzlich hat sich der Ansatz über die normale Marktdynamik (Halten des Status-Quo) entwickelt. Die Privatwirtschaft, in Form von H2 Energy und des Fördervereins (vgl. Kapitel 3.5) ist im Begriff, ohne spezifische Stimulation der Politik, eine Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Sprich sie entwickeln ein Rückgrat für die Wasserstoffmobilität über Versorgungszentren. Das Marktsegment, welches ausgewählt wurde, ist der Schwerverkehr. Diese Markteinführungsstrategien und ihre spezifischen Treiber und Barrieren werden in diesem Kapitel an Hand von verschiedenen Studien und Expertenmeinungen besprochen.

### **Wettbewerbsfähigkeit des Wasserstoffschwerverkehrs**

In der Studie «Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks» (Lee, Elgowainya, & Kotz, 2018) wird eine Vielzahl von entscheidenden Lebenszyklusvorteilen aufgezeigt, die FC-LKW gegenüber herkömmlichen Diesel-LKW erzeugen, indem sie den Ölverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Luftschadstoffemissionen auf «Well-to-Wheel»-Basis reduzieren. Gemäss dieser Studie reduzieren FC-LKW über den Lebenszyklus oder «Well-to-Wheel» (WTW) den Verbrauch von fossiler Energie um mehr als 98% im Vergleich zum Diesel-LKW. Im Wettbewerb mit herkömmlichen Diesel-LKW, zeigen sich die Vorteile der FC-LKWs attraktiv, insbesondere für die städtischen und/oder lokalen Fahrbedingungen. (Lee, Elgowainya, & Kotz, 2018)

Nebst der Dekarbonisierung des Schwerverkehrs führte (Vock, 2019) und (Holdener, 2019) ein weiteres entscheidendes Kriterium für die FC-LKW an, einen konkurrenzfähigen TCO. Die Berechnungen auf der diese Aussage beruht, konnten nicht eingesehen werden, da sie auf internen Informationen von H2 Energy beruhen. Es ist jedoch bekannt, dass Coop auf ein Abkommen mit H2 Energy (vgl. Kapitel 3.5) eingegangen ist. Auch ist bekannt, dass TCO einen sehr hohen Entscheidungswert bei Logistik Unternehmen haben.

In der Deutschen Fraunhofer Studie (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017) wurde mit einem TCO-Model Marktpotentiale von FC-LKW im Jahr 2030 abgeschätzt, mit der Erkenntnis, dass bei LKW unter 12 Tonnen und einer jährlichen Fahrleistungen zwischen 40'000 und 70'000 km, die TCO-Werte aller Technologien in sehr ähnlichen Grössenordnungen liegen. Dies bedeutet, dass schon leichte Kostensenkungen bei Produktion und Entwicklung deutliche Verschiebungen bei den Marktpotentialen zur Folge haben können. Wie in dieser Arbeit bereits erwähnt wurde, ist genau dies bei der Brennstoffzelle zu erwarten (vgl. Kapitel 3.3.2). Bei LKW über 12 Tonnen konnten (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017) derzeit

im TCO-Modell keine Marktpotentiale für FC-LKW erkennen. Weiter wird festgehalten, dass unabhängig von Grössenklassen und Jahresfahrleistung, die FC-LKW stets in direkter Konkurrenz zu Erdgaslösungen (CNG & LNG) stehen. Die graphische Darstellung der TCO- Modellergebnisse im Jahr 2030 vom Fraunhofer ISI & IML sind im Anhang 10-XIV zu finden. (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017)

Wichtige Einflussgrössen auf den TCO sind, gemäss (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017) die Entwicklungen des Kraftstoffpreises und Wirkungsgrades. Der durchschnittliche Kaufpreis eines LKW ist verglichen mit einem PW je nach Grössen zwischen zwei- und dreimal teurer. Der Kraftstoffverbrauch aber liegt um rund das drei bis viereinhalbfache über den Werten eines PW. Dazu kommt, dass LKW im Mittel vier- bis achtmal höhere Fahrleistungen haben. Diese führt dazu, dass bei aktuellem Kraftstoffpreis, die Investition etwa 60% der Gesamtkosten eines PWs ausmachen. Bei einem LKW liegen diese bei unter 20%. Der Anteil der Kraftstoffkosten ist bei LKW hingegen mehr als doppelt so hoch wie beim PW. Steigt der Dieselpreis an, so verschiebt sich dieses Verhältnis weiter in Richtung der Kraftstoffkosten. Die Wirkungsgrade konventioneller Antrieben sind kaum noch zu steigern, jene der Brennstoffzellen aber schon. Jede weitere Steigerung des Wirkungsgrades führt zu einer Senkung der variablen Kosten. In Kombination mit wachsender Jahresfahrleistung der LKW kann dies zu TCO-Vorteilen der FC-LKW gegenüber den konventionell angetriebenen LKW führen. (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017)

Inwiefern die TCO- Modellergebnisse für das Jahr 2030, welche für den Markt Deutschland berechnet wurden, auf die Schweiz übertragbar sind, konnte nicht festgestellt werden. Der Einfluss der Wirkungsgrade und des Kraftstoffpreises auf den TCO darf auch in der Schweiz angenommen werden, speziell, da sich diese Aussagen mit Expertenmeinungen decken (Bach, 2019). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor, welcher in der Schweiz zu berücksichtigen ist und ebenfalls von (Bach, 2019) hervorgehoben wurde, ist die LSVA, die bei FC-LKW wegfällt (vgl. Kapitel 3.5.2). Zusätzlich ist bekannt, dass Coop und H2 Energy einen, nach eigener Aussage, wirtschaftlichen Business Case haben und vorantreiben. Aufgrund dieses und den übrigen genannten Fakten, kann davon ausgegangen werden, dass FC-LKW durchaus konkurrenzfähig zu konventionell angetriebenen LKW sind.

### **Einfluss der Betankung**

Im weltweiten Vergleich konnten, mit Ausnahme von Kalifornien und der Schweiz, hauptsächlich Forschungs- und Marktentwicklungsaktivitäten gefunden werden, die sich stark auf PW und Busse fokussieren (vgl. Kapitel 3.5). Hier gibt es, im Vergleich zu Marktentwicklung über LKWs einen deutlichen Unterschied: (a) LKWs haben andere optimale Betankungsorte; Wohngebieten und Autobahnen für PWs und Werks-, Industriegebieten oder entlang von Autobahnen für die LKW. Aus der Akzeptanzforschung bei PW ist bekannt, dass beim Besuch von Tankstellen nur geringe Umwege in Kauf genommen werden. Die Toleranz liegt bei etwa zehn Minuten (Ball & Wietschel, 2009). Eine vergleichbare Akzeptanz ist bei Transportdienstleistungsunternehmen anzunehmen, Tankaufenthalte müssen in die Routenplanung integrierbar sein. Für den Schwerverkehr ergeben sich Synergien mit PW - Tankstellen entlang der Autobahnen. (b) LKW betanken mit deutlich grösseren Volumina, in etwa das 10- bis 20-fache eines durchschnittlichen PW.

Hier setzt die Marktentwicklungsstrategien von H2 Energy an. Gemäss eigener Aussage (Vock, 2019) & (Holdener, 2019) benötigen sie 10 LKW für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Wasserstofftanksäule. Das ist möglich durch den deutlich höheren Verbrauch der LKW im Vergleich zu PW und dadurch, dass die LKW in regelmässigen, planbaren Abständen, zu den gleichen Tankstellen zurückkehren. So sollen die hohen Investitions- und Unterhaltskosten in wirtschaftlicher Weise gedeckt werden. Zahlen zu dieser Aussage wurden keinen veröffentlicht. Auch wurden keine anderen Erfahrungswerte oder Literaturangaben gefunden, die diese Aussage absichern könnten.

Die Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität über die Transportdienstleistung bringt aber gerade auch in der Betankung der LKW Risiken. Die Anzahl HRS hängt stark von der Betankungsstrategie der LKWs ab. Mit anderen Worten es ist entscheidend, ob die Fahrzeuge zu den Stationen fahren, wenn der Tank leer ist, oder ob sie dies zu Beginn oder am Ende des Tages machen. In der Studie von (Çabukoglu, Georges, & Küng, 2019) wurde berechnet, dass wenn die LKW am Abend, mit einer Betankungsrate von 30 g/s betankt werden, es um den Schweizer Bedarf der LKWs zu decken, rund 450 Wasserstoffzapfsäulen braucht. Tanken die LKWs immer bei leerem Tank und bei Bedarf, braucht es ein Netz mit rund 1'000 HRS. (Im Jahr 2018 gab es in der Schweiz 3'382 konventionelle Tankstellen (Erdöl-Vereinigung, 2018)) Diese Anzahl kann durch eine Erhöhung der Betankungsrate auf 60 g/s in beiden Fällen deutlich reduziert werden.

Eine weitere Problematik im Zusammenhang mit der Betankung ist die Verteilung des Wasserstoffs. (Bach, 2019) argumentiert, dass grosse Mengen Wasserstoff mit Spezialtransportern zu den HRS gefahren werden müssen (vgl. Kapitel 3.3.5). Er geht dabei von mehreren Tankladungen täglich aus, die lokale externe Kosten (z.B. Lärm, Verkehr etc.) zu Folge haben. Dazu kommt, dass die HRS für ein solches Verkehrsaufkommen ausgelegt sein muss. Gemäss seiner Ansicht ist für die Verteilung des Wasserstoffs in grossen Mengen ein Pipelinesystem erforderlich.

#### 4.8 SWOT-Analyse

Mit der SWOT-Analyse (vgl. Tabelle 10 & 11) werden die Erkenntnisse aus den bereits erarbeitenden und besprochenen Analysen und Grundlagen zusammengetragen und als Stärke, Schwäche, Chance oder Risiko klassifiziert. Zusätzlich wurden weitere Informationen aus spezifischer Fachliteratur bezogen. Die genaue Methodik ist im Kapitel 2.11 zu finden.

Tabelle 10: SWOT-Analyse (Stärken & Schwächen)

Stärken	Schwächen
Höherer Tank to Wheel Wirkungsgrad als bei einem Dieselmotor.	Tank to Wheel Wirkungsgrad schlechter als bei Batterieantrieb
Keine Schadstoffemissionen während des Betriebs	Hohe Kosten für Brennstoffzellen
Kurze Betankungszeit	Hohe Energiekosten & Fahrzeugkosten
Hohe Reichweite (mehrere hundert Kilometer)	Unzureichende Auswahl an Fahrzeugen
Geräuscharmes Antriebssystem	Kein Verteilnetz (Pipeline)
Kein Leerlaufverbrauch	Hohe Investitionskosten für die Infrastruktur
Modularer Aufbau	Kaum eine öffentliche Betankungsinfrastruktur
Geringe Wartungskosten	Hohes Leistungsgewicht und hoher Bauraumbedarf
Die Verflüssigung von Wasserstoff kann die Energiedichte weiter erhöhen.	Lebensdauer von Brennstoffzellen noch nicht ausreichend getestet
Langzeitspeicherung des Wasserstoffs	Hohe Kosten für Speicherung und Transport
Gute Kooperationen der Industrie und Forschung	Keine ausreichenden Regelungen, Standards und Normen
Die Wasserstofferzeugung kann als flexibler Verbraucher im Stromnetz genutzt werden, was zur Senkung der Strompreise beitragen kann.	Unzureichendes Bewusstsein der Öffentlichkeit für FCV
Gute Grundlagenforschung	Begrenzte staatliche Unterstützung
Mehrere wichtige Demonstrationsprojekte und Leuchtturmprogramme	
Erfahrung in der grosstechnischen Wasserstofferzeugung, -verteilung und -anwendung, einschließlich Know-how in den Bereichen Sicherheit und Handhabung.	
Hohe Kundenzufriedenheit	

*Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf, in dieser Arbeit erlangten, Erkenntnissen & (ifeu, 2017)*

Die klaren Stärken der Wasserstoffmobilität liegen im emissionsarmen Antrieb, geringen Wartungskosten, den (im Vergleich zu BEV) kurzen Tankzeiten und hohen Reichweiten. Speziell muss zusätzlich die Fähigkeit der saisonalen Speicherung und der Sektorkopplung von Wasserstoff hervorgehoben werden, wodurch überschüssige Energie im Sommer gespeichert und im Winter, bei Knappheit, genutzt werden kann.

Tabelle 11: SWOT-Analyse (Chancen & Risiken)

Chancen	Risiken
Erheblicher Spielraum für technologische Entwicklungen und Verbesserungen (Volumen, Komponenten und Materialtechnologie)	Die Kostenentwicklung für Druckgasbehälter ist abhängig von: Volumetrische Kapazität, neue Materialien für den Tank und die Entwicklung von Wasserstoffversorgungsleitungen.
Die Technologie könnte mittel- bis langfristig wettbewerbsfähig werden, durch Skaleneffekte und technologische Entwicklungen. Tiefe TCO möglich.	Die Anreize in Umwelttechnologien zu investieren sind noch begrenzt.
Hohes Wachstums- und Entwicklungspotential	Verfügbarkeit und Kosten von Edelmetallen (als Katalysator) auf dem Weltmarkt.
Regulationen und Massnahmen: Verbote von Verbrennungsmotoren, CO <sub>2</sub> -Abgaben, Steuern etc.	Soziale Akzeptanz
Transport von Wasserstoff über Pipelines	Wettbewerb mit anderen alternativen Antriebstechnologien
Die Wasserstoffökonomie wird sich mit der Weiterentwicklung von F&E verbessern.	Für die Entwicklung von Wasserstofftankstellen gibt es keine verbindlichen Vorgaben
Internationale Expansion und Partnerschaften zur Entwicklung von Technologien	

*Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf, in dieser Arbeit erlangten, Erkenntnissen & (ifeu, 2017)*

Ausgehend von den oben genannten Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der Wasserstoffmobilität lassen sich folgende Schlussfolgerungen zu den wichtigsten Bewertungskriterien ziehen:

- **Wirtschaft und Innovation:** FCV erfüllen die wesentlichen Kriterien eines Antriebssystems, die sich aus den logistischen Anforderungen der Transportdienstleistungen wie Reichweite, Effizienz und Flexibilität ergeben. Die hohe Energiedichte von Wasserstoff, der unter hohem Druck gespeichert wird und die kurze Betankungszeit ermöglicht unterschiedliche Anwendungen. Die Prävalenz von Wasserstofftankstellen und die Kostenentwicklung von Brennstoffzellen und Wasserstofftanks als Hauptkostentreiber werden letztlich darüber entscheiden, ob das Brennstoffzellensystem wettbewerbsfähig ist und sich gegenüber den anderen Antriebssystemen durchsetzen kann. (UBA, 2016) & (ifeu, 2017)
- **Umwelt, Energie und Ressourcen:** Der Beitrag von FCV zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors hängt von der Bereitstellung und Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zur Wasserstofferzeugung ab. Ein weiterer wichtiger Faktor macht der Fortschritt in der F&E, vor allem in Bezug auf die Wirkungsgrade aus. (vgl. Kapitel 5.3.2)) & (ifeu, 2017)

- **Benutzer:** Das Fehlen einer Betankungsinfrastruktur, ein unzureichendes Fahrzeugangebot, sowie hohe Investitionskosten haben bisher den Einsatz von FCV gebremst. Wenn die Hindernisse jedoch überwunden werden können, bieten die Wasserstoffmobilität mehrere Vorteile, wie niedrige Wartungskosten und hohe Reichweiten. (vgl. Kapitel 4.2&4.3) & (ifeu, 2017)
- **Forschung:** Europa und die Schweiz verfügen beide über eine sehr gute Grundlagenforschung, insbesondere auf den Gebieten Chemie, Materialwissenschaften und Energiesysteme. Diese Forschungskapazität ist wichtig, da die Wasserstoffmobilität und viele damit verbundenen Technologien eine Grundlagenforschung in diesen Bereichen erfordern. In Europa und der Schweiz gibt es zahlreiche Investitionsprojekte (öffentlich & privat) zur Entwicklung von Infrastrukturen, Netzwerken und Wissen. Daraus entstanden Zusammenarbeiten der Industrie, der Forschung, des Staates und anderen Partnern. In diesen Programmen werden das europäische Wissen über stationäre und verkehrstechnische Anwendungen sowie über Produktion und Vertrieb verbessert. (vgl. Kapitel 3.4.2) & (European Commission, 2005)
- **Wachstumspotenzial:** Der Markt für alternative Kraftstoffe wächst bereits jetzt, und ein weiteres Wachstum wird erwartet. Unter der Annahme eines Marktanteils der FCV von 1 bis 5% für ganz Europa, bedeutet dies Verkaufszahlen von 360'000 bis 1'825'000 FCV/a (European Commission, 2005). Im Kapitel 7.2 werden Szenarien diskutiert, die von deutlich grösseren Marktanteilen ausgehen.

## 5 Systemanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität

In diesem Kapitel wird die Systematik der Wasserstoffmobilität genauer betrachtet. Dafür wird zunächst das System qualitativ in Form eines CLD beschrieben. In einem zweiten Schritt wird mit der Cross-Impact-Analyse die Rolle wichtiger Variablen charakterisiert. Zum Schluss des Kapitels wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um die Marktstruktur und wichtige Markteinflüsse zu quantifizieren und aufzuzeigen.

### 5.1 Systembeschreibung der Wasserstoffmobilität Schweiz

Das Ziel dieses Kapitels ist die qualitative Beschreibung und das Abbilden der Komplexität des Schweizer Wasserstoffsystems, zum besseren Verständnis, der weiteren Verarbeitung, sowie die wichtigsten Einflussfaktoren und Variablen auf das System zu erklären. Grundlage für dieses Kapitel sind frühere Arbeiten von (Janssen, 2005), (Bosshardt, 2009) und (Ulli-Beer, Bosshardt, & Wokaun, Transition To Hydrogen, Pathways Toward Clean Transportation, 2011). Zusätzlich wurde mit einem der Autoren, Dr. sc. ETH Mathias Bosshardt, ein Expertengespräch (Bosshardt, Dr. sc. ETH, 2019) geführt. Dafür werden in einem ersten Schritt die wichtigsten Variablen erklärt, die das System beeinflussen. In einem zweiten Schritt wird dann das System als ein Causal Loop Diagramm (CLD) dargestellt und besprochen. Das CLD wurde zur Überprüfung in den Expertengesprächen besprochen und anschliessend auf Anregung der Experten ergänzt (vgl. Abbildung 12: CLD Wasserstoffmobilität Schweiz). Die Modellvariablen und ihre Klassifizierung in endogen und exogen ist in der Tabelle 12 aufgeführt. Die Methodik für das CLD ist im Kapitel 2.8 beschreiben. Eine CLD mit einer Aufteilung zwischen PW und LKW kann im Anhang 10-XIII gefunden werden, wobei zu beachten ist, dass es sich nur um den Hauptmotor (ohne Loop 4) handelt, dieser bleibt gleich wie in der Abbildung 12, bezieht sich aber auf die Verkäufe von PW & LKW.

Tabelle 12: Endogene und exogene Modellvariablen

Endogen	Exogen
# FCV	Attraktivität ICE
# HRS	Attraktivität Substitutionsprodukte
Adaptionsrate	CO <sub>2</sub> -Abgaben
Attraktivität FCV	FCV-Preis
End of Life	FVC-Stimulation
F&E FCV	H <sub>2</sub> -Preis
FCV Verkauf	Ölpreis
Investitionsrate	Politische Restriktionen
Profitabilität HRS	Subvention FCV
	Subvention H <sub>2</sub>

Quelle: Eigene Darstellung

Das in Abbildung 12 dargestellte CLD erläutert das Zusammenspiel der einzelnen Variablen und Einflussfaktoren der Schweizer Wasserstoffmobilität qualitativ. Es wurde dabei versucht, die Komplexität des Systems möglichst gering zu halten und dabei den Fokus auf die Wasserstoffmobilität zu richten. Ein CLD, ein deutlich komplexeres «Stock and Flow Diagram» das den gesamten Fahrzeugersatz modelliert, diente als Basis und kann in (Ulli-Beer, Bosshardt, & Wokaun, Transition To Hydrogen, Pathways Toward Clean Transportation, 2011) gefunden werden. Anschliessend wird das System anhand der fünf Loops beschrieben, wobei diese in der Abbildung mit «L1» bis «L5» beschriftet sind.

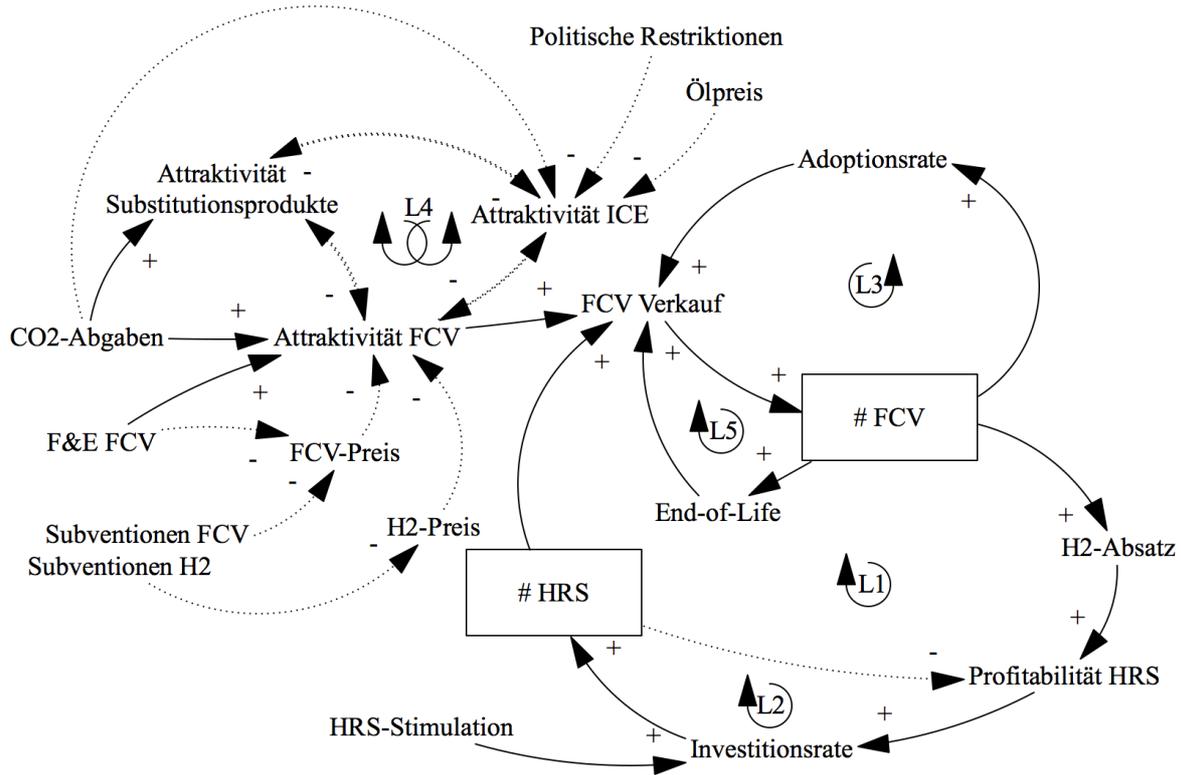


Abbildung 12: CLD Wasserstoffmobilität Schweiz

Quelle: Eigene Darstellung

### Loop 1 & 2

Der **Loop 1** (L1) ist der Hauptmotor des Modells. Er beinhaltet auch das im Kapitel 4.2 besprochene «Huhn-Ei» Paradigma. Dieser Loop zeigt auf, wie die Anzahl HRS (# HRS) einen positiven Effekt auf die Verkaufszahlen hat. Gemäss (Vock, 2019) fallen auf eine HRS rund 10 LKW oder gemäss (Holdener, 2019) mindestens 80 bis 100 PWs. Der FCV Verkauf hat eine Eins zu Eins Auswirkung auf die Anzahl FCV (# FCV). Die abgesetzte Menge Wasserstoff (H<sub>2</sub>-Absatz) kann durch die jährliche Fahrleistung der PW und LKW in km und dem individuellen Kraftstoffverbrauch bestimmt werden. Mit der simplen Erweiterung durch den Wasserstoffpreis ergibt sich die Profitabilität der HRS. Die Investitionsrate zeigt die Höhe der Erweiterungsinvestitionen im Verhältnis zum Umsatz auf. Wobei mit einer Erweiterungsinvestition alle Investitionen (Grundstückkauf, Gebäude, technische Anlagen, Geräte oder Betriebs- und Geschäftsausstattung) umfasst werden. Diese lässt sich durch Subventionen zusätzlich stimulieren. Eine attraktive Investitionsrate schliesst den Loop mit einem Bauanreiz für eine neue HRS. An diesem Punkt schliesst direkt der **Loop 2** (L2) an, welcher aufzeigt, dass eine neue HRS zu einer Reduktion der Profitabilität der bestehenden HRS führt. Dieser Loop ist wichtig, denn er bremst oder stoppt den Bau neuer HRS sobald eine Sättigung des Marktes erreicht ist.

### Loop 3

Der Loop 3 (L3) zeigt die Beziehung der Anzahl FCV und der Adoption auf. Der Adoptionsprozess beschreibt, wie Kunden über neue Produkte informiert werden, sie ausprobieren und annehmen oder ablehnen. Die Adoption ist die Entscheidung einer Person, ein Nutzer eines Produkts zu werden (Lemke, 2016). In der Variable «Adoption» enthalten ist ein wichtiger Aspekt im Modell, die «social behavioural norm». Dabei handelt es sich um ein von (Ulli-Beer, 2004) angewandtes Konzept, welches die Entstehung der sozialen Norm beschreibt. Mit dieser Variabel soll das typische s-förmige Diffusionsmuster

mit der kritischen Masse und eines Kippunktes beschrieben werden. Wobei die kritische Masse als der Anteil der Anwender beschrieben werden kann, den eine Technologie erreichen muss, um am Markt erfolgreich zu sein. Gemäss dieser Theorie muss ein Schwellenwert für den Nutzen überschritten werden, damit ein Kunde eine bestimmte Technologie einsetzen kann. Nach Erreichen des Wendepunktes ist die Entwicklung selbsttragend. Der anschliessende Treiber ist die Nachahmung, ein entscheidendes Konzept, das eng mit dem Entscheidungsprozess der Anwender zur Erklärung der Technologieübernahme verknüpft ist. Dies lässt sich mit der Wirkung des sozialen Drucks, der sozialen Verhaltensnorm erklären. Menschen handeln oft auf eine bestimmte Weise oder übernehmen eine neue Idee oder Technologie, weil viele andere Menschen auf die gleiche Weise handeln oder dieselben Dinge annehmen. Das Grundkonzept besagt: «Je mehr Menschen das Verhalten imitieren, desto mehr wird es als sozialer Standard, als soziale Verhaltensnorm akzeptiert.»

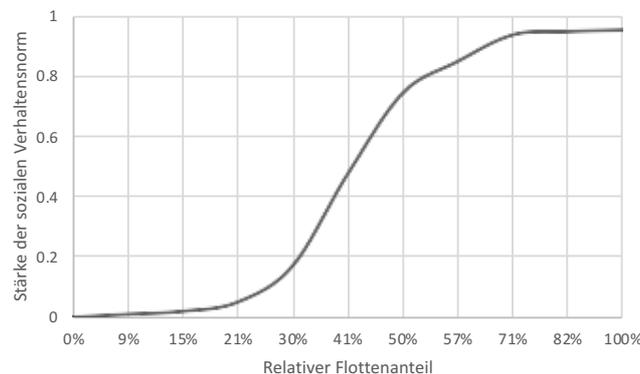


Abbildung 13: Social Behavioural Norm

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Bosshardt, 2009) & (Ulli-Beer, 2004)

Der entscheidende Wert für die Wahrnehmung ist der relative Anteil der Technologie, da davon ausgegangen wird, dass die Wahrnehmung darauf basiert, was die Menschen auf der Strasse sehen und erleben. Die von (Ulli-Beer, 2004) eingeführte Funktion ist in Abbildung 13 dargestellt, wo bei sie auf 95% begrenzt wurde, weil (Bosshardt, 2009) argumentiert, dass nie alle Menschen von einem Trend überzeugt sein werden. Es kann diskutiert werden, ob die 5% für diesen Teil der Bevölkerung ausreichend sind, dies ist für diese Arbeit aber nicht weiter relevant. (Bosshardt, 2009)

#### Loop 4

Bei Loop 4 (L4) handelt es sich um einen Loop, der sich in beide Richtungen (Gegenuhrzeiger- und im Uhrzeigersinn) bewegen kann. Er beschreibt wie die Attraktivität der verschiedenen Antriebstechnologien sich gegenseitig beeinflussen und sich gegenseitig Marktanteile abtragen. Wächst die Attraktivität der FCV, verlieren die übrigen Technologien an Attraktivität. Wobei die Attraktivität wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Attraktivität ICE wird (nebst diversen Kostenfaktoren wie Kaufpreis, Unterhalt usw, welche hier nicht berücksichtigt werden) massgeblich durch den globalen Ölpreis, politische Restriktionen (wie Verbote von Verbrennungsmotoren) und CO<sub>2</sub>-Abgaben beeinflusst. Daneben steht die Attraktivität der übrigen Substitutionsprodukte der Wasserstoffmobilität. Auf Grund der Überschaubarkeit und Komplexität wurde darauf verzichtet, diese separat aufzuführen und die Parameter darzustellen, die diese beeinflussen. Sicherlich die wichtigste Gruppe der Substitutionsprodukte sind Hybridfahrzeuge und BEV. Generell profitiert diese Gruppe von den CO<sub>2</sub>-Abgaben. Auch die Attraktivität der FCV wird von vielen Einflüssen bestimmt, für diese Arbeit am wichtigsten sind die CO<sub>2</sub>-Abgaben, der Fortschritt von F&E, FCV-Preis und der Wasserstoffpreis.

## Loop 5

Der letzte Loop (L5) beschreibt den Abfluss der Bestände, welcher durch die Lebensdauer der Fahrzeuge bestimmt wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass verschrottete Fahrzeuge die gesamte Flotte nicht verkleinern, denn entweder werden sie durch ein Fahrzeug der gleichen Antriebstechnik ersetzt, wobei die Bestände unverändert bleiben, oder durch die Konkurrenz, was zu einer Erhöhung und Verringerung der jeweiligen Bestände führt.

## 5.2 Cross-Impact-Analyse der Wasserstoffmobilität Schweiz

Dieses Kapitel beschreibt eine Cross-Impact-Analyse der Schweizer Wasserstoffmobilität. Mit Hilfe dieser durchgeführten Analyse wird die dynamische Rolle wichtiger Variablen der Wasserstoffmobilität für das Modell charakterisiert. Die methodische Grundlage ist im Kapitel 2.9 zu sehen. Die Abbildung 14 zeigt grafisch die numerischen Ergebnisse der Cross-Impact-Analyse. Die Analysen basieren auf Beurteilungen von Marktexperten (vgl. Anhang 10-XIX). Das heisst, es handelt sich um qualitative Bewertungen, die als Richtwerte betrachtet werden sollten. Es empfiehlt sich, die Werte relativ zueinander zu betrachten. Die Theorie zur  $P_{Rating}$ -Formel ist im Methodikkapitel 2.9 zu finden.

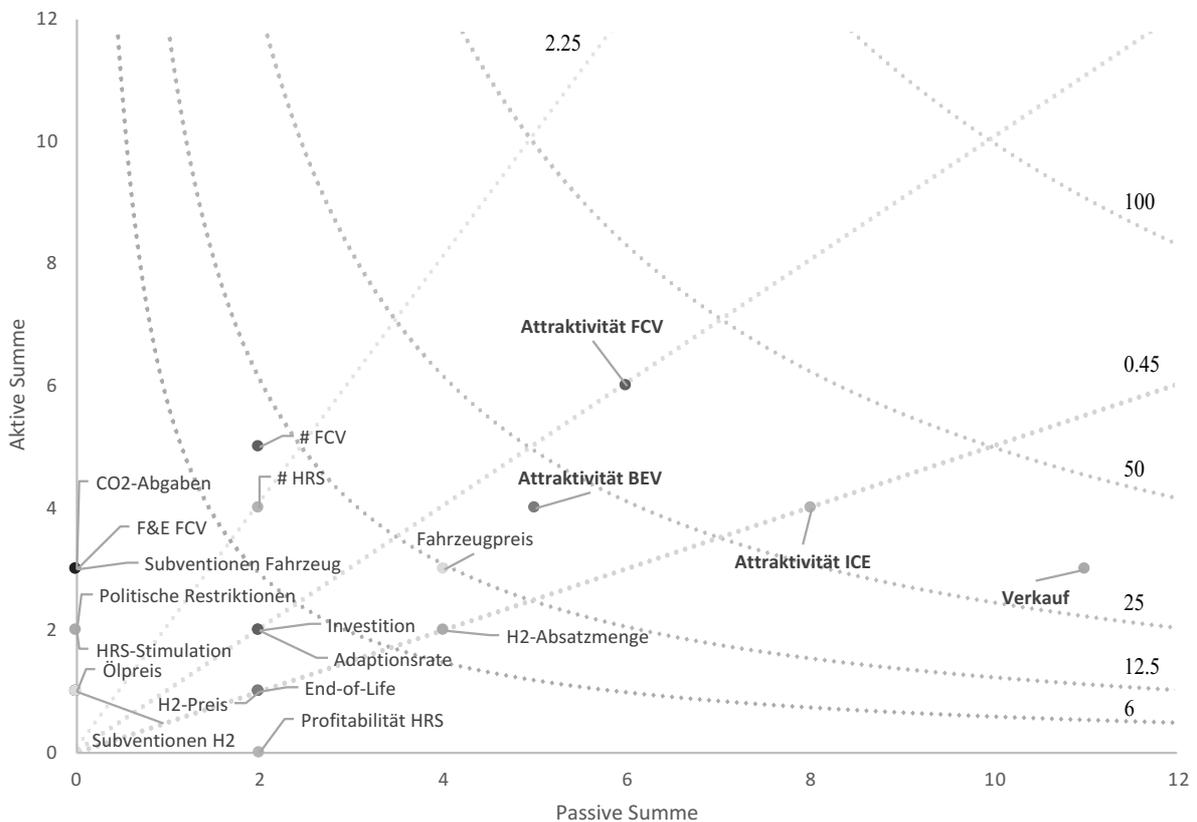


Abbildung 14: Cross-Impact-Analyse der Wasserstoffmobilität Schweiz

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Anhang 10-XIX

In der Abbildung 14 sind die 20 Variablen, die auch in dem CLD (vgl. Abbildung 12) verwendet werden, nach Aktivität und Passivität bewertet und angeordnet. Zusätzlich sind für die Klassifizierung in aktive, reaktive, kritische und Puffervariablen die Quotient-Werte (linearer Graph) und Produktwerte (Hyperbeln) eingetragen. Die Variablen mit einem Quotient-Wert von unter 0,45 zeigen ein reaktives Verhalten an, das heisst sie beeinflusst andere stark, aber selbst wird die Variable nur schwach oder nicht betroffen. Liegt der Quotient-Wert über 2.25 zeigt dies ein aktives Verhalten an, sprich die Variable wird selbst

stark von anderen Variablen beeinflusst. Die Produktwerte zeigen an, wie stark diese Beeinflussung bewertet wurde. Ein Produktwert unter 6 deutet auf ein Pufferverhalten hin. Ein Produktwert über rund 430 (vgl. Kapitel 2.9) deutet auf ein kritisches Verhalten hin. Es wurde keine Variabel mit einem kritischen Verhalten identifiziert. Allgemein ist die PR-Bewertung gering. Dies bedeutet, dass das analysierte Netzwerk relativ lose miteinander verbunden ist, dies kann auch im CLD gesehen werden (vgl. Abbildung 12), was zum Schluss führt, dass das System relativ langsam auf dem Weg zur Marktdurchdringung ist. Gesamthaft kann auf Grund dieser Analyse gesagt werden, dass kleine Änderungen oder Anreize zu keinen grossen Bewegungen im Markt führen. Um Einfluss auf die Marktentwicklung zu nehmen, bedarf es zumindest vergleichbar grosse Einflussnahmen. Die Variablen «Attraktivität FCV», «Attraktivität ICV», «Attraktivität BEV» und «Verkauf» wurden am höchsten bewertet. Dadurch kann davon ausgegangen werden, dass diese Variablen an der zentralsten Stelle im Modell platziert sind. Es handelt sich also um die Variablen mit hoher Bedeutung. Um den Markt zu beeinflussen, müssen diese stimuliert werden. Wobei zu beachten ist, dass keine dieser Variablen direkt beeinflussbar ist. Der Einfluss der übrigen Variablen wurde allgemein tief bewertet, ihr Einfluss auf das System dürfte dem entsprechend gering sein.

### 5.3 Sensitivitätsanalyse der Wasserstoffmobilität

---

Die Sensitivitätsanalyse, in die in diesem Kapitel durchgeführt wird, soll dem Leser einen Eindruck über der Sensitivität des Wasserstoffmarktes unter sich ändernden Markteinflüssen geben. Dafür wird zuerst eine Baseline bestimmt und an Hand dieser, werden mittels verschiedenen Szenarien die Sensitivität der Wasserstoffmobilität aufgezeigt. Wie bereits im Kapitel 2.10 erwähnt wurde, hat dieses Kapitel nicht den Anspruch eine Prognose über die Marktentwicklung der Schweizer Wasserstoffmobilität zu geben. Die verwendeten Daten und Szenarien basieren, auf dem US-Markt. Das Ziel dieses Kapitel ist es Systemmechanismen und ihre Sensitivität qualitativ zu beschreiben. Reale Zahlenwerte dürfen nicht auf den Schweizermarkt übertragen werden, sondern sind im Verhältnis zu einander zu betrachten. Aus diesem Grund sind die Währungen im Folgenden bewusst nicht in Schweizerfranken umgerechnet.

Die Methodik für diese Analyse ist im Kapitel 2.10 besprochen. Die Erkenntnisse aus der Analyse sind im Kapitel 6.9 aufgeführt.

#### 5.3.1 Bestimmung der Baseline

Die Baseline beschreibt die Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität unter der Annahme, dass der Ölpreis in den kommenden Jahren (gemäss (EIA, 2013),(EIA, 2019) & (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015)) ansteigen und der Wasserstoffpreis in Folge von verbesserten Prozessen und Skaleneffekten sinken wird, von 8.8 \$/kg auf 6.0 \$ /kg. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass die Forschung und Entwicklung in der Wasserstoffmobilität sich gut entwickelt. Es wird erwartet, dass der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bis ins Jahr 2050 70% erreicht hat. Eine kleine Auswahl dieser Inputparameter sind in der Abbildung 15 visualisiert. Es ist zu beachten, dass alleine die technische Entwicklung durch 30 Variablen beschrieben wird. Diese und die anderen angesprochenen Inputdaten sind dieser Arbeit elektronisch beigelegt und erfasst.

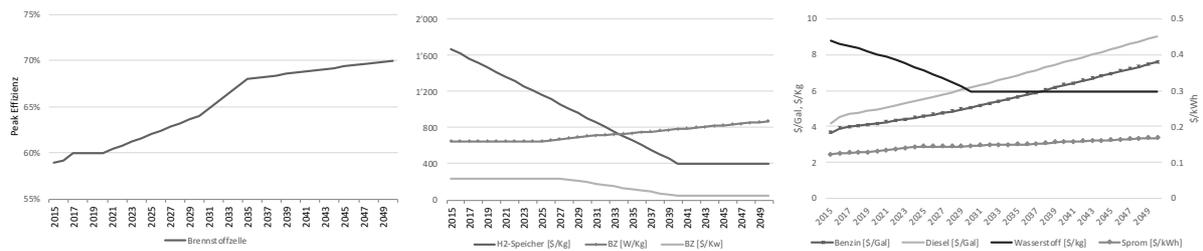


Abbildung 15: Entwicklung der für FCV relevante F&amp;E

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Die Resultate dieser Simulation der Baseline ist in der Abbildung 16 grafisch dargestellt. In diesem Baseline-Szenario erreicht die Wasserstoffmobilität bis ins Jahr 2050 einen Anteil von 32% der neu zugelassenen Fahrzeuge, wobei die FC-PW und FC-LKW beide einen Anteil von je 16% haben. Die Marktentwicklung erfolgt in der Baseline über die PW, LKW folgen später mit leichter Verzögerung und holen anschliessend auf. So macht im Jahr 2035 der Anteil der PWs rund 8%, während die LKW einen Anteil der Neuzulassungen von rund 5% ausmachen. Wie weit dieses Szenario als realistisch betrachtet werden kann, wird im Kapitel 7.2 diskutiert.

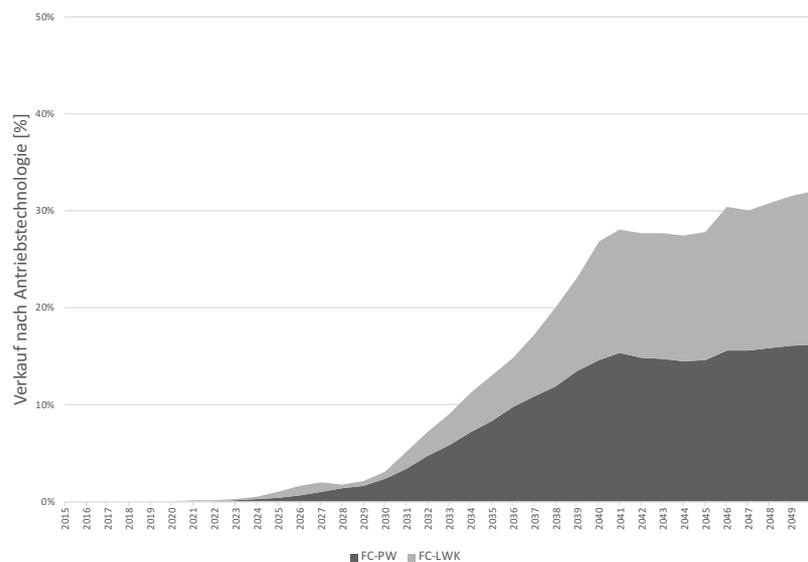


Abbildung 16: Darstellung der Baseline

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

### 5.3.2 Sensitivitätsanalyse der Szenarien

In der Cross-Impact-Analyse und im darauf aufbauenden CLD wird die Bedeutung der relativen Attraktivität der einzelnen Antriebstechnologien hervorgehoben. Es wurde aber auch erkannt, dass die Attraktivität nicht direkt, sondern nur indirekt über andere Variablen beeinflusst werden kann. Diese Variablen sind Subventionen, die Forschung und die technische Entwicklung (F&E) der Antriebstechnologie, politische Restriktionen (CO<sub>2</sub>-Abgaben oder Fahrverbote), Fahrzeug- und Wasserstoffpreis, und der Ölpreis respektive der Kraftstoffpreis. Zusätzlich wurden in der PEST- und Branchenstrukturanalyse meh-

rere dieser Variablen als zentrale Einflussgrößen auf die Marktumwelt der Wasserstoffmobilität identifiziert. Speziell wurden die Bedeutung vom Kraftstoffpreis und der technischen Entwicklung hervorgehoben. Auf Grund der Limitationen, die das Simulationstool ADOPT vorgibt und um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, können nicht alle Variablen in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Basierend auf dieser Eingrenzung wurden die Variablen F&E, Öl- und Wasserstoffpreis für die folgende Sensitivitätsanalyse ausgewählt.

### Bedeutung der sensitiven Änderung von Verkaufszahlen im Fahrzeugmarkt

In den folgenden Sensitivitätsanalysen wird die Änderung der Verkaufszahlen als Faktor verwendet, um darzustellen wie sensitiv der Wasserstoffmarkt auf Änderungen reagiert. Dafür wird mit prozentualen Abweichungen der jährlichen Verkaufszahlen von der Baseline argumentiert, um allgemeine Aussagen zu machen. Dieses Kapitel soll dem Leser zeigen, wie eine solche prozentuale Änderung zu beurteilen ist. Als Grundlage für diesen Vergleich dienen historische Verkaufszahlen von Benzin-LKW zwischen 1999 und 2013. Gesehen werden können diese in der Abbildung 17, ebenfalls ist ein Balkendiagramm gezeigt, dass die jährliche Änderung aufzeigt. Dieses Balkendiagramm verdeutlicht dem Betrachter, wie stark die Verkaufszahlen jährlich variieren, d.h. sie visualisieren die Steigung bzw. die Ableitung.

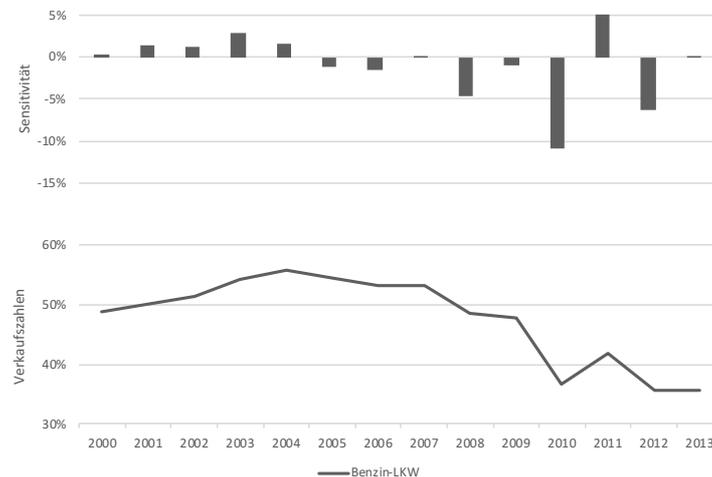


Abbildung 17: Bedeutung der sensitiven Änderung von Verkaufszahlen

Quelle: Eigene Darstellung in, Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Die durchschnittliche Änderung in den Jahren 2000 bis 2005 beträgt rund 1.0% mit einem Maximalwert von 2.8%, im Jahr 2003 und einem Minimalwert von -1.5%, im Jahr 2005. Die wirklich starken Änderungen sind in Folge der Weltwirtschaftskrise ab den Jahren 2007 zu beobachten. In Folge dieser Krise brachen die Verkaufszahlen der LKW in den Jahren 2008 um 4.6% und 2010 um 10.9% ein. Diese Änderung um 10.9% ist die höchste, die in den letzten 20 Jahren gefunden werden konnte und erfolgte im Zuge einer globalen Finanzkrise, die den Logistiksektor stark getroffen hat. Dem entsprechend darf eine Änderung, die über 5% liegt als bedeutende und eine die über 10% liegt, als starke Änderung, respektive Sensitivität gewertet werden.

### Sensitivitätsanalyse Forschung und Entwicklung

Bei der Analyse, wie sensitiv die Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität in Bezug auf den technischen Fortschritt ist, macht das Simulieren von verschiedenen Szenarien mit einer prozentualen Abweichung von der Baseline wenig Sinn. Denn für die F&E gibt es physische Grenzen, die nicht überschritten

werden können, wie zum Beispiel der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Dieser theoretische Wirkungsgrad beträgt 83%, basierend auf dem höheren Heizwert von Wasserstoff (Barbir, 2013). Ein Überschreiten dieses Wirkungsgrads ist nicht realistisch und somit nicht zielführend für eine Simulation. Der Ansatz, den die folgenden zwei Szenarien verfolgen, ist eine beschleunigte, beziehungsweise eine verlangsamte Entwicklung der F&E. Die Szenarien sind wie folgt definiert:

- **-5 Jahre Tech:** Dieses Szenario beschreibt ein um fünf Jahre langsames Fortschreiten in der Entwicklung von FCV relevanten Technologien (Infrastruktur relevante Technologien sind ausgenommen, eine Übersicht der simulierten Faktoren ist im Anhang 10-XVII zu finden) als es in der Baseline prognostiziert wurde. Das bedeutet, dass der Wirkungsgrad und die übrigen 29 technischen Faktoren erst im Jahre 2055 den gleichen Stand erreichen werden, wie in der Baseline im Jahr 2050 erreicht wurde. Dafür wurde die F&E in den Jahren 2025 bis 2030 gestoppt. Anschliessend entwickelt sie sich mit einer Verzögerung von fünf Jahren gemäss der Baseline. Gesehen werden kann dies exemplarisch an der Entwicklung der Effizienz in Abbildung 19 und in Abbildung 18, in der die drei ausgewählten technischen Faktoren, unter dem Szenario -5 Jahre Tech dargestellt sind. Zum Vergleich ist jeweils die Baseline eingezeichnet.
- **+5 Jahre Tech:** Das zweite Technologieszenario geht von einem schnellen Fortschritt in der FCV relevanten F&E aus. (Auch in diesem Szenario wird die technische Entwicklung der Infrastruktur ausgenommen.) Es wird davon ausgegangen, dass der technische Stand, welcher die Baseline im 2050 haben soll, bereits im Jahr 2045 erreicht wird. Dafür wurde der Fortschritt in F&E zwischen 2020 und 2025 beschleunigt. Zu sehen ist das beispielhaft in der Abbildung 19 unter dem Szenario + 5 Jahre an Hand der H<sub>2</sub>-Speicherung. Die anschliessende Entwicklung entspricht der Baseline, mit einem fünfjährigen Vorsprung.

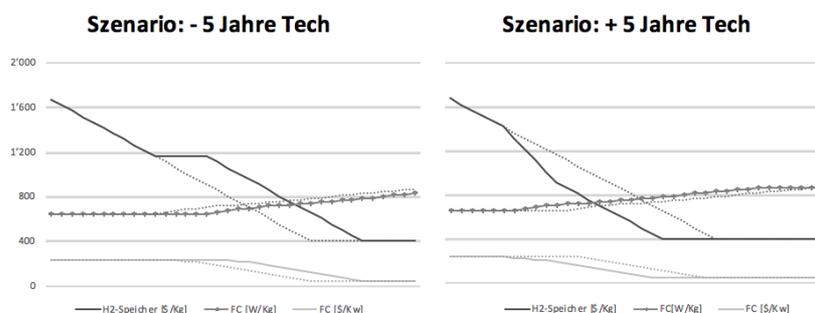


Abbildung 18: Entwicklung der Technologieszenarien (Baseline gepunktet)

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Die Resultate, die in der ADOPT-Simulation berechnet wurden, werden in der Abbildung 19 zusammen gefasst. Zum direkten Vergleich ist zusätzlich die Baseline visualisiert. Daneben stehen die zwei Szenarien, wobei die Entwicklung der Brennstoffzelleneffizienz zur Verdeutlichung des jeweiligen technischen Fortschritt steht. Die Sensitivität ist als jährliche Abweichung der Verkaufszahlen von der Baseline im Balkendiagramm dargestellt. Diese ist gleich wie die Prognose der jährlichen Verkaufszahlen in FC-PW und FC-LKW aufgeteilt.

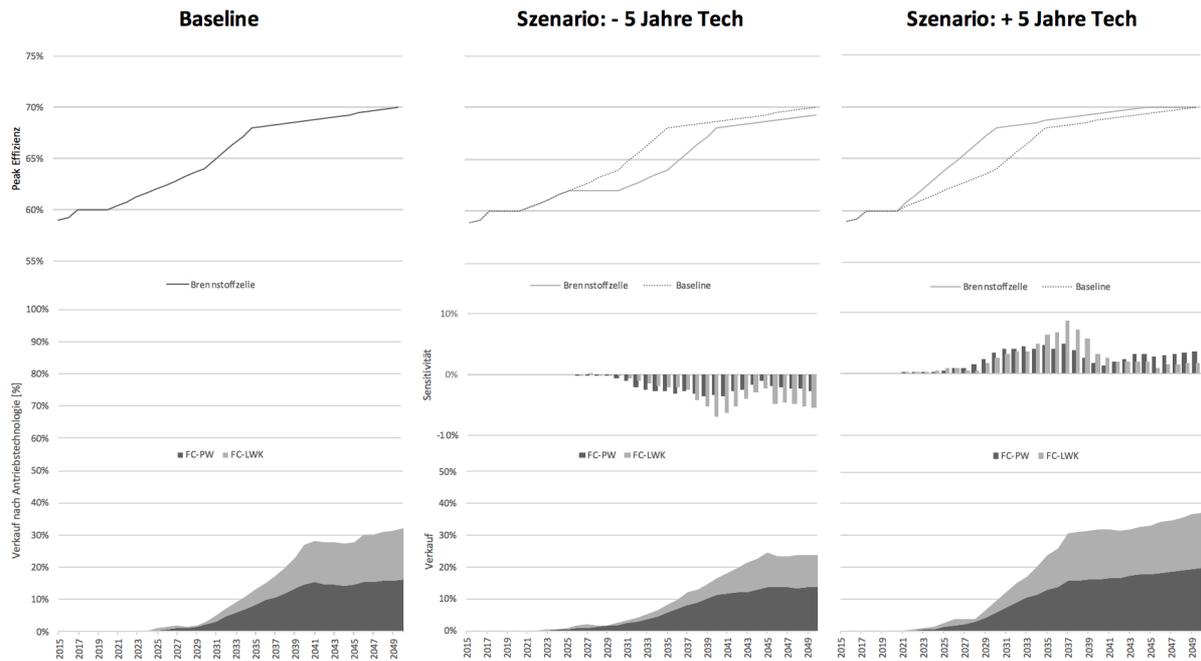


Abbildung 19: Sensitivitätsanalyse Technologieszenarien

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Wie bereits im Kapitel 5.3.1 erwähnt, erfolgt die Markteinführung der FCV in der Baseline über die PWs, nicht die LKWs. Dies ist, wie in der Abbildung 19 unter dem Szenario «-5 Jahre Tech» gezeigt wird, noch deutlicher der Fall bei einer langsameren technischen Entwicklung. Verdeutlicht wird dies bei der jährlichen Sensitivität. An Hand dieser ist deutlich zu sehen, dass gerade die LKWs sehr sensitiv auf Änderungen der F&E reagieren. Zum Beispiel im Jahr 2040 ist der Betrag der verkauften PW um 3% geringer, die der LWK um 7% als in der Baseline. Diese Diskrepanz ist deutlich zu sehen in den Jahren von 2035 bis 2050. Betrachtet man das zweite Szenario mit einer schnelleren technischen Entwicklung (+ 5 Jahre Tech), ist eine vergleichbare Sensitivität, jedoch in positive Richtung, der LKW zu beobachten. Wieder reagieren die LKWs stärker als die PWs auf Änderung der F&E der FCV. Speziell im Jahr 2039 reagieren die LKW-Verkaufszahlen mit einer Zunahme, im Verhältnis zur Baseline, von rund 9%, im Vergleich dazu nahmen die PW um 5% zu. Zusätzlich ist in beiden Fällen eine leichte zeitliche Verzögerung in der Sensitivität zu sehen. In beiden Szenarien fand die Beschleunigung, respektive die Verlangsamung der F&E zwischen den Jahren 2025 bis 2030 statt. Die stärkste Änderung wird aber bei beiden Szenarien in den Jahren 2039 oder 2040 angezeigt. Es scheint, dass das System eine Verzögerung von rund 10 Jahren aufweist. Die Erkenntnisse aus dieser Analyse sind als Ergebnisse im Kapitel 6.9 besprochen.

### Sensitivitätsanalyse Ölpreises

Eine weit verbreitete Sensitivitätsanalyse von energierelevanten Systemen ist die Betrachtung von sich ändernden Ölpreisen. Unter der Sensitivitätsanalyse des Ölpreises wird die Risiko- und Erfolgsabschätzung von Veränderungen in der Kostenstruktur von Öl als Primärenergieträger verstanden (Schaumann G. S., 2010). Um die Auswirkungen eines variierenden Ölpreises auf das gesamte System langfristig zu bewerten, wurden drei Szenarien für die Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Bei jedem dieser Szenarien wurde in Folge des geänderten Ölpreises die Treibstoffkosten angepasst. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein Ölpreisanstieg oder -reduktion den gleichen Effekt auf Benzin, Diesel und Gas (ggf. auch Strom) haben. Exemplarisch wird im Folgenden nur der Benzinpreis dargestellt. Die übrigen Treibstoffe

(exklusive Wasserstoff) verhalten sich linear dazu. Die drei Szenarien sind in der der Abbildung 20 dargestellt und wie folgt definiert:

- **-50% Ölpreis:** dieses Szenario beschreibt den «worst case» mit einer Reduktion des Ölpreises um 50% im Vergleich zur Baseline. Dabei wird ein Benzinpreis im Jahr 2050 von 3.8 \$/Gal erreicht.
- **+50% Ölpreis:** In diesem Szenario wird ein um 50% steigender Ölpreis simuliert. Es wird davon ausgegangen, dass in Folge dessen der Benzinpreis bis ins Jahr 2050 auf 11.4 \$/Gal steigen wird.
- **+100% Ölpreis:** Dieses Szenario beschreibt den Extremfall eines Anstieges des Ölpreises um 100%. Dies führt zu einem Benzinpreis von 15.2 \$/Gal.

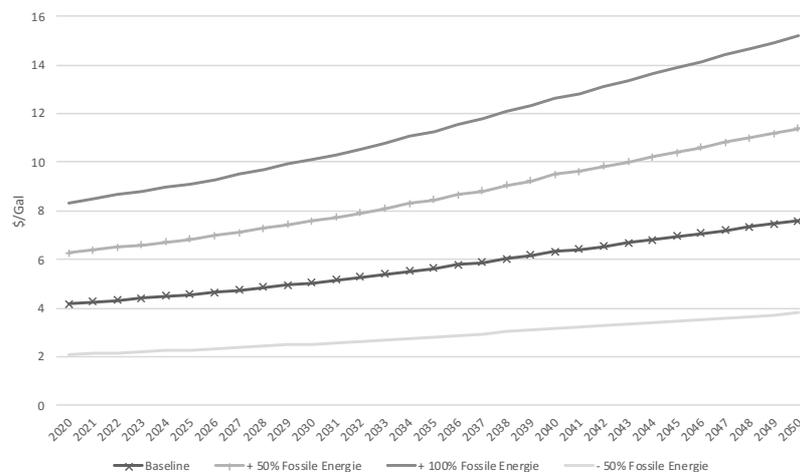


Abbildung 20: Entwicklung der Ölpreisszenarien

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Die Wahl der Szenarien orientiert sich an der Literatur. So simuliert zum Beispiel die «U.S. Energy Information Administration» in ihrem «Annual Energy Outlook 2018» einen «High Oil Price» mit einem maximalen Anstieg von rund 15% bis 2050 im Vergleich zu einem gleichbleibenden Preis. (EIA, 2018). Andere Szenarien gehen deutlich weiter und beschreiben z.B. einen Strompreisanstieg von rund 100% bis 2040 gegenüber dem aktuellen Preis (Egli, 2017). Die Resultate der simulierten Ölpreisszenarien sind in Abbildung 21 dargestellt. Wieder ist die Sensitivität als jährliche Abweichung der Verkaufszahlen von der Baseline im Balkendiagramm dargestellt. Diese ist gleich wie die Prognose der jährlichen Verkaufszahlen in FC-PW und FC-LKW aufgeteilt.

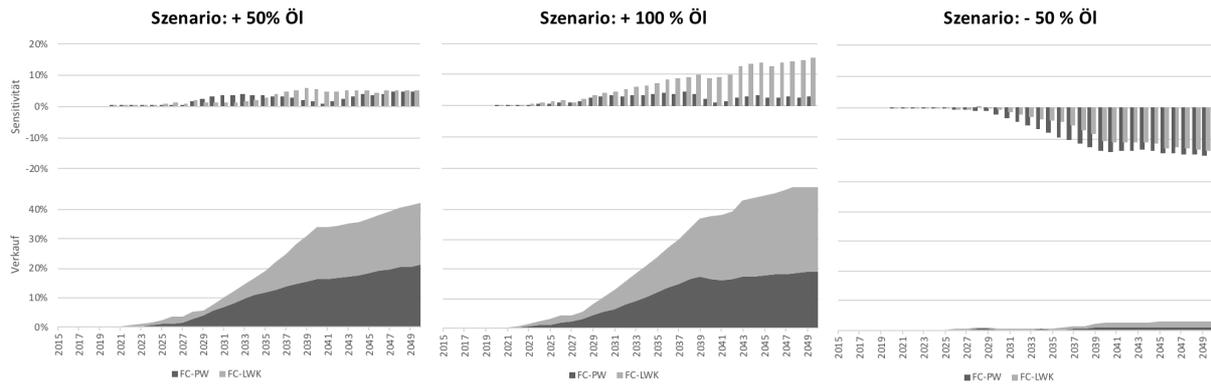


Abbildung 21: Sensitivitätsanalyse Ölpreisszenarien

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Bei der Betrachtung der Sensitivität von FC-PW zeigen die beiden Szenarien mit einer Preissteigerung praktisch dasselbe Profil. In beiden Szenarien liegen die Maximalwerte der FC-PW Verkaufszahlen der Sensitivitätsanalyse bei + 5% und im Jahr 2050 wird jeweils ein Marktanteil von 20% erreicht. Auf Grund dieser Betrachtung kann festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Treibstoffpreise zwar einen bedeutenden und positiven Effekt auf die FC-PW Verkäufe hat, dieser aber auch nicht linear zunimmt und das auch bei Verdopplung der Preise nicht. Deutlich höhere Ölpreise führen zu keiner deutlichen Erhöhung der FC-PW Verkaufszahlen. Eine gegenteilige Beobachtung kann bei den FC-LKWs gemacht werden. Bei diesen ist eine deutliche Zunahme der Verkaufszahlen auf Grund der Verdopplung des Ölpreises festzustellen. Bei einer Verdopplung des Ölpreises wird auch der Verkauf der FC-LKW verdoppelt oder sogar verdreifacht: im Jahr 2040 beträgt der LWK-Absatz im Szenario «+50% Öl» rund 5% im Szenario «+100% Öl» beträgt er 10% und im Jahr 2050 macht der Absatz im Szenario «+50% Öl» rund 5% im Szenario «+100% Öl» rund 15% aus. Die Erkenntnisse aus dieser Analyse werden als Ergebnisse im Kapitel 6.9 besprochen.

### Sensitivitätsanalyse Wasserstoffpreis

Der Wasserstoffpreis ist die dritte Einflussgrösse, die im Rahmen der Sensitivitätsanalyse betrachtet wird. Wie bei der Sensitivitätsanalyse des Ölpreises wird auch bei dieser Analyse die Risiko- und Erfolgsabschätzung von Veränderungen in der Kostenstruktur des Wasserstoff als Treibstoff von FCV bewertet. Um die Sensitivität des Systems auf einen sich ändernden Wasserstoffpreis zu bewerten, wurden zwei Szenarien für die Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Bei jedem dieser Szenarien wurde der Wasserstoffpreis auf verschiedenen Szenarien angepasst. Die übrigen Treibstoffe entsprechen der Baseline. Die Szenarien sind wie folgt definiert:

- **H<sub>2</sub> Szenario 1:** Das Erste Szenario geht davon aus, dass der Wasserstoff als erneuerbarer Treibstoff über zehn Jahre staatlich subventioniert wird. Nach Ablauf dieser Periode wird der Wasserstoffpreis von Markt bestimmt, das bedeutet der Preis kehrt auf das Niveau von vor 10 Jahren zurück und erlebt dann die erwartete Preisreduktion auf Grund verbesserter Prozesse und grösseren Skaleneffekten. Das bedeutet für diese Szenario wurde der Wasserstoffpreis zwischen den Jahren 2020 und 2030 auf 6 \$/Kg fixiert. Anschliessend steigt er für 3 Jahre auf den Betrag von 8.0 \$/kg und sinkt dann bis ins Jahr 2041 zurück auf die 6.0 \$/kg, was auch in der Baseline erreicht wird.
- **H<sub>2</sub> Szenario 2:** Das zweite Szenario geht davon aus, dass sich der Wasserstoffpreis nicht wie erwartet reduziert. Es beschreibt das «Worst-Case-Szenario» in dem sich der Wasserstoffpreis,

nach der anfänglichen Reduktion wie in der der Baseline, im Jahr 2025 leicht über dem Startniveau (8.8 \$/Kg) auf 9 \$/Kg einfindet. Dies ist im Vergleich zur Baseline ein um 50% höherer Preis.

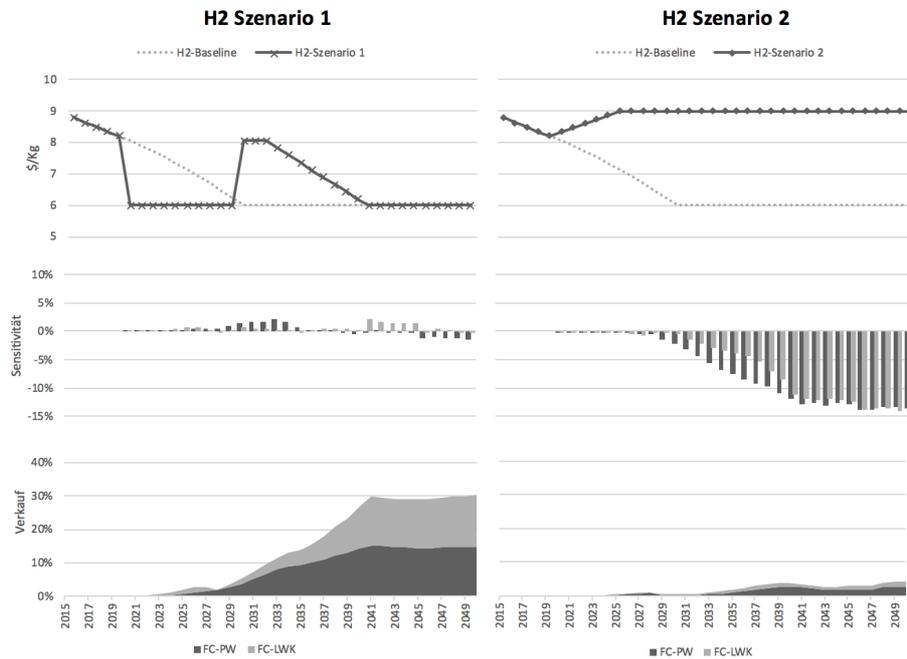


Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse Wasserstoffpreis

Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

Das Szenario 1 (vgl. Abbildung 22) zeigt die Auswirkung von staatlich subventioniertem Wasserstoff auf die Verkaufszahlen der FCV. In Folge dieser Subvention ist ein um ein paar Jahre verzögerter Anstieg der PW-Verkaufszahlen im Diagramm Sensitivität zu beobachten. Dieser Anstieg überschreitet aber nie die 2% Marke. Wieder mit einer zeitlichen Verzögerung stellt sich dieser Anstieg ein. Eindeutige Aussagen sind auf Basis dieses Szenario nicht zu machen. Aus diesem Grund wurden weitere Szenarien berechnet, wie zum Beispiel ein Szenario das keinen Anstieg des Wasserstoffpreises nach der Subvention aufweist. Dieses Szenario wurde in der Dokumentation nicht grafisch erfasst, da es zu den fast gleichen Resultaten wie in Szenario 1 kam. Die jährlichen Abweichungen betragen im Schnitt unter 1% und der Stand im Jahr 2050 in der gleichen Grössenordnung (Abweichung kleiner 0.2%). Ein weiteres Szenario, das als Szenario 3 im Anhang 10-XV zu finden ist, geht von einer 25% Preisreduktion ab 2025 aus. Auch dieses Szenario hat zu keiner bedeutenden Sensitivität des Marktes geführt. Allgemein kann gesagt werden, dass die im Szenario 1 angenommene Subvention zu keiner bedeutenden Änderung der Verkaufszahlen führt. Die Sensitivität beträgt maximal 2%, beziehungsweise -2%.

Nur das Szenario 2 (vgl. Abbildung 22) zeigt, dass ein hoher Wasserstoffpreis zu einer Stagnation der Wasserstoffmobilität führt. In diesem Szenario entwickelt sich der FCV-Markt für beide Segmente nicht. Die Sensitivität in diesem Fall ist sehr gross. Die Erkenntnisse aus dieser Analyse sind als Ergebnisse im Kapitel 6.9 besprochen.

## 6 Ergebnisse

Das Kapitel Ergebnisse baut auf den Analysen der zwei Kapitel «Potentialanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität» und «Systemanalyse der Schweizer Wasserstoffmobilität» auf. Es werden darin die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und bedeutende Schlussfolgerungen gezogen.

### 6.1 Erkenntnisse aus dem Erdgasfahrzeugmarkt

Vergleicht man die fünf Fallstudien aus dem Kapitel 4.1.1, so scheinen Luftverschmutzung und Energiesicherheit die wichtigsten historischen und aktuellen Treiber für die Förderung von NGV zu sein. Die Luftverschmutzung hat China, Indien, den Iran und Italien dazu veranlasst, Programme zu starten, um die Aufnahme von NGV zu fördern. Für Argentinien boten die reichlich vorhandenen Erdgasreserven den wichtigsten Anreiz für die Förderung. (Singh, 2019)

Eine Gemeinsamkeit für den relativen Erfolg in jeder Fallstudie ist die preisliche Wettbewerbsfähigkeit von Erdgas zu Diesel und Benzin. Die Regierungen halten die niedrigeren Erdgaspreise aufrecht, indem sie Steuersysteme für Benzin und Diesel einführen. Für die Verbraucher bietet der konsequente Preisvorteil einen wirtschaftlichen Anreiz, bei Fahrzeugen auf Erdgas umzusteigen. Eine weitere Gemeinsamkeit in jeder der Fallstudien ist, dass alle Regierungen Anreizprogramme zur Förderung von NGVs gestartet haben. Regierungen haben spezifische Flottenumbauprogramme (Argentinien, China, Indien), Steuervergünstigungen und Subventionen (China, Indien, Italien) sowie Subventionen für Tankstellen (Iran) zur Förderung von NGVs angeboten. Die meisten dieser Programme wurden um die 2000er Jahre gestartet, als Erdgas noch als Nischenbrennstoff galt. (Singh, 2019)

Die grössten Herausforderungen für die weitere Entwicklung der NGV-Märkte in diesen Ländern ist die fehlende Lieferinfrastruktur. In einigen Ländern wie China und Indien fehlen umfangreiche Gaspipelines, die ländliche Gebiete erreichen, während in anderen, wie dem Iran und wiederum Indien zu wenige Tankstellen vorhanden sind, um die Nachfrage aus ihren wachsenden NGV-Flotten zu decken. Qualitäts- und Sicherheitsbedenken bei der CNG-Konvertierung stellen ebenfalls eine weitere Herausforderung dar. So hatten beispielsweise in Indien unbefugte CNG-Tanks und Flaschenmanipulationen zu einigen wenigen Explosionen geführt, was zu einer negativen öffentlichen Wahrnehmung der CNG-Nutzung geführt hat. Die Verbesserung der Betankungsinfrastruktur, sowie die Festlegung von Normen und Standards für die CNG-Umstellung sind von wesentlicher Bedeutung, um das Vertrauen der Öffentlichkeit und das Wachstum der NGV-Märkte in diesen Ländern zu gewährleisten. (Singh, 2019)

Tabelle 13: Übersicht der NGV -Treiber und -Barrieren

Treiber	Barrieren
Luftverschmutzung und Energiesicherheit	Negative öffentliche Wahrnehmung
Anreizprogramme zur Förderung von Flottenumbauprogrammen	Qualitäts- und Sicherheitsbedenken:
Steuervergünstigungen und Subventionen	Flaschenmanipulationen
Subventionen für Tankstellen	Kommunikationsfehler
	Keine Standards oder Normen
Preisliche Wettbewerbsfähigkeit von Erdgas zu Diesel und Benzin:	Fehlende Lieferinfrastruktur:
Regierungen halten die niedrigeren Erdgaspreise aufrecht	Fehlen von Gaspipelines und Tankstellen
Reichlich vorhandene Erdgasreserven	
Steuersysteme für Benzin und Diesel	
konsequenter Preisvorteil für einen wirtschaftlichen Anreiz	

Quelle: Eigene Darstellung, Ergebnisse basierend auf Kapitel 4.1

Die lange Geschichte, die öffentliche Akzeptanz und die starke staatliche Unterstützung für Erdgas in Personenkraftwagen werden das Wachstum der NGVs in diesen Ländern trotz einiger der diskutierten Herausforderungen vorantreiben. In Ländern wie Indien und China ist es wahrscheinlich, dass Erdgas Teil des Übergangs zu Elektrofahrzeugen ist. China hat ein Programm für neue Energiefahrzeuge gestartet, um schnell emissionsfreie Fahrzeuge in seine Flotte aufzunehmen. Indien hat in den nächsten fünf Jahren 15 Prozent Elektrofahrzeuge vorgeschlagen und erwägt sogar ein Verbot von ICE. Diese beiden Länder stellen einen bedeutenden Anteil am globalen NGV-Markt dar, doch der Marktanteil von NGV innerhalb der Fahrzeugpopulation ihrer Länder ist nach wie vor gering. In Iran und Italien ist es wahrscheinlich, dass NGV weiterhin eine Rolle im Transportwesen spielen wird. Bemerkenswert ist, dass Italien eine starke Präferenz für NGVs gegenüber Elektrofahrzeugen gezeigt hat, obwohl die Regierung versucht, die Zahl der Elektrofahrzeuge auf ihren Strassen zu erhöhen. Schliesslich bleibt die Argumentation für Erdgas (in Form von LNG) in schweren Nutzfahrzeugen nach wie vor stark und wird voraussichtlich zunehmen. (Singh, 2019)

Eine Übersicht der wichtigsten Treiber und Barrieren, die durch die Studie des NGV-Marktes erkannt wurden, ist in der Tabelle 13 aufgeführt.

## 6.2 Stakeholderanalyse

---

Die Stakeholder Matrix zeigt eine hohe Konzentration in der Q4 «Macher», die grosses Interesse an der Markteinführung und -Durchdringung der Wasserstoffmobilität haben. Für ein erfolgreiches Stakeholder Management müssen sie alle stark in die Projekte eingebunden werden.

Da die Rolle der Stakeholder nicht statisch ist, wurde die aktuelle und die gewünschte Situation der wichtigsten Stakeholder bestimmt. Aus dieser Bewertung lässt sich erkennen, dass sich kein Stakeholder an gewünschter Position befindet. Es muss also in die richtige Strategie und in die Kommunikation mit den Stakeholdern investiert werden, um die Stakeholder in die gewünschte Position zu bringen. Die folgenden Strategien werden für die genannten Stakeholder Gruppen empfohlen:

- I. Verständnis generieren durch am Projekt beteiligen: Konkurrenz mit alternativen Antrieben
- II. In einer bedeutsamen Rolle in Zusammenarbeit einbinden: Konkurrenz mit fossilen Antrieben
- III. Verpflichten durch Verantwortung geben: Erneuerbare Energie, Transportnetzwerk, Fahrzeug - Produktion, -Import, Staat, Kunde und Forschung
- IV. Zustimmung schaffen durch Ownership: Fossile Energie, Betankungsanlagen, Wasserstoffverband und -Unternehmen

## 6.3 Treiber und Barrieren

---

Aus der NGV-Analogie, Gesprächen mit Experten und der Literatur konnte eine Vielzahl von für die Wasserstoffmobilität relevanten Barrieren und Treibern erkannt werden. Diese sind in diesem Kapitel kurz zusammengefasst und auf den Punkt gebracht.

Grundsätzlich gibt es die folgenden drei Hauptklassen von Barrieren für Wasserstoff als Kraftstoff: (a) Die Schaffung einer Wasserstoffverteilungsinfrastruktur. (b) Die höheren Kosten von Wasserstofffahrzeugen. (c) Die Notwendigkeit, die Akzeptanz der Verbraucher für die Kosten als auch für die Kraftstoffverfügbarkeit zu schaffen. Diese Hauptklassen wurden weiter spezifiziert und im Detail besprochen. Daraus ergibt die folgende Liste von Barrieren:

- Unreife von Markt und Infrastruktur: Die erforderlichen zusätzlichen Investitionskosten für die fehlende Infrastruktur sind eine der wichtigsten Barrieren im Markt.

- Individuelle Kosten: Die Barriere des höheren Preises eines FCV im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug
- Angebot und Auswahlmöglichkeiten: Aktuell gibt es ein begrenztes Angebot und Auswahlmöglichkeiten von FCV auf dem Markt.
- Informationsbezogene Barrieren: Unzureichende Informationen erschweren eine Kaufentscheidung allgemein.
- Sicherheit: Ängste und Bedenken erzeugt durch den technischen Wandel

Trotz der diversen Vorteile, die der NGV im Vergleich zu ICE hat, sehen sich die NGVs mit erheblichen Barrieren konfrontiert. Diese Hindernisse können überwunden werden. Es bedarf aber eines abgestimmten Vorgehens aller Beteiligten, einschliesslich Regierungen und Industrie. Insbesondere ist eine umfassende Kommunikationsstrategie erforderlich, um den Mangel an Sensibilisierung, Verständnislosigkeit und Vertrauen der Beteiligten zu beseitigen. Daraus abgeleitet konnten die folgenden Erkenntnisse für die Wasserstoffmobilität erlangt werden:

- Nutzer müssen durch deutliche Einsparungen von der neuen Technologie überzeugt werden.
- Alle Stakeholder müssen einbezogen werden.
- Technische und leistungsbezogene Fragen, Tankstellen und öffentliche Wahrnehmungen werden als potenzielle Hindernisse für das Marktwachstum angesehen.
- Finanzielle Anreize sollten so konzipiert sein, dass sie für die Verbraucher leicht verständlich sind.
- Um das Vertrauen der Verbraucher und der Industrie zu stärken, sollte die Regierung klare Normen festlegen und durchsetzen.
- Um die hohen Kosten für den Bau einer Tankstelle zu vermeiden, sollten modulare Ergänzungen zu den bestehenden Flüssigtankstellen angestrebt werden.

Die Markteinführung muss durch die Vorteile der FCV-Technologie vorangetrieben werden. Zu den technologischen Vorteilen von FCV gehört die Bereitstellung eines sauberen, effizienten und geräuscharmen elektrischen Antriebs, der auch für lange Strecken geeignet ist und zu einer Senkung der Energiekosten führen kann. Weitere Vorteile bei der Nutzung von Wasserstoff sind ein Beitrag zur nationalen Energiesicherheit und -effizienz, zur technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung, zur Emissionsminderung im Strassenverkehr und zum Klimaschutz. Auf diesen Vorteilen müssen die Markttreiber aufbauen, um Entscheidungsträger zu veranlassen, Vorschriften einzuführen oder anzupassen, Marktinstrumente und ergänzende Massnahmen festzulegen und die Verwendung von kohlenstoffarmen Kraftstoffen, einschliesslich Wasserstoff, zu fördern. Die wichtigsten Treiber für die Nutzung von grünem Wasserstoff sind:

- Klimapolitische Massnahmen und Reduzierung der lokalen Luftverschmutzung
- Energiesicherheit und Unabhängigkeit fossiler Brennstoffe
- Industrielle Wettbewerbsfähigkeit durch Technologieentwicklung und Innovation.
- Unternehmertum: Anreiz durch das Potenzial die Markteinführung der Wasserstoffmobilität wesentlich zu steuern und zu fördern und so Marktführer zu werden.

#### **6.4 Schlussfolgerung der PEST-Analyse**

---

Mit der PEST-Analyse konnten verschiedene Trends der Billionen-Dollar-Automobilindustrie identifiziert werden, die sich auch in Zukunft fortsetzen dürften und sowohl Chancen als auch Herausforderungen für die Wasserstoffmobilität im Hinblick auf den technologischen Wandel darstellen. Die vier Me-

gattrends (Nachhaltigkeit, Urbanisierung, Individualisierung und Digitalisierung) die für die Automobilindustrie identifiziert wurden, gelten genauso für die Wasserstoffmobilität. Da das Geschäftsumfeld der Automobilindustrie ständig in Bewegung ist, resultieren verschiedene Unsicherheiten und Chancen für die Wasserstoffmobilität. Regierungen haben weltweit der Automobilindustrie strenge Umweltauflagen auferlegt, von denen die Wasserstoffmobilität profitieren dürfte. Dies führt dazu, dass immer mehr Fahrzeughersteller sich auf emissionsarme, langlebige und kostengünstige Fahrzeuge konzentrieren. Auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen haben grossen Einfluss auf die Performance der Wasserstoffmobilität. Steigende Einkommen aufgrund des Wirtschaftswachstums, sowie eine wachsende Autonutzung in den Schwellenländern eröffnen Chancen. Weitere Chancen bringen die volatilen Mineralölpreise zusammen mit der steigenden Mineralölnachfrage mit sich. Obwohl verschiedene Technologien gefördert werden, liegt aktuell der Schwerpunkt bei den Elektrofahrzeugen. Die soziokulturellen Faktoren und Verbraucherpräferenzen haben auch einen grossen und direkten Einfluss auf die Automobilindustrie. Vor allem aber beeinflusst das Aufkommen der neuen Märkte die Wettbewerbsintensität in diesem Sektor. Jeder grosse Akteur der Automobilindustrie investiert in verschiedene Technologien und Innovation, um einen grösseren Marktanteil zu gewinnen, eine solche Technologie ist die Brennstoffzelle.

## **6.5 Ergebnisse der Branchenstrukturanalyse**

---

Mit der Branchenstrukturanalyse wurden die für die Wasserstoffmobilität relevanten Wettbewerbsbedingungen aufgezeigt und besprochen. Es konnte gezeigt werden, dass die Eintrittsbarrieren der Akteure zur Wasserstoffmobilität hoch sind. Die wichtigsten Eintrittsbarrieren sind der Kapitalbedarf, Wechselkosten und die begrenzte Anzahl der verfügbaren Modelle in der Markteinführungsphase.

Da die Akteure, in der frühen Phase der Markteinführung, voneinander abhängig sind, ist der Wettbewerb zwischen ihnen relativ gering. Aktuell gibt es verschiedene branchenübergreifender Allianzen zur gegenseitigen Unterstützung, um kostengünstig und schnell die Technologieentwicklung voranzutreiben. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass eine zukünftig wachsende Marktteilnehmeranzahl in einer Branche zu einem erhöhten Wettbewerb führen wird, wie dies in der Automobilbranche der Fall ist.

Die Auswirkungen von Substitutionsprodukten (konventionellen oder alternativen Fahrzeugen) auf die Marktdurchdringung der Wasserstoffmobilität hängt von verschiedenen Merkmalen, sowie der Ersatzbereitschaft des Käufers ab. Die relevantesten Charakteristiken sind: Fahrzeugverkauf-, Kraftstoffpreis und -verbrauch, Total Costs of Ownership, Qualität des Substitutionsproduktes und die öffentliche Infrastruktur.

Bei der Verhandlungsstärke der Abnehmer muss zwischen gewerblichen und privaten Kunden unterschieden werden. Beide Käufertypen versuchen, die Preise zu drücken oder höhere Qualität und bessere Dienstleistungen auszuhandeln. Die Stärke jeder wichtigen Abnehmergruppe hängt von bestimmten Merkmalen ihrer Marktsituation und dem Anteil ihrer Käufe an den gesamten Verkäufen der Branche ab. Für die gewerblichen Käufer ist der TCO der entscheidende Faktor. Im Gegensatz dazu reagieren private Käufer empfindlicher auf Investitionskosten. Zusätzlich dazu hängen die individuellen Kaufentscheidungen von privaten Kunden stark von subjektiven Kriterien ab. Die Vermarktung alternativer Antriebssysteme muss nicht nur diese emotionalen Faktoren berücksichtigen, sondern auch umfassende Informationen liefern, um Technologie und TCOs, zu erklären.

Lieferanten können ihre Verhandlungsstärke ausspielen, indem sie drohen, die Preise zu erhöhen oder die Qualität zu senken. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die Lieferanten die Produktauswahl bestimmen. Was sich deutlich im Fall der NGV zeigte, aber auch aktuell im FCV-Markt. Eine Zusammenfassung der Branchenstrukturanalyse und der wirkenden Kräfte ist in der Abbildung 23 dargestellt.

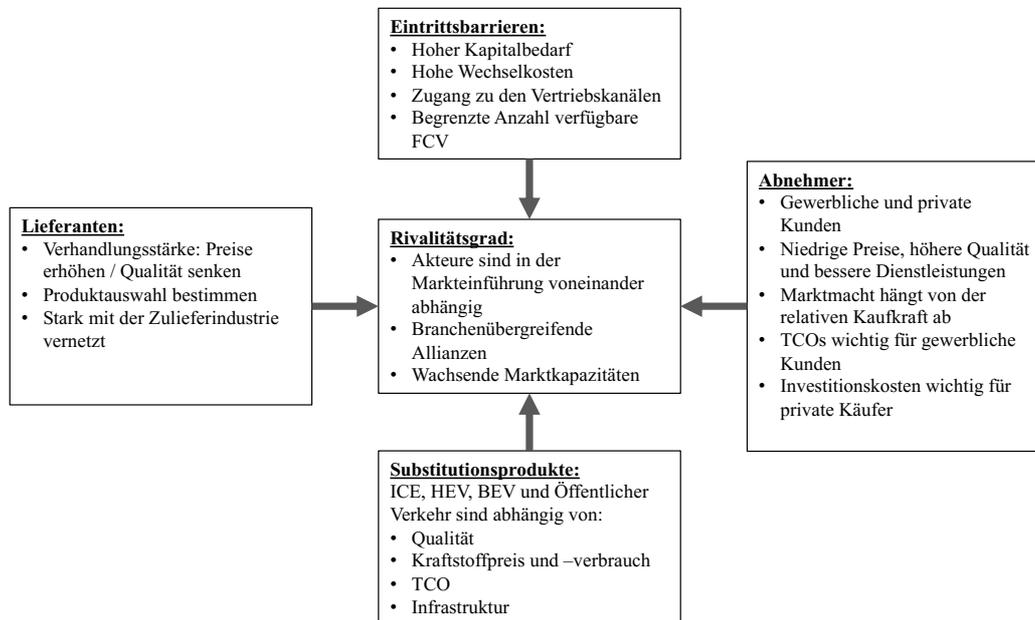


Abbildung 23: «Five Forces» der Wasserstoffmobilität

Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Kapitel 4.6

## 6.6 Erkenntnisse zur Markteinführung im Schwerverkehr

Ein möglicher Weg zur erfolgreichen Implementierung und Marktdurchdringung der Wasserstoffmobilität im Schwerverkehr wird auf der Basis von fünf Erfolgsfaktoren dargestellt. Dabei handelt es sich um die folgenden Faktoren:

1. FCV sowie Wasserstoffproduktions - und -Vertriebstechnologien haben ein hohes Mass an Marktreife erreicht.
2. Ein stabiler und ambitionierter gesetzlicher Rahmen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen sowie staatliche Anreize werden Branchen und Kunden zu Investitionen anregen.
3. Die Wasserstoffmobilität hat einen hohen Grad an Übereinstimmung mit den gesellschaftlich angestrebten Zielen.
4. Die Implementierung einer Wasserstoffinfrastruktur kann zum Erfolg der Wasserstoffmobilität führen.
5. Reduzierung hoher FCV-Kosten durch Skaleneffekte und Weiterentwicklung der Technologie.

Der Ansatz, den Markt über den Schwerverkehr zu durchdringen, der in der Schweiz aktuell rege diskutiert wird, baut auf diesen fünf Erfolgskriterien aus. Grundsätzlich hat sich der Ansatz über die normale Marktdynamik entwickelt. Die Privatwirtschaft engagiert sich, eine Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen, sie entwickelt ein Rückgrat für die Wasserstoffmobilität in Form von Versorgungszentren für den Schwerverkehr.

Im Kapitel 4.7 wurde dargestellt, dass FC-LKW eine Vielzahl von entscheidenden Lebenszyklusvorteilen gegenüber herkömmlichen Diesel-LKW aufgezeigt, indem sie den Ölverbrauch, die Treibhausgasemissionen und die Luftschadstoffemissionen reduzieren. Im Wettbewerb mit herkömmlichen Diesel-LKW, zeigen sich die Vorteile der FC-LKWs attraktiv, insbesondere für den städtischen Betrieb. Nebst der Dekarbonisierung des Schwerverkehrs zeigt sich ein weiterer potentieller Vorteil in einem konkurrenzfähigem TCO. Der TCO hat einen sehr hohen Entscheidungswert im Schwerverkehr. Je nach Studie ist der TCO von FC-LKW entweder bereits jetzt oder aber bis ins Jahr 2030 in der gleichen Grössenordnung wie jener der ICE. Daraus kann geschlossen werden, dass bereits leichte Kostensenkungen bei Produktion und Entwicklung der Wasserstofftechnologie deutliche Verschiebungen bei den Marktpotentialen zur Folge haben können. Dies wird von der Brennstoffzellentechnologie erwartet. Es muss aber beachtet werden, dass bei LKW über 12 Tonnen gemäss (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017) derzeit im TCO-Modell keine Marktpotentiale für FC-LKW erkannt wurden. Wichtige Einflussgrössen auf den TCO sind die Entwicklungen des Kraftstoffpreises und Wirkungsgrades. Steigt der Dieselpreis an, so verschiebt sich dieses Verhältnis weiter in Richtung der Kraftstoffkosten. Die Wirkungsgrade der Brennstoffzellen können weiter gesteigert werden. Jede weitere Steigerung des Wirkungsgrades führt zu einer Senkung der variablen Kosten. Beides kann zu wichtigen TCO-Vorteilen der FC-LKW gegenüber den konventionell angetriebenen LKW führen.

Bei der Markteinführung über PW gibt es im Gegensatz zu der über LKW einen deutlichen Unterschied: (a) andere optimale Betankungsorte (b) LKW tanken deutlich mehr, etwa das 10- bis 20-fache. Bei (b) setzt die Marktentwicklungsstrategie von H2 Energy an, denn mit 10 LKW soll für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Wasserstofftanksäule gesorgt sein. Das ist möglich durch den deutlich höheren Verbrauch und dadurch, dass die LKW in regelmässigen, planbaren Abständen, zu den gleichen Tankstellen zurückkehren.

Es konnten aber auch Problematiken dieser Strategie erkannt werden. Erstens ist die Anzahl HRS abhängig von der Betankungsstrategie der LKWs, dies kann zwischen 450 bis 1'000 HRS für die gesamte Schweiz variieren. Zweitens ist die Akzeptanz für Umwege beim Tanken bei PW & LKWs mit 10 Minuten gering, dies kann zu einem Zielkonflikt bei der Wahl der Betankungsorte führen. Drittens ist die Umsetzung der Verteilung des Wasserstoffs in grossen Mengen fraglich und kann hohe externe Kosten zur Folge haben. Dazu kommt, dass die HRS für eine grosse Zahl LKWs ausgelegt sein muss.

Zusätzlich wurde für PW&LKW in Bezug auf Markteinführung festgestellt, dass (a) die aktive Vermarktung der Wasserstoffmobilität durch die Interessengruppen und die wachsende öffentliche Akzeptanz der Technologie die Marktnachfrage weiter anregen wird, (b) die Bewertung der Entwicklung des Umweltbewusstseins auf der Verbraucherseite sehr positiv ist, (c) geringe Zahlungsbereitschaft der Verbraucher, (d) strengere CO<sub>2</sub>-Regelungen können die Kosten für etablierte Technologien erhöhen und dazu beitragen, die Kostenlücke zu schliessen, (e) auch in 20 bis 30 Jahren wird keine Antriebstechnologie alleine alle wichtigen Kriterien für Wirtschaftlichkeit, Leistung und Umwelt erfüllen.

## 6.7 Resultate aus der SWOT-Analyse

---

Die SWOT-Analyse zeigt, dass die klaren Stärken der Wasserstoffmobilität im emissionsarmen Antrieb, geringen Wartungskosten, den (im Vergleich zu BEV) kurzen Tankzeiten und hohen Reichweiten liegen. Speziell muss zusätzlich die Fähigkeit der saisonalen Speicherung und der Sektorkopplung von Wasserstoff hervorgehoben werden, überschüssige Energie kann im Sommer gespeichert und im Winter, bei Knappheit, genutzt werden. Dies macht Wasserstoff zu einem flexiblen Verbraucher im Energiesystem. Die Schwächen auf der anderen Seite liegen vor allem in der nicht existenten Wasserstoffinfrastruktur, in den aktuell erhöhten Kosten, der unzureichenden Auswahl der FCV, den nicht oder ungenügend klaren Normen und Standards und des geringen öffentlichen Bewusstseins für die

Wasserstoffmobilität. Die vielleicht bedeutendste Chance ist das erwartete hohe Potential der technischen Entwicklung der Wasserstofftechnik. Durch diese sollen in Kombination mit sich entwickelnden Regulationen die FCV wettbewerbsfähig werden. Als Risiken wurden die soziale Akzeptanz in dieser Arbeit mehrfach erkannt, auch der Wettbewerb zu anderen alternativen Antriebstechnologien darf nicht ausseracht gelassen werden.

## **6.8 Ergebnisse der Systemanalyse der Wasserstoffmobilität**

---

Mit dem im Kapitel 5.1 dargestellten CLD wurde das Wasserstoffmobilität-System qualitativ beschrieben. Zusätzlich wurden die wichtigsten Einflussfaktoren und Variablen, die in dem System wirken, erklärt. Der Hauptmotor des Modells (Loop 1) beinhaltet das «Huhn-Ei» Paradigma. In diesem Loop wird die Wechselwirkung der Anzahl HRS und Anzahl FCV dargestellt. Der zweite wichtige Motor ist der Loop 4, welcher beschreibt, wie die Attraktivität der verschiedenen Antriebstechnologien sich gegenseitig beeinflussen und sich gegenseitig Marktanteile abtragen. Diese wiederum werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Durch die Cross-Impact-Analyse werden die 20 relevanten Variablen das System charakterisiert und die wichtigsten hervorgehoben.

Allgemein wurde keine Variabel mit einem kritischen Verhalten identifiziert, das heisst, dass das System relativ langsam auf dem Weg zur Marktdurchdringung ist. Die wichtigsten Systemvariablen sind «Attraktivität FCV», «Attraktivität ICV», «Attraktivität BEV» und «Verkauf». Sie wurden am höchsten bewertet und durch sie kann der grösste Einfluss auf das Systemverhalten genommen werden.

## **6.9 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse**

---

Durch die Sensitivitätsanalyse konnten zusätzliche Erkenntnisse über das Wasserstoffmobilitätssystem erlangt werden. Es konnte dargestellt werden, wie sensitiv der Markt unter sich ändernden Einflüssen ist. Um die Bedeutung der Änderung zu charakterisieren, wurden durch eine Analyse historische Änderungen der jährlichen Verkaufszahlen bestimmt. Eine Änderung von 5% ist «bedeutend» und eine von 10% ist «sehr gross».

### **Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse der Forschung und Entwicklung**

Als erste Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss und die Sensitivität des Marktes auf einen sich ändernden technischen Fortschritt betrachtet. Dafür wurden zwei Szenarien mit der Baseline verglichen. Das erste Szenario geht von einer schnelleren (+ 5 Jahre Tech), das zweite von einer langsameren (-5 Jahre Tech) Entwicklung der Wasserstoff relevanten F&E aus. In beiden Szenarien, konnte deutlich erkannt werden, dass der Fortschritt der F&E einen bedeutenden bis starken Einfluss auf die Verkaufszahlen der FCV haben. Speziell die LKW zeigten eine starke Sensitivität. Im Szenario «+ 5 Jahre Tech» reagierten die Verkaufszahlen der FC-LKW mit einem Anstieg von bis zu 9%, die PWs um 5%. Im negativen Szenario «- 5 Jahre Tech» gingen der Verkauf der FC-LKW um bis zu 7% zurück.

Allgemein kann gesagt werden, dass der Fortschritt der FCV-Technik, in negative und positive Richtung, einen bedeutenden Einfluss auf die proportionalen Anteile der Verkaufszahlen von sowohl LKW wie auch PWs haben, klar stärker reagieren die LKWs. Erklärt werden kann diese grössere Sensitivität der LKW mit den TCO, welche vor allem für den Kauf der LKW eine wichtige Rolle spielen. Dies belegt eine These, die bereits in den Kapitel 3.3.3 und 4.7 ausführlich besprochen worden. Sie wurde auch wiederholt von den befragten Experten hervorgehoben ((Bach, 2019), (Holdener, 2019) & (Vock, 2019)). Ein schnellerer Fortschritt in der Entwicklung der FCV führt zu sinkenden Betriebskosten, da zum Beispiel die Effizienz der Fahrzeuge steigt, auch nimmt dadurch der Gesamtnutzen der FCV zu, was beides zu tieferen TCO führt. Dies führt, wie auch in der Literatur festgestellt und in der Sensitivitätsanalyse bestätigt wird, speziell im LKW Segment zu attraktiveren Wettbewerbsbedingungen. Weiter

besagt die These, dass bei den PWs die TCO für die Kaufentscheidung weniger entscheidend sind. Entscheidender sind in PW Segment die Investitionskosten und die soziale Verhaltensnorm (vgl. Kapitel 5.1). Beide dieser beiden Kriterien profitieren ebenfalls vom technischen Fortschritt, doch sind diese Kaufentscheide nicht gleich dringend wie die TCO bei den LKWs und führen nicht zu einer vergleichbaren Sensitivität.

Diese Diskrepanz der Sensitivität zwischen den Segmenten PWs und LKWs kann also mit der hohen Bedeutung der TCO für das LKW-Segment erklärt werden. Diese Aussage deckt sich mit der Theorie aus der Literatur.

### **Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse des Ölpreises**

Bei der Sensitivitätsanalyse der beiden positiven Ölpreisszenarien (+50 & +100%) zeigten sich für den Verkauf der FC-PW ähnliche Jahresprofile, mit einem Maximalwert der sensitiven Änderung von + 5% und einem Marktanteil von 20% am Ende der Analyse (2050). Eine gegensätzliche Beobachtung kann beim Betrachten der FC-LKWs gemacht werden: bei der Verdopplung des Ölpreises ist eine deutliche Zunahme der LKW-Verkaufszahlen festzustellen.

Beide Beobachtungen in Bezug auf den FC-PW und FC-LKW lassen sich, wie bereits im vorigen Kapitel über die Sensitivitätsanalyse F&E besprochen wurde, mit den unterschiedlichen Kaufentscheiden im PW- und LKW-Segment erklären. Beim erstgenannten Segment sind die TCO weniger ausschlaggebend bei der Kaufentscheidung, im Gegensatz zum zweitgenannten Segment, bei welchem die TCO das Hauptentscheidungskriterium sind.

Das dritte Szenario macht deutlich, dass bei sehr günstigem Ölpreis (- 50%) weder FC-PW noch FC-LKW auf dem Markt eine relevante Bedeutung haben. Für die LKW sind die TCO der anderen Antriebstechnologien deutlich attraktiver und bei den PW gibt es dann keine relevanten Anreize für einen Wechsel zu einem FCV.

Basierend auf dieser Analyse konnte gezeigt werden, dass eine Preiserhöhung um 50% der ölpreisrelevanten Treibstoffe zu einem bedeutenden Anstieg der FCV-Verkäufe führt. Speziell sensitiv reagieren die LKWs auf eine solche Änderung. PW-Käufer reagieren bei extrem ansteigenden Ölpreisen nicht gleich sensitiv.

### **Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse des Wasserstoffpreises**

Die dritte Sensitivitätsanalyse betrachtet den Einfluss des Wasserstoffpreises auf das Wasserstoffmobilitätssystem. Das Szenario 1, welches den Einfluss von Wasserstoffsubventionen zeigt, ergab keinen bedeutenden Ausschlag in der Sensitivität, der Anstieg überschreitet aber nie die 2% Marke. Auch weitere Szenarien mit grösseren Reduktionen (z.B. eine Reduktion des Wasserstoffpreises um 25%) ergaben keine nennenswert andere Resultate. Wird der Wasserstoffpreis aber erhöht, zeigt sich, dass die Verkaufszahlen der FCV doch sehr sensitiv reagieren.

Es konnte gezeigt werden, dass die Konkurrenzfähigkeit von FCV bei einem Anstieg des Wasserstoffpreises um 30% nicht gegeben ist. Diese Analyse hat weiter gezeigt, dass die Verkaufszahlen von beiden Segmenten (LKWs & PW) keine bedeutende Sensitivität auf eine Reduktion des Wasserstoffpreises ergeben. Der Wasserstoffpreis sollte aber ebenfalls einen Effekt auf die TCO haben, d.h. ein tieferer Preis sollte die Attraktivität für LKWs erhöhen.

## Allgemeine Erkenntnisse aus den Sensitivitätsanalysen

Über alle drei Sensitivitätsanalysen aller berechneten Szenarien konnten zwei grundlegende Beobachtungen gemacht werden: (a) Das **System hat eine zeitliche Verzögerung** von sieben bis zehn Jahren, in denen es auf Änderungen reagiert. Am deutlichsten kann dies bei der Sensitivitätsanalyse des Wasserstoffpreises und der technischen Entwicklung gesehen werden. (b) Die Kundensegmente PW und LKW werden von **unterschiedlichen Kaufentscheidungen** beeinflusst. Diese führen zu verschiedenen Reaktionen auf Änderungen im Marktumfeld. Die in der Literatur beschriebenen Thesen, dass für LKW-Käufer die TCO entscheiden sind und für PW-Käufer die Investitionskosten, konnten mehrfach bestätigt werden. Als Konsequenz daraus ist festzustellen, dass die beiden Marktsegmente PW & LKW mit gezielten Anreizen separat und unabhängig stimuliert werden können. Anreize, die zu einem attraktiveren und wettbewerbsfähigen TCO führen, wie zum Beispiel effizientere Wasserstofftechnik, höherer Ölpreis, Steuerbefreiung und geringere Wartung, führen zur direkten Erhöhung der attraktiveren und wettbewerbsfähigen der FC-LKW. Bezogen auf die PW und als direktes Resultat der Sensitivitätsanalyse ist zu erkennen, dass die TCO nicht die wichtigste Kaufentscheidung ist. In der Literatur wurde aufgezeigt, dass die Investitionskosten von grösserer Bedeutung sind. Die Analyse der Sensitivität der Investitionskosten war nicht Teil dieser Arbeit.

*Anmerkung: An dieser Stelle muss nochmals darauf aufmerksam gemacht werden, dass sich diese Analyse und das verwendete Programm (ADOPT) auf den US-Markt beziehen. Es muss beachtet werden, dass sich Feststellungen wie «Die Konkurrenzfähigkeit von FCV bei einem Wasserstoffpreis von 9 \$/Kg ist nicht gegeben.» nur auf den US-Markt beziehen und nicht allgemein gemacht werden können. Aus diesem Grund wurden die Werte bewusst nicht in CHF angegeben und wenn möglich in prozentualen Angaben gemacht. Im Falle des genannten Beispiels, ist die Aussage «Die Konkurrenzfähigkeit von FCV bei einer Wasserstoffpreiserhöhung von 30% ist nicht gegeben.» zulässig. Das heisst Aussagen in Zahlenwerten dürfen nur relativ zu einander verglichen werden. Ein direkter Übertrag auf andere Märkte ist nicht zulässig.*

### 6.10 Die kritischen Erfolgsfaktoren der Wasserstoffmobilität

---

In dieser Arbeit wurden verschiedene, die Wasserstoffmobilität behindernde oder unterstützende Faktoren erkannt, besprochen und analysiert. Da es sich bei der Wasserstoffmobilität um einen Markt in der frühen Entwicklungsphase handelt, ist eine eindeutige Bestimmung der Erfolgsfaktoren, erst rückblickend nach erfolgreicher Marktpenetration möglich. Gemäss der Delphi-Analyse von (Lemke, 2016) sind die geeignete Bereitstellung einer Wasserstoffinfrastruktur, zusammen mit zielgerichteten Massnahmen und Regulierungen, zentrale Erfolgsfaktoren für die Wasserstoffmobilität. In dieser Arbeit werden drei kritischen Erfolgsfaktoren, basierend aus den Erkenntnissen der erstellten Analysen und der Literatur, aufgezeigt, die als Voraussetzung für die Marktdurchdringung zwingend erforderlich sind.

- I. **Infrastruktur:** Die Verfügbarkeit von HRS und der Wasserstoffbereitstellung ist absolut entscheidend für den Erfolg der Wasserstoffmobilität. Es handelt sich um den wichtigsten Erfolgsfaktor. Ohne die Möglichkeit Wasserstoff als Treibstoff zu beziehen, gibt es keinen Markt für FCV. Gleichzeitig beeinflusst die Infrastruktur die folgenden zwei Erfolgsfaktoren massgeblich.
- II. **Wettbewerbsfähigkeit:** Mehrfach wurde in dieser Arbeit die Wettbewerbsfähigkeit als Erfolgsfaktor hervorgehoben. Es konnte gezeigt werden, dass für das Segment LKW der TCO und für PW die Investitionskosten entscheidende Kaufentscheide sind. Beides, und viele weitere Vorteile, spiegelt sich in der Wettbewerbsfähigkeit der FCV wider. Ist die Wettbewerbsfähigkeit der FCV nicht gegeben, wird sich eine andere Antriebstechnologie durchsetzen.
- III. **Kundenakzeptanz:** Die Kundenakzeptanz wird nicht nur von der Wettbewerbsfähigkeit bestimmt. Wichtige Einflussgrössen sind auch soziale Verhaltensnormen, Sicherheitsbedenken,

verfügbare und adressatengerechte Information und Kommunikation, sowie die Auswahlmöglichkeit, die dem Kunden zur Verfügung steht.

Keine der drei genannten kritischen Erfolgsfaktoren kann für sich alleine zum Erfolg der Wasserstoffmobilität führen. Sie alle stehen in einer starken Verbindung zueinander und beeinflussen sich gegenseitig entscheidend. Ohne eine vorhandene Infrastruktur kann es keine Wettbewerbsfähigkeit oder Kundenakzeptanz für FCV geben. Die Wettbewerbsfähigkeit und Kundenakzeptanz sind wiederum entscheidend, damit Anbieter in die Infrastruktur investieren und diese aufbauen. Ebenso ist Kundenakzeptanz ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit. Es müssen also alle drei kritischen Erfolgsfaktoren erreicht werden, damit sich die Wasserstoffmobilität durchsetzen kann. **Die Grundvoraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit und Kundenakzeptanz ist eine vorhandene Wasserstoffinfrastruktur, mit ihr muss das System aufgebaut werden.**

## 7 Diskussion

### 7.1 Diskussion der US-Marktzahlen

Das in dieser Arbeit verwendete Simulationstool ADOPT basiert auf historischen Marktzahlen, Trends und Prognosen der USA. Für diese Arbeit wurde die Annahme getroffen, dass sich der restliche Weltmarkt und auch die Schweiz in einem relativen Verhältnis dazu entwickeln. Ziel dieses Kapitels ist die Diskussion der Bedeutung dieser Annahme und die Frage, ob diese zulässig ist.

Grundsätzlich kann, bei Vergleich der historischen Verkaufszahlen der USA im Vergleich zur Schweiz angesetzt werden. Die Sensitivität der beiden Märkte ist in der Abbildung 24 grafisch, in Form der jährlichen Änderungen der Verkaufszahlen als Reaktion auf den jeweiligen Markt, dargestellt. Ganz deutlich kann gesehen werden, dass die US-Verkaufszahlen viel sensitiver auf Marktereignisse (z.B. Wirtschaftskrise ab 2007) reagieren. Die Schweizer Verkaufszahlen reagierten im Vergleich dazu so gut wie nicht. Aber auch auf andere Anreize scheint der US-Markt stärker zu reagieren (vgl. Abbildung 24, Jahr 2015). Allgemein scheint der Schweizer Markt im Vergleich zur USA nicht speziell sensitiv zu sein.

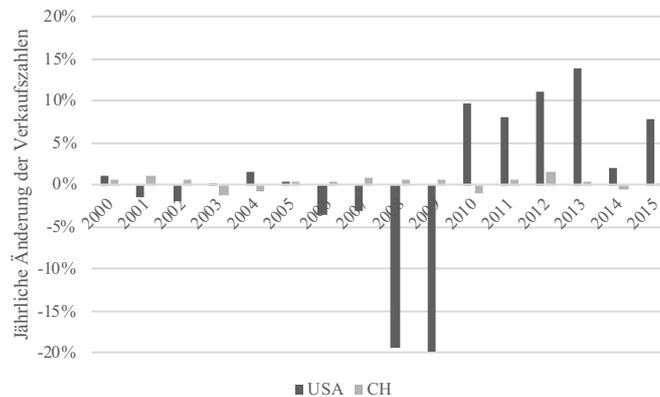


Abbildung 24: Sensitivitätsvergleich USA und Schweiz

*Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015) und (BfS, 2019)*

Ein weiterer Ansatz, bietet der Vergleich von nationalen Marktentwicklungsprognosen. Eine solche bietet die in im Anhang 10-XVIII dargestellte und im Kapitel 7.2 diskutierte Prognose des (OECD/ITF, 2017). In dieser Prognose werden Szenarien für die USA, EU und Japan erstellt. Beim Vergleich der drei Prognosen ist zu nächst einmal festzustellen, dass sich alle grundsätzlich unterscheiden. Speziell die Entwicklung der hybriden Lösungen und die Verdrängung der ICE scheint sich unterschiedlich zu entwickeln. Die Marktentwicklung der FCV und BEV verläuft aber in den drei Szenarien in ähnlichen Phasen und proportional auch in der gleichen Grössenordnung. Auf Basis dieses Vergleichs kann sehr wohl eine Verbindung zwischen FCV-Marktentwicklung der USA zu den übrigen Märkten vermutet werden.

Klar dürfte sein, dass die Schweiz ein anderes Kaufverhalten hat als die USA. Auch sind Kaufentscheide in der Schweiz vermutlich weniger finanziell und mehr sozial bedingt. Auch kann vermutet werden, dass der technische Vorschrift in der Schweiz und der USA in etwa gleich schnell abläuft. Eine genaue Untersuchung des Kaufverhalten wurde in dieser Arbeit aber nicht durchgeführt. Zusammenfassend kann vermutet werden, dass eine Sensitivitätsanalyse mit Schweizer Marktzahlen zu vermutlich weniger sensitiven Ergebnissen kommt. Dennoch dürften die Effekte vermutlich die gleichen belieben: der TCO

ist wichtig für das LKW-Segment, ein hoher Wasserstoffpreis führt zu keinen wettbewerbsfähigen FCV und der steigende Ölpreis unterstützt die Marktentwicklung der FCV.

## 7.2 Diskussion von Marktentwicklungsprognosen

---

Wie an verschiedenen Stellen in dieser Arbeit erwähnt wurde, werden hier keine eigenen Prognosen über die Marktentwicklung der Wasserstoffmobilität erstellt. Teil der Zielsetzung waren die im Kapitel 5.3 beschreibenden Szenarien und die erstellte Sensitivitätsanalyse. Dieses Kapitel diskutiert, ob die erstellten Szenarien mit Prognosen aus der Literatur vereinbar sind und stellt in diesem Prozess weitere mögliche Szenarien vor. Ziel ist nicht die Bewertung der vorgestellten Prognosen, sondern das Aufzeigen, möglicher Abweichungen der in dieser Arbeit erstellten Szenarien von der Literatur. Auch werden die Prognosen aus der Literatur nicht im Detail erklärt, für weiterer reichende Informationen zu den jeweiligen Szenarien ist ein Verweis auf die Literatur gegeben.

In der Literatur konnten ganz unterschiedliche Prognosen über die Entwicklung der Antriebstechnologie gefunden werden. Es können Szenarien gefunden werden, welche keine Potentiale, weder für PW noch LKW sehen, wie zum Beispiel die BFE Studie «CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge» (BAFU, 2019) welche Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften bis in Jahr 2030 betrachtet. Ein anderes Szenarien «A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis» welches von McKinsey & Company für FCH JU (McKinsey & Company, 2011) erstellt wurde, geht von einem Marktanteil im Jahr 2050 von 50% FCV in Europa aus (BEV 25%). Eine Segmentierung zwischen PW und LKW wird nicht explizit gemacht. Dieses Szenario setzt eine «Zero-Emission» Regulation aus. Das Szenario, das wiederholt in anderen Studien (z.B. LEMKE oder SHELL) zitiert wird, ist die «Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells» (OECD/IEA, 2015). Die graphische Darstellung des FCV-Verkaufsszenario ist im Anhang 10-XVIII zu finden. Das Szenario geht davon aus, dass bis 2020 rund 30'000 FCVs in der USA, der EU und Japan verkauft sein werden. Bis 2050 liegt der Anteil der FCVs am gesamten PW-Absatz bei rund 30%. Gemäss (OECD/IEA, 2015) sind die notwendigen Bedingungen für diese Szenarien sehr ambitioniert. Eine der Voraussetzungen für dieses Szenario sind eine schnelle und hohe Senkung der FCV-Kosten.

Aus dieser kurzen Übersicht der drei Szenarien aus der Literatur, kann in Bezug auf die Szenarien aus der Sensitivitätsanalyse festgestellt werden, dass ein FC-PW Absatz von 16% im Jahr 2050 (wie das in der Baseline der Fall ist) durchaus möglich und realistisch ist. Unter optimalen Umständen sind auch deutlich höhere Marktanteile möglich.

## 7.3 Diskussion von weiteren Einflüssen auf Marktsysteme

---

Nebst den in der Sensitivitätsanalyse besprochenen, gibt es weitere Einflüsse (F&E, Ölpreis und Wasserstoffpreis), welche Kaufentscheide beeinflussen. Eine wichtige Grösse, die auch im Kapitel 4 mehrfach erwähnt wurde, sind die Investitionskosten der FCV, die Modelauswahl, Regulationen und die Verfügbarkeit der HRS. Zunächst muss festgestellt werden, dass sich diese teilweise mit den bereits analysierten Einflüssen decken, z.B. spiegeln sich CO<sub>2</sub>-Massnahmen (je nach Ausführung) im Ölpreis wieder. Auch zeigt sich der Fortschritt der F&E in tieferen Investitionskosten. Ihre genaue Auswirkung wurden aber nicht isoliert betrachtet. Anhand der Literatur kann aber gesagt werden, dass sich die Investitionskosten stark auf das PW-Segment auswirken. Die vorhandene Infrastruktur ist eine Grundvoraussetzung für die Marktpenetration beider Segmente. Die Anzahl HRS, die es in der Schweiz braucht ist zudem abhängig von der Betankungsstrategie im LKW-Segment und der Tankstelle selbst. Sie liegt zwischen 450 bis über 1'000 HRS (Çabukoglu, Georges, & Küng, 2019), wobei die Betankung am Abend mit 60 g/s die untere Grenze beschreibt (vgl. Kapitel 4.7). Die Strategie von H2 Energy das Tankstellennetz schrittweise (1 HRS pro 10 LKWs) aufzubauen ist also für die Wasserstoffmobilität

Schweiz von zentralster Bedeutung und löst die «Huhn-Ei» Problematik. In anderen Ländern wird diese Problematik über Förderprojekte entschärft. Erreicht H2 Energy ihr Ziel von 100 Tankstellen bis ins Jahr 2023, wird die Schweiz das Land mit dem dichtesten HRS-Netz sein und somit eine optimale Grundlage für die Entwicklung der Schweizer Wasserstoffmobilität schaffen. Die Modelauswahl der FCV wird sich vermutlich mit steigender Nachfrage einpendeln. Hierzu hat (Holdener, 2019) bemerkt, dass bevor Hyundai die FC-LKW in der Schweiz angekündigt hatte, Hyundai in Europa ein unbedeutender Player im LKW-Segment war. Durch den Markteintritt der FC-LKW haben sie einen strategisch bedeutenden Zug gemacht und sich einen Namen gemacht. Wie sich dies auswirkt muss sich noch zeigen. Es darf aber davon ausgegangen werden, dass andere Akteure angemessen reagieren werden.

#### **7.4 Diskussion der Abgrenzung «Mobilität»**

---

In der Definition wurde der Begriff «Mobilität» auf den Strassenverkehr (PW&LKW) begrenzt. Mobilität beinhaltet aber alle Formen der Bewegung, d.h. der Begriff umfasst auch Flugverkehr, Schifffahrt, Zugverkehr, Fahrrad und das Gehen. Das bedeutet, dass, ausserhalb der Abgrenzung dieser Arbeit, für die Wasserstoffmobilität zusätzlich der Flugverkehr, die Schifffahrt, der Zugverkehr, Flurförderfahrzeuge (z.B. Gabelstapler), Landwirtschaft- und Baufahrzeuge und Maschinen von Interesse sind.

Diese zusätzlichen Absatzmärkte, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden, enthalten zusätzliche Potentiale für den Wasserstoff als Produkt. Auch die Schifffahrt und der Flugverkehr sind sehr interessante Absatzmärkte, so will z.B. der Logistikgigant Merks bis 2050 komplett CO<sub>2</sub>-neutral sein (vgl. Anhang 10-XVI). Doch ist bei Schifffahrt und Flugverkehr der aktuelle Entwicklungsgrad mit einem TRL von 5-6 gering (vgl. Abbildung 4: TRL von Brennstoffzellenanwendungen).

Weiterentwickelt sind Anwendungen der Flurförderzeugen (TRL 8-9) und der Zugfahrt (TRL 7) in beiden Absatzmärkten wird grosses Potential gesehen.

## 8 Zusammenfassung, Schlussbetrachtung und Ausblick

---

### 8.1 Zusammenfassung

---

Die Luftverschmutzung hat China, Indien, den Iran und Italien dazu veranlasst, Programme zu starten, um die Aufnahme von NGV zu fördern. Für Argentinien boten die reichlich vorhandenen Erdgasreserven den wichtigsten Anreiz für die Förderung. Daraus kann abgeleitet werden, dass Luftverschmutzung und Energiesicherheit die wichtigsten historischen und aktuellen Treiber für die Förderung von NGV sind. Der Erfolg von NGV in den genannten Ländern ist auf die preisliche Wettbewerbsfähigkeit von Erdgas zu Diesel und Benzin zu rückzuführen. Und die Regierungen halten die niedrigere Erdgaspreise aufrecht, indem sie Steuersysteme für Benzin und Diesel einführen. Die grössten Herausforderungen für die weitere Entwicklung der NGV-Märkte in diesen Ländern scheinen die fehlende Lieferinfrastruktur zu sein. Die Verbesserung der Betankungsinfrastruktur sowie die Festlegung von Normen und Standards für die CNG-Umstellung sind von wesentlicher Bedeutung, um das Vertrauen der Öffentlichkeit und das Wachstum der NGV-Märkte in diesen Ländern zu gewährleisten.

Diese Erkenntnisse aus dem NGV-Markt sind für die Entwicklung der Wasserstoffmobilität von grosser Bedeutung. Aus ihnen und Gesprächen mit Experten und der Literatur konnten die folgenden drei Hauptklassen von Barrieren für Wasserstoff als Kraftstoff abgeleitet werden: (a) Die Schaffung einer Wasserstoffverteilungsinfrastruktur. (b) Die höheren Kosten von Wasserstofffahrzeugen. (c) Die Notwendigkeit, die Akzeptanz der Verbraucher zu gewinnen, die sowohl mit den Kosten als auch mit der Kraftstoffverfügbarkeit zusammenhängt.

Die Markteinführung muss durch die Vorteile der FCV-Technologie vorangetrieben werden. Auf diesen Vorteilen müssen die Markttreiber aufbauen um Entscheidungsträger zu veranlassen, Vorschriften einzuführen oder anzupassen, Marktinstrumente und ergänzende Massnahmen festzulegen, um die Verwendung von kohlenstoffarmen Kraftstoffen, einschliesslich Wasserstoff, zu fördern. Die wichtigsten Treiber für die Nutzung von grünem Wasserstoff können sind:

- Klimapolitische Massnahmen und Reduzierung der lokalen Luftverschmutzung
- Energiesicherheit und Unabhängigkeit fossiler Brennstoffe
- Industrielle Wettbewerbsfähigkeit durch Technologieentwicklung und Innovation.
- Unternehmertum: Anreiz über das Potenzial, die Markteinführung der Wasserstoffmobilität wesentlich zu steuern und zu fördern und so Marktführer zu werden.

Durch die kritische Betrachtung der Stakeholder wurden Strategien zur Koordination der Stakeholder-Interaktionen erarbeitet. Eine hohe Anzahl Stakeholder mit grossem Interesse und Macht an der Markteinführung und -Durchdringung der Wasserstoffmobilität wurde erkannt. Für ein erfolgreiches Stakeholder Management müssen sie alle stark in die Projekte eingebunden werden. Die folgenden Strategien werden für die, ebenfalls genannten Stakeholder Gruppen empfohlen:

- I. Verständnis generieren durch am Projekt beteiligen: Konkurrenz mit alternativen Antrieben
- II. In Zusammenarbeit einbinden mit einer wichtigen Rolle: Konkurrenz mit fossilen Antrieben
- III. Verpflichten durch Verantwortung geben: Erneuerbare Energie, Transportnetzwerk, Fahrzeugproduktion, -Importeure, Staat, Kunde und Forschung
- IV. Akzeptanz schaffen durch Ownership: Fossile Energie, Betankungsanlagen, Wasserstoffverband und -Unternehmen

Mit der PEST-Analyse konnten verschiedene Trends der Automobilindustrie identifiziert werden, die sich auch in Zukunft fortsetzen dürften und sowohl Chancen als auch Herausforderungen für die Wasserstoffmobilität im Hinblick auf den technologischen Wandel darstellen. Die vier Megatrends, die auch für die Wasserstoffmobilität gelten, sind Nachhaltigkeit, Urbanisierung, Individualisierung und Digitalisierung die für die Automobilindustrie identifiziert wurden. Zusätzlich wurde gezeigt:

- Regierungen der ganzen Welt geben der Automobilindustrie strenge Umweltauflagen
- Wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirken auf die Wasserstoffmobilität.
- Verschiedene Technologien werden gefördert, aktuell liegt der Schwerpunkt aber bei den Elektrofahrzeugen.
- Die soziokulturellen Faktoren und Verbraucherpräferenzen haben einen grossen und direkten Einfluss.
- Vor allem aber beeinflusst das Aufkommen der neuen Märkte die Wettbewerbsintensität in diesem Sektor.
- Grosse Akteure der Automobilindustrie investieren in verschiedene Technologien, um einen grösseren Marktanteil zu gewinnen, eine solche Technologie ist die Brennstoffzelle.

Mit der Branchenstrukturanalyse wurden die für die Wasserstoffmobilität relevanten Wettbewerbsbedingungen aufgezeigt und besprochen. Es konnte gezeigt werden, dass die Eintrittsbarrieren der Akteure zur Wasserstoffmobilität hoch sind. Die wichtigsten Eintrittsbarrieren sind der Kapitalbedarf, Wechselkosten und die begrenzte Anzahl der verfügbaren Modelle in der Markteinführungsphase. Da die Akteure, in der frühen Phase der Markteinführung, voneinander abhängig sind, ist der Wettbewerb zwischen ihnen relativ gering. Die Auswirkungen von Substitutionsprodukten hängt von verschiedenen Merkmalen sowie der Ersatzbereitschaft des Käufers ab. Die relevantesten Charakteristiken sind: Fahrzeugverkauf-, Kraftstoffpreis und -verbrauch, Total Costs of Ownership, Qualität des Substitutionsproduktes und die öffentliche Infrastruktur. Bei der Verhandlungsstärke der Abnehmer muss zwischen gewerblichen und privaten Kunden unterschieden werden. Für die gewerblichen Käufer ist der TCO der entscheidende Faktor. Im Gegensatz dazu reagieren private Käufer empfindlicher auf Investitionskosten. Lieferanten können ihre Verhandlungsstärke ausspielen, indem sie drohen, die Preise zu erhöhen oder die Qualität zu senken. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die Lieferanten die Produktauswahl bestimmt.

In dieser Arbeit wurde der Ansatz, den Wasserstoffmarkt über den Schwerverkehr zu durchdringen, genauer betrachtet. Dabei handelt es sich um das Vorgehen, welches in der Schweiz aktuell verfolgt wird. Im Wettbewerb mit herkömmlichen Diesel-LKW, zeigen sich die Vorteile der FC-LKWs attraktiv, insbesondere für städtischen Betrieb. Der TCO hat einen sehr hohen Entscheidungswert im Schwerverkehr. Je nach Studie ist der TCO von FC-LKW entweder bereits jetzt oder aber bis ins Jahr 2030 in der gleichen Grössenordnung wie jener der ICE liegt. Bereits leichte Kostensenkungen bei Produktion und Entwicklung der Wasserstofftechnologie können zu Verschiebungen bei den Marktpotentialen hin zu der Wasserstoffmobilität führen.

Die Markteinführung über LWK charakterisiert sich im Vergleich zu PW durch: (a) andere optimale Betankungsorte (b) höherer Verbrauch, LKW tanken etwa das 10- bis 20-fache. Bei (b) setzt die Marktentwicklungsstrategie von H2 Energy an, mit 10 LKW soll eine wirtschaftlicher Betrieb einer Wasserstofftanksäule möglich sein. Die Problematiken in dieser Strategie sind:

- Anzahl HRS abhängig von der Betankungsstrategie der LKWs.
- Akzeptanz für Umwege beim Tanken ist gering, dies kann zu einem Zielkonflikt bei der Wahl der Betankungsorte führen.

- Verteilung des Wasserstoff in grossen Mengen kann hohe externe Kosten zur Folge haben.
- HRS muss für eine grosse Zahl LKWs ausgelegt sein.

Die SWOT-Analyse zeigt, dass die klaren Stärken der Wasserstoffmobilität im emissionsarmen Antrieb, geringen Wartungskosten, kurzen Tankzeiten und hohen Reichweiten liegen. Speziell muss zusätzlich die Fähigkeit der saisonalen Speicherung und der Sektorkopplung von Wasserstoff hervorgehoben werden. Die Schwächen liegen vor allem in der nicht existenten Wasserstoffinfrastruktur, in den aktuell erhöhten Kosten, der unzureichenden Auswahl der FCV, den nicht oder ungenügend klaren Normen und Standards und des geringen öffentlichen Bewusstseins für die Wasserstoffmobilität. Die bedeutendste Chance ist das hohe Potential der Entwicklung der Wasserstofftechnik, welche erwartet wird. Die Risiken sind die soziale Akzeptanz und der Wettbewerb zu anderen alternativen Antriebstechnologien.

Mit dem CLD wurde das Wasserstoffmobilitäts-System qualitativ beschrieben. Zusätzlich wurden der Hauptmotor des Modells, der das «Huhn-Ei» Paradigma beinhaltet, identifiziert. In diesem Loop wird die Wechselwirkung der Anzahl HRS und Anzahl FCV dargestellt. Durch die Cross-Impact-Analyse werden die 20 relevanten Variablen des Systems charakterisiert und die wichtigsten hervorgehoben. Es wurde gezeigt, dass keine Variabel ein kritisches Verhalten aufweist. Das heisst, dass sich das System relativ langsam auf dem Weg zur Marktdurchdringung befindet. Die wichtigsten Systemvariablen sind «Attraktivität FCV», «Attraktivität ICV», «Attraktivität BEV» und «Verkauf», durch ihre Beeinflussung kann der grösste Einfluss auf das Systemverhalten genommen werden.

Durch die Sensitivitätsanalyse wird gezeigt, wie sensitiv der Markt unter sich ändernden Einflüssen ist. Als speziell sensitiv zeigte sich der Einfluss des Fortschritts der FCV-Technik auf das LKW Segment. Dies bestätigt die zentrale Bedeutung des TCO für die Kaufentscheidung eines LKWs. Der Einfluss des TCO auf das LKW-Segment zeigte sich ein weiteres Mal bei der Sensitivitätsanalyse der Ölpreisszenarien. In der Analyse der Wasserstoffpreise konnte durch die Reduktion des Wasserstoffpreises keine bedeutende Sensitivität erkannt werden. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Konkurrenzfähigkeit von FCV bei einem Anstieg des Wasserstoffpreises um 30% nicht gegeben ist. Allgemein ist festzustellen, dass die LKW deutlich sensitiver auf Änderungen des Markts reagieren. Über alle drei Sensitivitätsanalysen aller berechneten Szenarien konnten zwei grundlegenden Beobachtungen gemacht werden: (a) Das **System hat eine zeitliche Verzögerung** von sieben bis zehn Jahren, in denen es auf Änderungen reagiert. (b) Die Kundensegmente PW und LKW werden von **unterschiedlichen Kaufentscheidungen** beeinflusst: bei LKW-Käufern sind es die TCO und bei PW-Käufern die Investitionskosten.

In dieser Arbeit sind verschiedene Faktoren, welche die Wasserstoffmobilität behindern oder antreiben erkannt, besprochen und analysiert worden.

Die drei wichtigsten kritischen Erfolgsfaktoren, als Voraussetzung für die Marktdurchdringung zwingend erforderlich, sind die folgenden:

- I. **Infrastruktur:** Die Verfügbarkeit von HRS und der Wasserstoffbereitstellung ist absolut entscheidend für den Erfolg der Wasserstoffmobilität.
- II. **Wettbewerbsfähigkeit:** Ist die Wettbewerbsfähigkeit der FCV nicht gegeben, wird sich eine andere Antriebstechnologie durchsetzen.
- III. **Kundenakzeptanz:** Wichtige Einflussgrössen der Kundenakzeptanz sind auch soziale Verhaltensnormen, Sicherheitsbedenken, verfügbare und adressatengerechte Information und Kommunikation, sowie die Auswahlmöglichkeiten die dem Kunden zur Verfügung stehen.

Keine der drei genannten kritischen Erfolgsfaktoren kann für sich alleine zum Erfolg der Wasserstoffmobilität führen. Sie alle stehen in einer starken Verbindung zueinander und beeinflussen sich gegenseitig entscheidend, es sind kritische Schlüsselfaktoren für den Erfolg der Wasserstoffmobilität. Die Grundvoraussetzung für die Wettbewerbsfähigkeit und Kundenakzeptanz ist eine vorhandene Wasserstoffinfrastruktur, mit ihr muss das System aufgebaut werden.

## **8.2 Empfehlungen an das Unternehmen**

---

1'000 LKW mit einer Fahrleistung von je 40'000 km/a und einem Verbrauch von 8 kg H<sub>2</sub>/100 km ergeben einen Jahresverbrauch von 3'200 Tonnen Wasserstoff. Bei einem Verkaufspreis von 10 CHF/kg H<sub>2</sub> resultiert ein Jahresumsatz von CHF 3'200'000 nur für den Bedarf der LKWs. Zu erwarten ist aber, dass mit einem wachsenden HRS-Netz neben den LKWs auch die Anzahl FC-PW ansteigt, je nach Studie bis zu einem Marktanteil von 15 bis 45% FCV bis 2050. Diese Aussage betrifft nur den Strassenverkehr als potentieller Absatzmarkt. Wasserstoff wird aber in der gesamten Mobilität (inkl. Luftfahrt, Industrie, Landwirtschaft und Eisenbahn) Anwendungen finden. Auch andere Sektoren, wie die Industrie, Stromspeicherung und Wärmeproduktion sind interessante Abnehmer für Wasserstoff. Eine grobe Abschätzung (vgl. Anhang 10-X) zeigt auf, dass das gesamte Schweizer Marktpotential von Wasserstoff über alle vier Sektoren rund 125 Mia. CHF aus macht, bei einer aktuellen Marktsättigung von unter 0.3%.

Aktuell befindet sich die Wasserstoffmobilität in einer frühen Phase der Marktentwicklung. Verschiedene Markteintrittsbarrieren, wie die Bereitstellung des Wasserstoffs, sind noch nicht überwunden. Es gibt aber in der Schweiz, wie auch weltweit, sehr konkrete Ansätze um diese Hindernisse, durch gezielte Investitionen, zu überwinden. Die Kundenakzeptanz zeigt sich in Umfragen positiv und die Wettbewerbsfähigkeit der FCV wird sich durch steigende Skaleneffekte und höhere Effizienz ergeben. Allgemein sind die Vorteile der Wasserstoffmobilität vielfältig.

Auch die Umwelt und Wettbewerbsbedingungen der Wasserstoffmobilität zeigen sich positiv. Die Eintrittsbarrieren können mit gezieltem Kapital überwunden werden. Die Akteure sind in der frühen Phase der Markteinführung voneinander abhängig, der Wettbewerb zwischen ihnen ist relativ gering. Es existieren verschiedene branchenübergreifende Allianzen zur gegenseitigen Unterstützung, um kostengünstig und schnell die Technologieentwicklung voranzutreiben. Die Auswirkungen von Substitutionsprodukten, die Verhandlungsstärke der Abnehmer und Lieferanten sind überschaubar.

Allgemein zeigt sich die Wasserstoffmobilität als ein interessanter Markt: Hohes Marktpotential, kaum existierende Marktsättigung und attraktive Umwelt- und Wettbewerbsbedingungen.

Bei einem potentiellen Markteintritt eines Unternehmens wird empfohlen, neben dem Erarbeiten eines Businessplans, die Entwicklung der wichtigsten kritischen Erfolgsfaktoren weiter genau zu beobachten. Hier geht es um die Wasserstoffinfrastruktur, die Wettbewerbsfähigkeit und die Kundenakzeptanz. Von grösster Bedeutung ist die Wasserstoffinfrastruktur, in die es zu investieren gilt und wodurch die anderen Erfolgsfaktoren positiv beeinflusst werden können.

## **8.3 8.3 Zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf**

---

Eine These, die in der fachspezifischen Lektüre gefunden wurde und auch in verschiedenen Expertengesprächen bestätigt wurde, sagt, dass das wichtigste Kriterium für eine Kaufentscheidung für das PW-Segment, die Investitionskosten sind. Die Sensitivität der Investitionskosten von FCV auf die Wasserstoffmobilität wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Diese Betrachtung könnte zu weiteren interessanten Erkenntnissen führen.

In der Sensitivitätsanalyse des Wasserstoff wurde keine bedeutende Änderung der Verkaufszahlen als Reaktion auf sinkende Preise erkannt. Der Wasserstoffpreis sollte aber ebenfalls einen Effekt auf die TCO haben, d.h. ein tieferer Preis sollte die Attraktivität für LKWs erhöhen. Diese These konnte in dieser Analyse aber nicht bekräftigt werden. Sie falsifiziert die Theorie aber auch nicht kategorisch, sondern legt eine weitere fokussierte Untersuchung dieser Frage nahe. Allgemein bietet das Simulation Tool ADOPT viele weitere Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten, die in dieser Arbeit nicht genutzt wurden und Potentiale für weitere Forschungen bieten. Ebenfalls wird eine neue Version des Programms erwartet, mit welcher auch andere Märkte als der US-Markt simulierbar sein werden.

Für den Markteintritt eines Unternehmens in die Wasserstoffmobilität, aber auch in andere Sektoren sind Businesspläne zu erstellen. In der Literatur sind bereits jetzt verschiedene Ansätze zu finden. Ein sich komplett neu entwickelnder Markt bedarf innovative Unternehmer und deren Businesspläne, um die in dieser Arbeit genannten Barrieren zu überwinden und den kritischen Erfolgsfaktoren zum Durchbruch zu verhelfen. Gelingt dies, eröffnet sich Investoren und Unternehmern ein nahezu grenzenloses Businesspotential in der zukünftigen Wasserstoffanwendung.

Die Möglichkeiten für Forschungen im neu entstehenden Wasserstoffmarkt sind zahllos und bieten enormes Potential für findige Lösungen und Konzepte.

## 9 Literaturverzeichnis

---

- Çabukoglu, E., Georges, G., & Küng, L. (2019). *Fuel cell electric vehicles: An option to decarbonize heavy-duty transport? Results from a Swiss case-study*. Zürich: Aerothermochemistry and Combustion Systems Laboratory, ETH Zurich.
- Adolf, J., Fishedick, M., & Arnold, K. (2017). *Shell Hydrogen Study, Energy of the Future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H2*. Hamburg: Shell Deutschland Oil GmbH & Wuppertal Institut.
- Amotech. (27. 03 2019). *Happy Birthday, Linie 12!* Von Amotech: <https://www.amotech.ch/de> abgerufen
- Andreasen, K., & Sovacool, B. (2014). *Mapping and interpreting critical hydrogen stakeholders in Denmark*. Herning, Denmark: Elsevier.
- AStG 641.51. (01. 01 2017). *Automobilsteuergesetz*. Von <https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19960321/index.html> abgerufen
- Aumayr, K. J. (2006). *Erfolgreiches Produktmanagement, Tool-Box für das professionelle Produktmanagement und Produktmarketing*. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler.
- Bach, C. (17. 05 2019). *Abteilungsleiter Fahrzeugantriebssysteme, EMPA*. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Bach, C. (10. 05 2019). *move*. Von Empa demonstriert die Mobilität der Zukunft, Empa: <https://www.empa.ch/de/web/move> abgerufen
- Bach, C., Brügger, M., & Cabalzar, U. (2017). *Schlussbericht: Future Mobility Demonstrator – Phase I*. Dübendorf: Empa, APT.
- BAFU. (21. 08 2018). *Das Übereinkommen von Paris*. Von Bundesamt für Umwelt: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klima-internationales/das-uebereinkommen-von-paris.html> abgerufen
- BAFU. (26. 05 2019). *CO2-Abgabe*. Von Bundesamt für Umwelt : <https://www.bafu.admin.ch/co2-abgabe> abgerufen
- BAFU. (27. 04 2019). *CO2-Emissionsvorschriften für Fahrzeuge*. Von Bundesamt für Umwelt: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klimapolitik/co2-emissionsvorschriften-fuer-personenwagen.html> abgerufen
- Ball, M., & Wietschel, M. (2009). *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*. New York, USA: Cambridge University Press.
- Banister, D. (2008). *The sustainable mobility paradigm*. Oxford: Oxford University Centre for the Environmen.
- Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cells (Second Edition)*. ScienceDirect: Elsevier B.V.
- Bauer, C. (08. 05 2019). *Researcher*, Paul Scherrer Institute. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Berekoven, L., Eckert, W., & Ellenrieder, P. (2009). *Marktforschung Methodische Grundlagen und praktische Anwendung*. Wiesbaden: Gabler, GWV Fachverlage GmbH.
- Berger, R. (2015). *Fuel Cell Electric Buses –Potential for Sustainable Public Transportin Europe*. München: The Fuel Cellsand Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).
- BFE. (2013). *Volkswirtschaftliche Bedeutung erneuerbarer Energien in der Schweiz*. Bern: Bundesamt für Energie.
- BFE. (2016). *Wasserstoffmobilität in der Schweiz «Positionspapier»*. Bern: Bundesamt für Energie .
- BFE. (2017). *CO2-Emissionsvorschriften für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge*. Bern: Bundesamt für Energie.

- BFE. (2018). *Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2017 nach Verwendungszwecken*. Bern: Bundesamt für Energie.
- BFE. (2018). *Swiss Hydrogen Production and Demand*. Bern: Swiss Federal Office of Energy.
- BFE. (2019). *Kantonale Motorfahrzeugsteuern: Rabatte für energieeffiziente Fahrzeuge*. Fehraltorf: Bundesamt für Energie.
- BfS. (29. 02 2019). *Fahrleistungen und Fahrzeugbewegungen im Personenverkehr*. Von Bundesamt für Statistik: <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.7546852.html> abgerufen
- BFS. (2019). *Neue Inverkehrsetzungen von Strassenfahrzeugen*, . Neuchâtel: Bundesamt für Statistik, Sektion Mobilität.
- BfS. (2019). *Strassenfahrzeugbestand* . Bern: Bundesamt für Statistik, Sektion Mobilität,.
- Bielmeier, T. (2016). *Wasserstoffmobilität – Marktentwicklungsaktivitäten Weltweit*. Graz/Austria: The Linde Group.
- Blessing, R., & Burgener, A. (2012). *17. Berichterstattung im Rahmen der Energieverordnung, über die Absenkung des spezifischen Treibstoff- Normverbrauchs von Personenwagen*. Bern: Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- BMU. (15. 05 2019). *Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO<sub>2</sub> - Emissionen von Personenkraftwagen* . Von bmu.de: [https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu\\_verordnung\\_co2\\_emissionen\\_pkw.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf) abgerufen
- Bormann, R., Fink, P., & Holzapfel, H. (2018). *Die Zukunft der Deutschen Automobilindustrie, Transformation by Disaster oder by Design?* Deutschland: Die Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Bosshardt, M. (2009). *Fleet dynamics identifying the main micro processes of technological change within the European passenger car fleet*. Zürich: ETH Zürich & Paul Scherrer Institut.
- Bosshardt, M. (18. 05 2019). Dr. sc. ETH. (R. Lüchinger, Interviewer)
- BP. (2005). *Energy.gov*. Von [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl11/hpwgw\\_bp\\_yoho.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/fl11/hpwgw_bp_yoho.pdf) abgerufen
- Brühne, T. (2009). *Erneuerbare Energien als Herausforderung für die Geographiedidaktik*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Brooker, A., Gonder, J., & Lopp, S. (2015). *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*. Detroit, Michigan: SAE Technical Paper.
- Brooker, A., Gonder, J., & Wang, L. (2015). *FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance*. USA: SAE International.
- Buchholz, L. (2009). *Strategisches Controlling, Grundlagen – Instrumente – Konzepte*. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH.
- Bureau, E. (07. 10 2018). *10'000 CNG stations to be set up in 10 years: Pradhan*. Von The Economic Times: <https://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/oil-gas/10000-cng-stations-to-be-set-up-in-10-years-pradhan/articleshow/65713474.cms> abgerufen
- CAFCP. (01. 05 2019). *FCEV Sales, FCEB, & Hydrogen Station Data*. Von California Fuel Cell Partnership: [https://cafcp.org/by\\_the\\_numbers](https://cafcp.org/by_the_numbers) abgerufen
- Chodakowska, A. (2018). *The Mobility Revolution in the Automobile Industry*. Kuopio, Finland: Savonia University of Applied Sciences.
- CNCDA. (2018). *California Auto Outlook, Comprehensive information on the California vehicle market*. California, USA: California New Car Dealers Association.

- Collantes, G., & Melaina, M. W. (2011). *The co-evolution of alternative fuel infrastructure and vehicles: A study of the experience of Argentina with compressed natural gas*. USA: Elsevier Ltd.
- Coop. (04. 11 2016). *Coop eröffnet erste öffentliche Wasserstofftankstelle der Schweiz*. Von Coop: <https://www.coop.ch/de/ueber-uns/medien/medienmitteilungen/2016/coop-eroeffnet-erste-oeffentliche-wasserstofftankstelle-der-schweiz.html> abgerufen
- Der Bundesrat. (28. 06 2018). *CO<sub>2</sub>-Emissionsvorschriften für neue Personenwagen – Bericht über die Auswirkungen 2012 – 2015*. Von Der Bundesrat: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-71335.html> abgerufen
- Der Bundesrat. (2018. 06 28). *Verbrauch von neuen Personenwagen lag 2017 bei 5.87 Liter pro 100 Kilometer*. Von Der Bundesrat: <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-71338.html> abgerufen
- Duden. (20. 04 2019). *Duden, Bibliographisches Institut GmbH*. Von "Analogie, die": <https://www.duden.de/rechtschreibung/Analogie> abgerufen
- EFD 641.612. (2017). *641.612 Verordnung des EFD vom 22. November 2013 über die Steuerbegünstigungen bei der Mineralölsteuer*. Bern: Der Bundesrat.
- Egli, P. (2017). *Strompreisprognose 2017*. Luzern: LPP Welten der Prognose 2017.
- EIA. (2013). *Annual Energy Outlook 2013*. Von U.S. Energy Information Administration: <http://www.eia.gov/oiaf/aeo/tablebrowser/> abgerufen
- EIA. (2018). *Annual Energy Outlook 2018*. Washington US: U.S. Energy Information Administration.
- EIA. (10. 05 2019). *Annual Energy Outlook 2019*. Von <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/data/browser/> abgerufen
- Ekins, P. (2010). *Hydrogen Energy, Economic and Social Challenges*. London: Earthscan.
- EPA. (2012). *2017 and Later Model Year Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emissions and Corporate Average Fuel Economy Standards: EPA Response to Comments*. Washington, D.C.: U.S. Office of Transportation and Air Quality.
- Erdöl-Vereinigung. (2018). *Jahresbericht 2017*. Zürich: Erdöl-Vereinigung.
- ETH Zürich. (2013). *Skript: Analyse und Beurteilung der Umweltverträglichkeit, Teil 2: Ökobilanzen*. Zürich: ETH Zürich, Studiengang Umweltnaturwissenschaften.
- Europa. (02. 05 2019). *National renewable energy action plans 2020*. Von European Commission: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/national-renewable-energy-action-plans-2020> abgerufen
- europarl. (04. 02 2009). *Auswirkungen der Finanzkrise auf die Automobilindustrie*. Von Europäisches Parlament: <http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=de&type=IM-PRESS&reference=20090203IPR48166> abgerufen
- European Commission. (2005). *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats in Energy Research*. Brussels: Directorate-General for Research Information and Communication Unit.
- ExxonMobil. (2018). *Energieprognose Deutschland 2018–2040*. Hamburg: ExxonMobil Central Europe Holding GmbH.
- EZV. (02. 05 2019). *LSVA - Allgemeines / Tarife*. Von Eidgenössische Zollverwaltung: <https://www.ezv.admin.ch/ezv/de/home/information-firmen/transport--reisedokument--strassenabgaben/schwerverkehrsabgaben--lsva-und-psva-/lsva---allgemeines---tarife.html> abgerufen

- Förderverein H2 Mobilität Schweiz. (07. 04 2019). *Förderverein H2 Mobilität Schweiz*. Von Elektro-Mobilität im geschlossenen Wasserkreislauf: <https://h2mobilitaet.ch/> abgerufen
- Factsheet Coop Esoro Truck. (2016). *The worlds's first fuel cell heavy goods vehicle able to fulfil Coop's logistics requirements*. H2 Energy & Coop.
- FCCJ. (21. 04 2015). *Fuel Cell Commercialization Conference of Japan*. Von About FCCJ: <http://www.fccj.jp/eng/index.html> abgerufen
- FCH JU. (10. 05 2019). *Project CHIC, FP7*. Von Clean Hydrogen In European Cities: <https://www.fch.europa.eu/project/clean-hydrogen-european-cities> abgerufen
- Financial Tribune*. (22. 05 2017). Von Bleak Future for CNG Hybrid Cars in Iran: <https://financialtribune.com/articles/auto/64969/bleak-future-for-cng-hybrid-cars-in-iran> abgerufen
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge: The MIT Press.
- Fröhlich, P. (07. 05 2019). Sales Manager, Celeroton AG. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Fraile, D., Torres, A., & Rangel, A. (2016). *Generic estimation scenarios of market penetration and demand forecast for "premium" green hydrogen in short, mid and long term*. Brussels: CertifHy & FCH.
- Gao, P., Hensley, R., & Zielke, A. (01. 10 2014). *A road map to the future for the auto industry*. Von McKinsey Quarterly: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/a-road-map-to-the-future-for-the-auto-industry> abgerufen
- Garcia, C. (2008). *Correlation between Transport Intensity and GDP in European Regions: A new Approach*. Monte Verità/Ascona: 8th Swiss Transport Research Conference.
- Gausemeier, J., Fink, A., & Schlake, O. (1998). *Scenario Management: An Approach to Develop Future Potentials*. New York: Elsevier Science Inc.
- Gnann, T., Kühn, A., & Plötz, P. (2017). *Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential*. Karlsruhe: Fraunhofer ISI & Fraunhofer IML.
- Going Electric. (01. 07 2013). *Brennstoffzelle erreicht Lebensdauer eines Diesels*. Von Going Electric, Elektroauto News: <https://www.goingelectric.de/2013/07/01/news/brennstoffzelle-lebensdauer-10000-stunden/> abgerufen
- Government of India. (06. 10 2016). *Sh Dharmendra Pradhan launches #Gas4India campaign to promote Natural gas in the country, Says the country will move towards gas based economy*. Von <http://pib.nic.in/newsite/PrintRelease.aspx?relid=149580> abgerufen
- H2 Energy. (26. 03 2019). *H2 Energy*. Von <https://h2energy.ch/> abgerufen
- H2 Energy. (15. 04 2019). *Hyundai und H2 Energy unterzeichnen Joint Venture-Vertrag*. Von H2 Energy: <https://h2energy.ch/hyundai-motor-und-h2-energy-unterzeichnen-joint-venture-vertrag-zur-fuehrung-in-der-wasserstoff-mobilitaet-in-europa/> abgerufen
- H2 Energy. (15. 05 2019). *Weltweit erster Wasserstoff-LKW mit Anhänger, der die LKW-Anforderungen für die Coop-Logistik erfüllen kann*. Von H2 Energy: [https://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet\\_Lastwagen\\_D.pdf](https://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf) abgerufen
- H2-Mobilität. (25. 03 2019). *Fördervereins H2-Mobilität Schweiz*. Von <https://h2mobilitaet.ch/> abgerufen
- Haefeli, D. (2016). *Schweizer Fahrzeugmarkt*. Niederglatt: Schweizer Fahrzeugmarkt.
- Hamacher, T. (2014). *Hydrogen and Fuel Cell, Hydrogen as a Strategic Secondary Energy Carrier*. London: Springer.
- Harrison, P., & Chucholowski, C. (2017). *Klimafreundliche Autos in Deutschland: Ein Überblick der sozioökonomischen Auswirkungen*. Berlin: European Climate Foundation.

- Hawkins, A. (12. 10 2017). *Toyota's hydrogen fuel cell trucks are now moving goods around the Port of LA*. Von The Verge: <https://www.theverge.com/2017/10/12/16461412/toyota-hydrogen-fuel-cell-truck-port-la> abgerufen
- Holdener, F. (28. 05 2019). Vice President HYDROPOLE. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Hoppe, M., & Michl, T. (2017). *Transforming the Swiss Mobility System towards sustainability*. Zürich: ZHAW, SCCER & CTI.
- Hydrogeit. (07. 10 2017). *Erster Wasserstoff-Truck auf der Straße*. Von HZwei-Heft: <https://www.hzwei.info/blog/2017/09/07/erster-wasserstoff-truck-auf-der-strasse/> abgerufen
- IAC Publishing. (02. 05 2019). *Reference*. Von What Is a Market Driver? : <https://www.reference.com/business-finance/market-driver-ae0e91a40aefffee> abgerufen
- IEA. (2018). *AFC TCP 2019 Survey on the Number of Fuel Cell Vehicles, Hydrogen Refueling Stations and Targets*. Paris: Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme.
- IEA. (26. 04 2019). *Renewables 2018, Market analysis and forecast from 2018 to 2023, Transport*. Von <https://www.iea.org/renewables2018/transport/> abgerufen
- IFCO. (08. 04 2019). *Iranian Fuel Conservation Company*. Von <http://ietd.iipnetwork.org/content/iranian-fuel-conservation-company> abgerufen
- ifeu. (2017). *Roadmap for an overhead catenary system for trucks: SWOT analysis*. Heidelberg / Karlsruhe: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- Ineichen, M. (2010). *Wissenschaftliche Arbeiten konstruieren und gliedern*. HSLU W, Horw.
- INFRAS. (2016). *Emissions scenarios without measures 1990-2030*. Bern: Federal Office for the Environment (FOEN).
- In-Soo Nam. (08. 12 2015). *South Korea Unveils Plan to Rev Up Sales of Greener Cars*. Von Dow Jones & Company: <https://www.wsj.com/articles/south-korea-unveils-plan-to-rev-up-sales-of-greener-cars-1449544974> abgerufen
- IPCC. (2014). *AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Janssen, A. (2005). *Modeling the market penetration of passenger cars with new drive-train technologies*. Zürich: ETH.
- JHFC. (02. 05 2019). *Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project*. Von About JHFC Project: <http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/e/index.html> abgerufen
- Jochem, E. (2004). *Steps towards a sustainable development; A White Book for R&D of energy-efficient technologies*. Zürich: ETH.
- Jochem, P., Pogonietz, W.-R., & Grunwald, A. (2013). *Alternative Antriebskonzepte bei sich wandelnden Mobilitätsstilen*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Köllner, C. (08. 11 2017). *Die EU-Vorschläge für schärfere CO2-Grenzwerte im Überblick*. Von Springer Professional: <https://www.springerprofessional.de/emissionen/mobilitaetskonzepte/die-eu-vorschlaege-fuer-schaerfere-co2-grenzwerte-im-ueberblick/15204248> abgerufen
- Khan, M. (2017). *Identifying and addressing barriers for the sustainable development of natural gas as automotive fuel*. Heriot Watt University, UK: Elsevier.
- Kirkwood, C. (1998). *System Dynamics Methods: A Quick Introduction*. Arizona, USA: Arizona State University.
- Kleinaltenkamp, M., & Kuß, A. (2011). *Marketing-Einführung, Grundlagen – Überblick – Beispiele*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

- Klell, M., Eichlseder, H., & Trattner, A. (2018). *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- KPMG. (2011). *Global Automotive Executive Survey 2011*. KPMG.
- KPMG. (2018). *Global Automotive Executive Survey 2018*. KPMG.
- Krause, H., Kühn, M., & Nitzsche, J. (2016). *Wirtschaftliche Bewertung der HYPOS-Wertschöpfungsketten zur Wasserstoffherzeugung im Kontext der verschiedenen Nutzungspfade – H2-Index*. Freiberg: DBI – Gastechnologisches Institut.
- Krempf, S. (11. 10 2017). *Niederlande: Ab 2030 sollen nur noch emissionsfreie Pkw auf die Straße*. Von Heise Online: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Niederlande-Ab-2030-sollen-nur-noch-emissionsfreie-Pkw-auf-die-Strasse-3858413.html> abgerufen
- Krieger, R. (2017). *Brennstoffzellenpostauto & Schweizer Wasserstofftankstelle*. Bern: PostAuto Fahrzeuge AG, Bundesamt für Energie.
- Kuhn, P., Kühne, M., & Heilek, C. (2014). *Wasserstoff und Brennstoffzelle, Technologien und Marktperspektiven*. Berlin: Springer Vieweg.
- Lee, D.-Y., Elgowainya, A., & Kotz, A. (2018). *Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks*. Washington, USA: Elsevier.
- Lemke, R. (2016). *Market Introduction of Hydrogen Fuel*. Berlin: Technischen Universität Berlin.
- Liddell, G., & Scott, R. (1940). *A Greek-English Lexicon*. Oxford: Clarendon Press.
- Linde. (15. 04 2019). *Leading industrial companies agree on an action plan for the construction of a hydrogen refuelling network in Germany*. Von The Linde Group: [https://www.the-linde-group.com/en/news\\_and\\_media/press\\_releases/news\\_20130930.html](https://www.the-linde-group.com/en/news_and_media/press_releases/news_20130930.html) abgerufen
- Lipman, T., Elke, M., & Lidicker, J. (2018). *Hydrogen fuel cell electric vehicle performance and user-response assessment: Results of an extended driver study*. California: Transportation Sustainability Research Center, University of California.
- ING World News. (21. 01 2015). *Italy largest European market for alternative fuel vehicles*. Von ING World News: <https://www.ingworldnews.com/italy-largest-european-market-for-alternative-fuel-vehicles/> abgerufen
- Müller-Syring, G. (2010). *Das Erdgasleitungsnetz als Katalysator für die Wasserstoffwirtschaft*. Leipzig: DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH .
- Manley, D., Clay, K., & Joseck, F. (2014). *Transitioning the Transportation sector: exploring the intersection of hydrogen Fuel cell and natural gas vehicles*. Washington DC, USA: American Gas Association.
- Marklines. (04. 01 2019). *Korea - Flash report, Sales volume, 2018*. Von Marklines: [https://www.marklines.com/en/statistics/flash\\_sales/salesfig\\_korea\\_2018](https://www.marklines.com/en/statistics/flash_sales/salesfig_korea_2018) abgerufen
- Matsunaga, M., Fukushima, T., & Ojima, K. (2009). *Powertrain System of Honda FCX Clarity Fuel Cell Vehicle*. Stavanger, Norway: World Electric Vehicle Journal Vol. 3.
- McKinsey & Company. (2011). *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis*. European: FCH JU.
- McKinsey. (2016). *Automotive revolution – perspective towards 2030*. Advanced Industries, McKinsey & Company .
- McPhail, S., Kiviahio, J., & Conti, B. (2013). *The Yellow Pages of SOFC Technology*. Rome: IEA.
- Mehta, R. (2002). *History, politics and technology of cng – diesel bus switch in delhi*. Delhi: Delhi Transport Corporation .
- Meier, M. (2018). *The techno-economic assessment of district modernisation measures: A case study in Switzerland*. Horw: Lucerne University of Applied Sciences and Arts – T&A.

- National Development and Reform Commission P.R.C. (2016). *3th Five-Year Plan for Natural Gas Development*. Beijing: People's Republic of China for the Economic and Social Development.
- NGV Globa. (18. 12 2015). *Iran Update: An Invigorated NGV Market*. Von <https://www.ngvglobal.com/blog/iran-update-an-invigorated-ngv-market-1218> abgerufen
- Nilsson, M., Hillman, K., & Rickne, A. (2012). *Paving the Road to Sustainable Transport Governance and innovation in low-carbon vehicles*. London: Routledge.
- NZZ. (20. 09 2018). *Hyundai bringt 1000 Wasserstoff-Lkw in die Schweiz*. Von NZZ: <https://www.nzz.ch/mobilitaet/auto-mobil/hyundai-bringt-1000-wasserstoff-lkw-in-die-schweiz-ld.1421569> abgerufen
- Oberholzer, S. (24. 05 2019). Head PV & CSP / Fuel Cell & Hydrogen Research SFOE, BFE. (R. Lüchinger, Interviewer)
- OECD/IEA. (2015). *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*. Paris: International Energy Agency.
- OECD/ITF. (2017). *ITF Transport Outlook 2017*. Paris: OECD Publishing.
- Porter, M. (1979). *How Competitive Forces Shape Strategy*. Boston, USA: Harvard Business Review.
- Pratap, A. (09. 03 2018). *Notesmatic*. Von <https://notesmatic.com/2016/09/automotive-industry-pestel/> abgerufen
- Räz, N. (26. 04 2019). *Wasserstoff- oder Brennstoffzellenfahrzeuge – Teuer aber interessant*. Von Autoscout24: <https://www.autoscout24.ch/de/c/d/information/wasserstoff-oder-brennstoffzellenfahrzeuge-teuer-aber-interessant?a=25437#hydro-options> abgerufen
- Rashid, M. H. (2018). *Power Electronics Handbook*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Reich, K. (2010). *Szenario - Methode*. Köln: Methodenpool Uni Köln.
- Reuters. (05. 03 2018). *Japan venture aims to build 80 hydrogen fuelling stations by 2022*. Von Reuters: <https://www.reuters.com/article/us-japan-hydrogen-idUSKBN1GH072> abgerufen
- Ricker, C. (12. 02 2018). *The United States is projected to become a net energy exporter in most AEO2018 cases*. Von <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34912> abgerufen
- Romsom, E. (29. 10 2017). *Seeding a Hydrogen Market using learnings from LNG as fuel*. Von EnergyCC: <http://energycc.com/blogs/seeding-a-hydrogen-market-using-learnings-from-lng-as-fuel.html> abgerufen
- Schade, W., Zanker, C., & Kühn, A. (2012). *Zukunft der Automobilindustrie*. TBA.
- Schaumann, G. S. (2010). *Kraft-Wärme-Kopplung*. Berlin: Springer.
- Schmidtchen, U., & Wurster, R. (2014). *Hydrogen and Fuel Cell, Safe Use of Hydrogen*. Berlin: Springer-Verlag.
- Seeberger, M. (2016). *Der Wandel in der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität – Veränderungen und neue Wertschöpfungspotenziale für Automobilhersteller*. St. Gallen: Universität St. Gallen.
- Shell. (18. 01 2018). *Weltgrösste Wasserstoff- Elektrolyse entsteht in der Rheinland Raffinerie*. Von <https://www.shell.de/medien/shell-presseinformationen/2018/weltweit-groe%C3%9Fte-wasserstoff-elektrolyse-anlage-rheinland.html> abgerufen
- Singh, K. (19. 03 2019). *Pathways for Developing a Natural Gas Vehicle Market*. Von Center for Strategic and International Studies: <https://www.csis.org/analysis/pathways-developing-natural-gas-vehicle-market> abgerufen

- Spiegel. (16. 08 2016). *Norwegen will Benzin- und Dieselaautos verbieten*. Von Spiegel Online: <https://www.spiegel.de/auto/aktuell/norwegen-will-autos-mit-benzin-oder-dieselmotor-verbieten-a-1107885.html> abgerufen
- State of California. (27. 10 2014). *Zero-Emission Vehicle Legal and Regulatory Activities and Background*. Von California Air Resources Board: <http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/zevregs/zevregs.htm> abgerufen
- Statista. (26. 03 2019). *Statista*. Von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12108/umfrage/top-unternehmen-der-welt-nach-marktwert/> abgerufen
- Steger, U. (2004). *The business of Sustainability: Building industry cases for corporate sustainability*. New York: Houndsmill.
- Stolten, D., Grube, T., & Mergel, J. (2012). *Beitrag elektrochemischer Energietechnik zur Energiewende*. Jülich: Forschungszentrum Julich GmbH.
- Swissgas. (26. 03 2019). *Swissgas Netzkarte*. Von <http://www.swissgas.ch/netzkarte.html> abgerufen
- Töpler, J., & Lehmann, J. (2016). *Hydrogen and Fuel Cell, Technologies and Market Perspectives*. London: Springer-Verlag.
- TCEQ. (27. 03 2019). *Texas Commission on Environmental Quality*. Von <https://www.tceq.texas.gov/airquality/terp> abgerufen
- TCS. (2018). *Motorfahrzeugsteuer in der Schweiz*. Emmen: TCS Mobilitätsberatung.
- Tesla. (02. 05 2019). *Future of Driving*. Von Tesla: [https://www.tesla.com/autopilot?utm\\_campaign=GL\\_AP\\_101916&utm=](https://www.tesla.com/autopilot?utm_campaign=GL_AP_101916&utm=) abgerufen
- Toyota. (13. 01 2011). *13 Japanese Companies Eye Smooth Domestic Launch of FCVs*. Von Toyota Motor Corporation: <http://www2.toyota.co.jp/en/news/11/01/0113.html> abgerufen
- Transportation.gov. (27. 08 2014). *Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards*. Von U.S. Department of Transportation: <https://www.transportation.gov/mission/sustainability/corporate-average-fuel-economy-cafe-standards> abgerufen
- Tremel, A. (2018). *Electricity-based Fuels*. Cham, Switzerland: SpringerBriefs.
- UBA. (2016). *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Öko-Institut e.V.
- Ulli-Beer, S. (2004). *A System Dynamics Model for Recycling Management at the Local Level*. St. Gallen: Universität St. Gallen, Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwissenschaften.
- Ulli-Beer, S., Bosshardt, M., & Wokaun, A. (2011). *Transition To Hydrogen, Pathways Toward Clean Transportation*. Switzerland: Paul Scherrer Institute.
- Utermohlen, K. (28. 03 2018). *The Future of Technology in the Automotive Industry*. Von Towards Data Science: <https://towardsdatascience.com/the-future-of-technology-in-the-automotive-industry-11081c8a1999> abgerufen
- UVEK. (2017). *Faktenblatt «Energieversorgung der Schweiz und internationale Entwicklung»*. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- Vester, F. (1999). *Die Kunst Vernetzt zu Denken*. München: Deutsche Verlagsanstalt GmbH.
- Vock, H. (07. 05 2019). Expertengespräch. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Wüest, E. (10. 05 2019). Projektleiterin Fahrzeugtechnik, PostAuto. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., & Olschewski, I. (2009). *Strategien in der Automobilindustrie, Technologietrends und Marktentwicklungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

- Wanga, H., Fanga, H., & Yua, X. (2015). *Development of natural gas vehicles in China: An assessment of enabling factors and barriers*. Beijing: Elsevier Ltd.
- Weiland, A. (2012). *Stakeholder-Analyse*. Baden-Baden: ZFO.
- Werfeli, A. (13. 05 2019). Verantwortlicher für Aus- und Weiterbildung, Verband der Schweizerischen Gasindustrie. (R. Lüchinger, Interviewer)
- Wilkinson, L. (2005). *The Grammar of Graphics*. New York, USA: Springer.
- Winkler, P. (01. 06 2017). *Trump kündigt Pariser Klimaabkommen auf*. Von NZZ: <https://www.nzz.ch/international/umweltpolitik-der-usa-trump-kuendigt-pariser-klimaabkommen-auf-ld.1298900> abgerufen
- Wokaun, A., & Wilhelm, E. (2011). *Transition To Hydrogen, Pathways Toward Clean Transportation*. Paul Scherrer Institute, Schweiz: Cambridge University Press.
- Złoty, P. (17. 03 2015). *Natural gas as motor fuel in Italy*. Von Gazeo: <https://gazeo.com/up-to-date/reportages-interviews-road-tests/reportages-and-interviews/Natural-gas-as-motor-fuel-in-Italy,report,8470.html> abgerufen
- Zeit. (06. 06 2017). *Frankreich will bis 2040 weg vom Verbrennungsmotor*. Von Zeit Online: <https://www.zeit.de/politik/ausland/2017-07/frankreich-diesel-benzin-autos-verbot-nicolas-hulot> abgerufen
- Zohuri, B. (2019). *Hydrogen Energy, Challenges and Solutions for a Cleaner Future*. Albuquerque, USA: Springer.

## 10 Anhang

### Anhang A. Marktkennzahlen Schweiz

Für die Bestimmung der Marktkennzahlen des Wasserstoffmarkts Schweiz werden die Marktsektoren Mobilität, Wärme, Industrie und Strom jeweils einzeln betrachtet und anschliessend zusammengefasst.

In der Tabelle A-I ist die Marktkapazität der Mobilität Schweiz dargestellt, einmal aufgegliedert, wie oben beschrieben, nach Verwendungsart (in PJ) und ein weiteres Mal aufgeteilt nach Verkehrsträgern (in PJ). Diese Angaben basieren auf Auswertungen der letzten 17 Jahre vom Bundesamt für Energie BFE (BFE, 2018). Ausgehend von diesen Verbrauchswerten in PJ, wurde mit einem Wirkungsgrad der Brennstoffzelle von 40% und dem LHV von Wasserstoff (0.0012 TJ/kg) (Eigene Annahmen) die benötigte Menge Wasserstoff (in Tonnen) ermittelt, um den gesamten Energieverbrauch zu berechnen, welcher benötigt wird, um die Mobilität mit Wasserstoff zu versorgen. Entsprechend dieser Berechnung wären im Jahr 2017 rund 4'920'000 Tonnen Wasserstoff benötigt worden. Die gleiche Berechnung kann für die Sektoren «Wärme» (rund 3 Mio. Tonnen H<sub>2</sub>/a) und «Elektrizität» (rund 3'5 Mio. Tonnen H<sub>2</sub>/a) in der Tabelle A-III gefunden werden. Die detaillierten Werte für den Sektor «Industrie» (Total 12'950 Tonnen H<sub>2</sub>/a) sind bekannt und können in (BFE, 2018) nachgelesen werden.

Ausgehend von der Marktkapazität der Mobilität und dem Marktvolumen kann die Marktsättigung bestimmt werden. Gemäss (BFE, 2018) entspricht des Marktvolumen Wasserstoffmobilität Schweiz 0% (Stand 2018). Der Fakt, dass es in der Schweiz z.Zt. zwei HRS gibt und gemäss (Vock, 2019) aber mindestens 50 wasserstoffbetriebene Personenfahrzeuge und ein wasserstoffbetriebener LWK im Einsatz sind, zeigt, dass diese nicht berücksichtigt wurden. Auf Rückfrage bestätigte das BFE, dass die verbrauchte Menge Wasserstoff zu gering war für eine Erfassung in der Studie und ausgeschlossen wurde (Oberholzer, 2019). Die eigene Berechnungen sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Tabelle Anhang A - I: Marktpotential Wasserstoff

Marktpotential Wasserstoffmobilität Schweiz 2017		
Marktkapazität	t H <sub>2</sub> /a	4'918'750
Marktvolumen (Menge)	t H <sub>2</sub> /a	12'950
Wasserstoffpreis	CHF/kg	11
Marktkapazität	Mia. CHF/a	125
Marktvolumen (Preis)	CHF/a	142'450
Marktsättigung	%	0.263%

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BFE, 2018).

Tabelle Anhang A - II: Potential der Mobilität

Mobilität	2000	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Δ '00 – '17
<b>Verwendungsart [PJ]</b>									
Güter	37.5	40.0	40.0	40.4	40.5	40.6	40.8	41.8	10%
Personen	166.9	171.9	172.5	173.1	173.0	173.2	173.7	174.1	4%
undifferenziert	20.1	19.9	20.1	20.1	20.2	20.1	20.2	20.2	1%
<b>Total</b>	<b>224.5</b>	<b>231.8</b>	<b>232.6</b>	<b>233.6</b>	<b>233.7</b>	<b>233.9</b>	<b>234.7</b>	<b>236.1</b>	<b>5%</b>
<b>Verkehrsträger [PJ]</b>									
Luft	4.3	3.2	3.4	3.4	3.4	3.6	3.6	3.8	-17%
Schine	9.7	11.1	11.2	11.4	11.2	11.1	11.5	11.7	20.20%
Strasse	194.7	200.8	201.3	202.1	202.4	202.5	202.9	203.9	5%
Wasser	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	0%
übrige	14.2	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	6%
<b>Total</b>	<b>224.5</b>	<b>231.8</b>	<b>232.6</b>	<b>233.6</b>	<b>233.7</b>	<b>233.9</b>	<b>234.7</b>	<b>236.1</b>	<b>5%</b>
<b>Menge in Wasserstoff</b>									
<b>Tonnen Wasserstoff</b>	<b>4'677'083</b>	<b>4'829'167</b>	<b>4'845'833</b>	<b>4'866'667</b>	<b>4'868'750</b>	<b>4'872'917</b>	<b>4'889'583</b>	<b>4'918'750</b>	<b>5%</b>
* LHV Wasserstoff [TJ/kg]	0.00012								
* Wirkungsgrad BZ	40%								

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BFE, 2018).

Tabelle Anhang A - III: Potential der Wärme und Strom

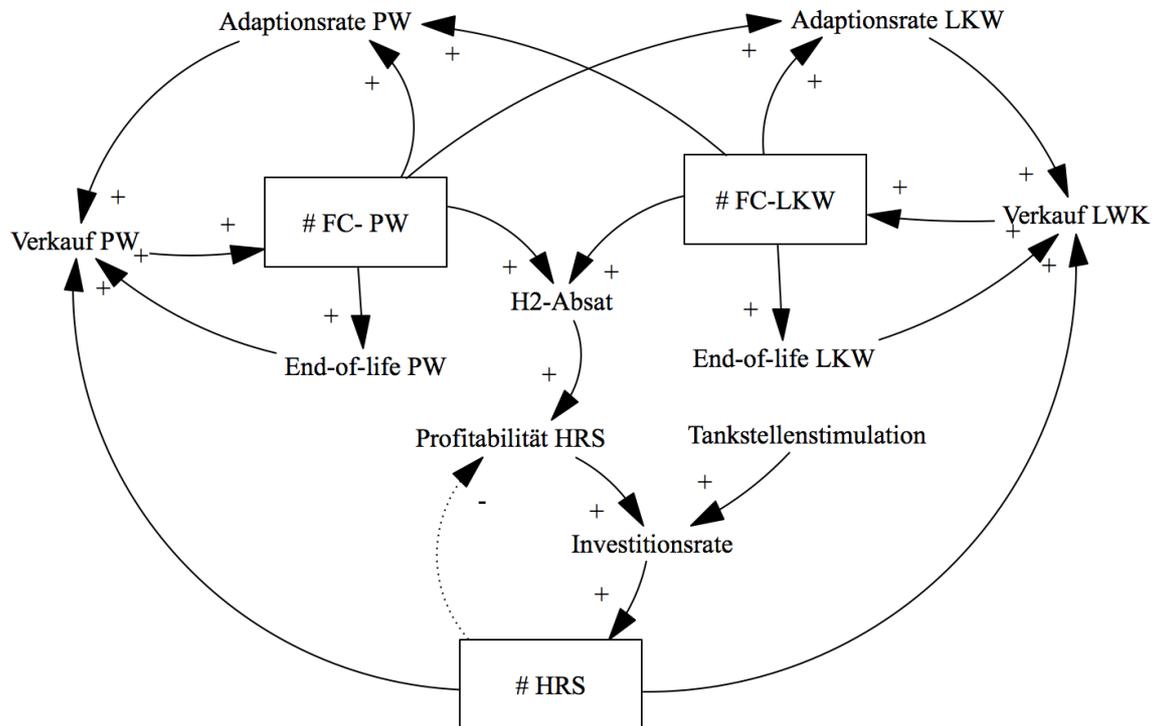
<b>Wärme [PJ]</b>	<b>2000</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>Δ '00 – '17</b>
Raumwärme	262.3	226.6	255.3	280.3	209.9	232	248.4	239.2	-8.8%
Warmwasse	46.5	45.2	45.7	46.2	44.7	45.3	46	45.8	-1.4%
<b>Total</b>	<b>308.8</b>	<b>271.8</b>	<b>301.0</b>	<b>326.5</b>	<b>254.6</b>	<b>277.3</b>	<b>294.4</b>	<b>285.0</b>	<b>-7.7%</b>
<b>Menge in Wasserstoff</b>									
<b>Tonnen Wasserstoff</b>	<b>3'216'667</b>	<b>2'831'250</b>	<b>3'135'417</b>	<b>3'401'042</b>	<b>2'652'083</b>	<b>2'888'542</b>	<b>3'066'667</b>	<b>2'968'750</b>	<b>-7.7%</b>
<i>LHV Wasserstoff [TJ/kg]</i>	<i>0.00012</i>								
<i>Wirkungsgrad</i>	<i>80%</i>								
<b>Elektrizitätsverbrauch [PJ]</b>									
Prozesswärme	29.6	30	29.5	29.7	29.9	29.1	28.6	29.4	-1.0%
Beleuchtung	25	26.5	26	25.8	25.6	25.3	25.4	25.3	1.3%
Klima, Lüftung & HT	17.9	19.3	20.2	21.1	18.8	21.4	21.2	21.8	21.6%
I&K, Unterhaltung	8.8	10.6	10.6	10.5	10.3	10.1	10	9.9	12.6%
Antriebe, Prozesse	65.5	70.6	69.9	69.7	69.4	68.1	67.2	68.1	4.0%
Sonstige	8.2	11.3	11.7	11.9	12	12.4	12.6	12.7	55.1%
<b>Total</b>	<b>155</b>	<b>168.3</b>	<b>167.9</b>	<b>168.7</b>	<b>166</b>	<b>166.4</b>	<b>165</b>	<b>167.2</b>	<b>7.9%</b>
<b>Menge in Wasserstoff</b>									
<b>Tonnen Wasserstoff</b>	<b>3'229'167</b>	<b>3'506'250</b>	<b>3'497'917</b>	<b>3'514'583</b>	<b>3'458'333</b>	<b>3'466'667</b>	<b>3'437'500</b>	<b>3'483'333</b>	<b>7.9%</b>
<i>LHV Wasserstoff [TJ/kg]</i>	<i>0.00012</i>								
<i>Wirkungsgrad BZ</i>	<i>40%</i>								

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (BFE, 2018).

**Anhang B. Sammlung von weiteren Marktbarrieren**

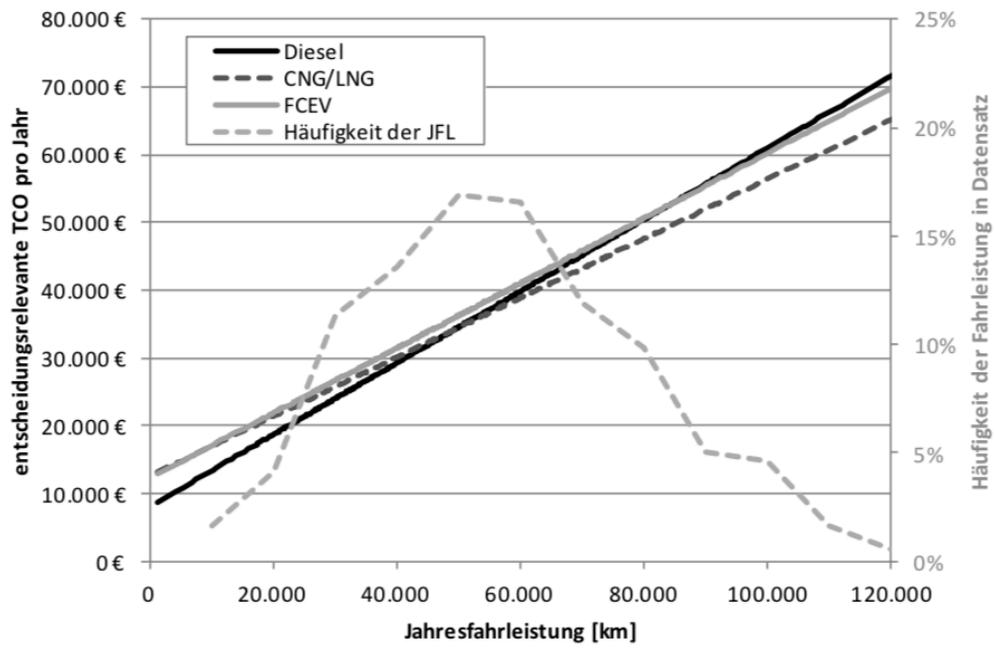
- i. Technische oder kommerzielle Hindernisse, die Marktverfügbarkeit und die kommerzielle Machbarkeit einschränkend.
- ii. Unsicherheit in der relativen Kraftstoffpreisentwicklung zwischen neuen und bestehenden Kraftstoffen.
- iii. Unsicherheit bei den Amortisationszeiten und das Risiko zu früh in die Anlage oder das Fahrzeug zu investieren.
- iv. Finanzielle Barrieren, zu denen zusätzliche Kosten für die Verbraucher, Kapital- und Betriebskosten für die Investoren und Ressourcenengpässe bei den öffentlichen Hand gehören.
- v. Informationsbezogene Barrieren für private Investitionen.
- vi. Etablierte Unternehmen, schützen die bestehenden Positionen für die Kraftstoffversorgung und -verteilung.
- vii. Barrieren für private Investitionen in FCVs und Betankungsinfrastruktur.
- viii. Kommerzielles Risiko, an einen einzelnen oder wenige Lieferanten gebunden zu sein und eines noch nicht kommerzialisierten Marktes für den neuen Kraftstoff.
- ix. «Early Adopters» werden durch höhere Anfangskapital- und Betriebskosten aufgrund fehlender Skaleneffekte und noch nicht eingetretener Lernkurveneffekte bestraft.
- x. Fehlende Infrastruktur, die geografische Reichweite einschränkend, um den Markt zu bedienen.
- xi. Informationsbezogene Barrieren für Käufer und Betreiber von Infrastrukturen.
- xii. Vom Kunden wahrgenommene Technologie- und Betriebsleistungsrisiken.
- xiii. Das Fehlen von Normen und Standards schafft technische und wirtschaftliche Unsicherheit entlang der Wertschöpfungskette.
- xiv. Regelungslücken führen zu Unsicherheit über Sicherheits- und Umweltstandards.
- xv. Institutionelle und administrative Barrieren.
- xvi. Akzeptanz in der Öffentlichkeit.
- xvii. Rechtliche oder regulatorische Barrieren.
- xviii. Rechtliche und regulatorische Barrieren für private Investitionen.
- xix. Koordinationsfehler in komplementären Märkten.

### Anhang C. CLD mit Aufteilung zwischen PW und LKW



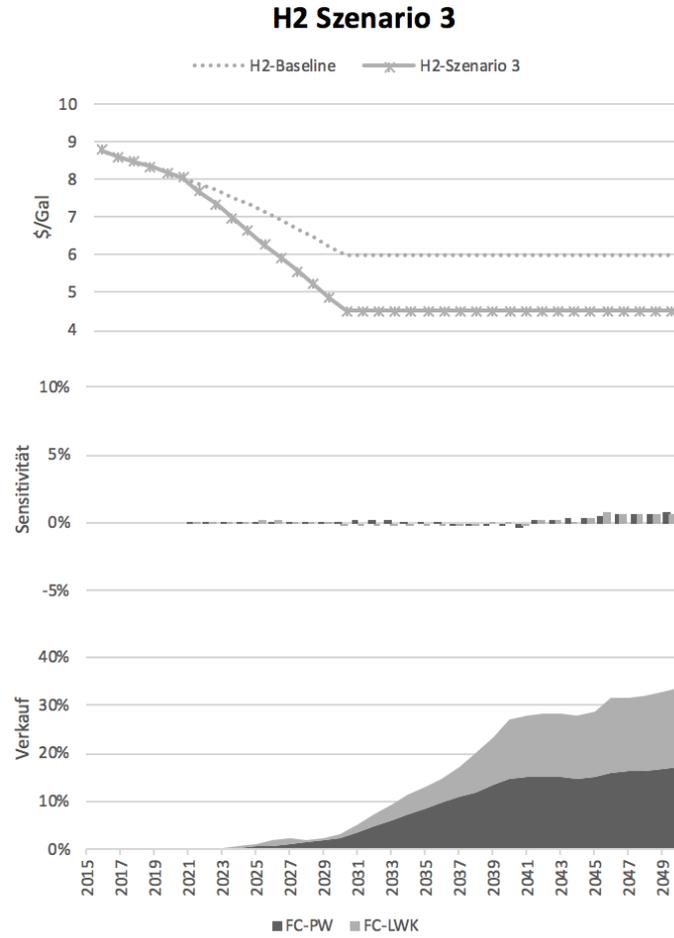
\*Darstellung ohne Loop 4, dieser ist jeweils an Verkauf PW und Verkauf LKW anzusetzen.

Quelle: Eigene Darstellung

**Anhang D. TCO-Modelergebnis des Jahr 2030**

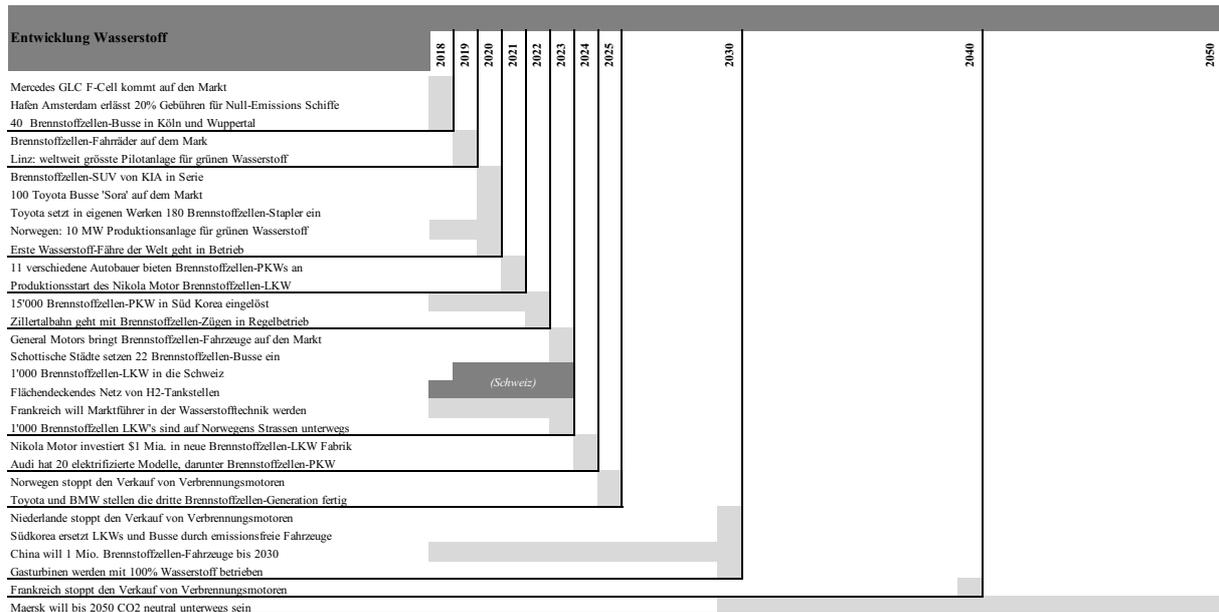
Quelle: (Gnann, Kühn, & Plötz, 2017)

## Anhang E. Szenario 3 Wasserstoffpreis



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (Brooker, Gonder, & Lopp, *ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model*, 2015)

## Anhang F. Entwicklung des Wasserstoffmarkts weltweit



Quelle: Eigene Darstellung, in Anlehnung an (H2 Energy, 2019)

## Anhang G. Prognose der Technischen Entwicklung

Technology Improvements	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	(...)	2050
batteryPriceDolPerKwh	416	409.26	402.52	395.78	389.04	382.3	375.56	368.82	362.08	355.34	348.6	(...)	247.5
motorPriceDolPerKw	28.5	26.4	26.175	25.95	25.725	25.5	22.8	20.1	17.4	14.7	12	(...)	6
siPeakEff	0.36	0.362	0.368	0.372	0.376	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	(...)	0.43
ciPeakEff	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	(...)	0.48
atkinsonPeakEff	0.38	0.382	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	(...)	0.42
fuelCellPriceDolPerKw	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	(...)	45
h2StorageUsablePriceDolPerKg	1668	1617.44	1566.88	1516.32	1465.76	1415.2	1364.64	1314.08	1263.52	1212.96	1162.4	(...)	404
fuelCellPeakEff	0.59	0.592	0.6	0.6	0.6	0.6	0.604	0.608	0.612	0.616	0.62	(...)	0.7
h2StorageUsableKgPerLiter	0.024	0.0258	0.0276	0.0294	0.0312	0.033	0.0342	0.0354	0.0366	0.0378	0.039	(...)	0.069
cnglcePeakEff	0.36	0.366	0.394	0.396	0.398	0.4	0.402	0.404	0.406	0.408	0.41	(...)	0.44667
cngStorageUsablePriceDolPerKwh	15.15	15.15	15.15	15.15	15.15	15.15	15.093	15.036	14.979	14.922	14.865	(...)	8.73
cngStorageUsableKwhPerLiter	1.74	1.768	1.796	1.824	1.852	1.88	1.884	1.888	1.892	1.896	1.9	(...)	2.7
motorWPerKg	1080	1098	1125	1125	1125	1125	1188	1251	1314	1377	1440	(...)	2000
batteryWPerKg	2000	2000	2750	2750	2750	2750	2800	2850	2900	2950	3000	(...)	5000
batteryUsableWhPerKg	90	100	100.0833	100.1667	100.25	100.3333	100.4167	100.5	100.5833	100.6667	100.75	(...)	115
cngStorageUsableKwhPerKg	4.21	4.224	4.238	4.252	4.266	4.28	4.316	4.352	4.388	4.424	4.46	(...)	4.752
h2StorageUsableKwhPerKg	1.3	1.38	1.58	1.58	1.58	1.58	1.59	1.6	1.61	1.62	1.63	(...)	2.71
fuelCellWPerKg	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	(...)	870
batteryPriceDolPerKw	45	41	30	30	30	30	28.8	27.6	26.4	25.2	24	(...)	19.5
batteryPhev10UsableWhPerKg	40	42	54	56	58	60	64	68	72	76	80	(...)	115
batteryPhev40UsableWhPerKg	55	57	64	66	68	70	75	80	85	90	95	(...)	115
batteryBevUsableWhPerKg	130	130	158	162	166	170	170	170	170	170	170	(...)	280
gliderMassReductionFrac	0	0.012	0.024	0.036	0.048	0.06	0.064	0.068	0.072	0.076	0.08	(...)	0.19
gliderMassRedDolPerKgSaved	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	(...)	9.9
cngEnginePriceDolPerKw	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	(...)	100
siEnginePriceDolPerKw	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	(...)	45
fuelConverterWPerLiter	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	(...)	3100
fuelConvKgPerKw	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	(...)	0.47
fuelConvBaseKg	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	(...)	61
batterykwhPerLiter	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	0.20278	(...)	0.20278

Quelle: (Brooker, Gonder, & Lopp, ADOPT: A Historically Validated Light Duty Vehicle Consumer Choice Model, 2015)

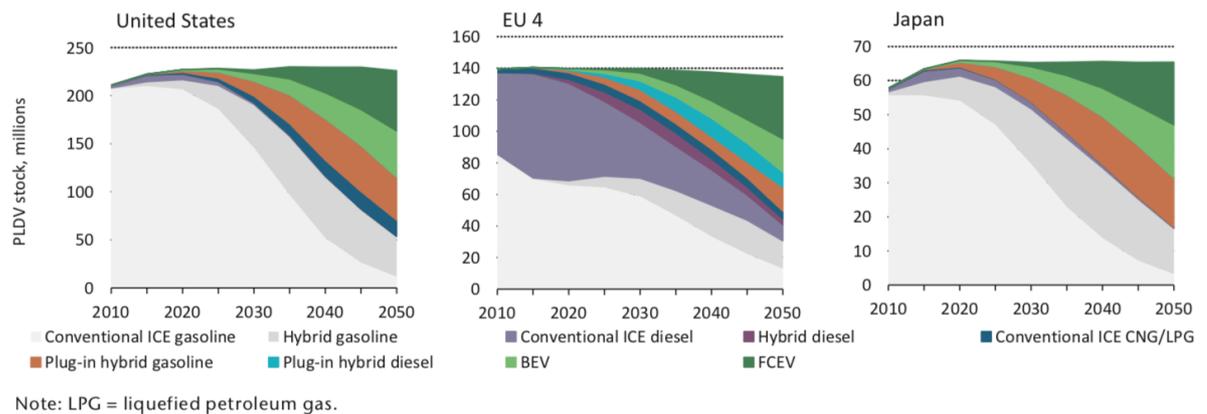
## Anhang H. Stakeholderbewertung

Stakeholderanalyse Wasserstoffmobilität		Unterstützung Einfluss		Unterstützung					Einfluss			Aktuelle Situation = X // Erwünschte Situation = E						
		5	4	3	2	1	hoch	mässig	gering	Bewusstsein	Verständnis	Zusammenarbeit	Verpflichtung	Befürwortung				
Treibstoff	Produktion	Erneuerbare Energie	4	3	x				x				x					
	Logistik & Speicherung	Fossile Energie	4	3	x				x					x				e
		Transportnetzwerk	4	3	x				x					x				e
		Betankungsanlagen	4	3	x				x					x				e
Fahrzeuge Antriebssystem	Fahrzeugproduktion	3	3		x			x			x							e
	Import	3	2		x				x		x							e
	EE-Konkurrenz	2	1			x					x	x		e				
	FE-Konkurrenz	1	1				x				x	x			e			
Branche	Branchenverband	5	3	x				x							x			e
	Unternehmen	5	3	x				x						x	x			e
Staat	Staat	4	2	x						x			x					e
Kunde	Kunde	3	3		x			x			x							e
Forschung	Forschung	2	2	x					x						x			e

Gemäss (Bach, 2019)

## Anhang I. Szenario “Technology Roadmap - Hydrogen and Fuel Cells”

Figure 13: PLDV stock by technology for the United States, EU 4 and Japan in the 2DS high H<sub>2</sub>



Quelle: (OECD/IEA, 2015).

## Anhang J. Cross-Impact-Analyse Auswertung

Cross-Impact-Analyse Wasserstoffmobilität Schweiz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	#H2-Fahrzeuge	#H2-Tankstellen	Adaptionsrate	End-of-Life	Fahrzeugpreis	H2-Absatzmenge	H2-Preis	Investition	Profitabilität Tankstelle	Subventionen Fahrzeug	Subventionen H2	Tankstellenstimulation	Verkauf	Attraktivität BEV	Attraktivität FCV	Attraktivität ICE	Co2-Abgaben	F&E FCV	Ölpreis	Politische Restriktionen	Aktiv Summe
1 #H2-Fahrzeuge	■		2	1		2															5
2 #H2-Tankstellen		■				2															4
3 Adaptionsrate			■										2								2
4 End-of-Life				■									1								1
5 Fahrzeugpreis					■								3								3
6 H2-Absatzmenge						■		2													2
7 H2-Preis							■						1								1
8 Investition		2						■													2
9 Profitabilität Tankstelle									■												0
10 Subventionen Fahrzeug					3					■											3
11 Subventionen H2							1				■										1
12 Tankstellenstimulation								2				■									2
13 Verkauf	2			1									■								3
14 Attraktivität BEV														■	2	2					4
15 Attraktivität FCV													2	2	■	2					6
16 Attraktivität ICE													2	2	2	■					4
17 Co2-Abgaben													1	1	1		■				3
18 F&E FCV					1		1								1			■			3
19 Ölpreis																1			■		1
20 Politische Restriktionen																2				■	2
<b>Passive Summe</b>	2	2	2	2	4	4	2	2	2	0	0	0	11	5	6	8	0	0	0	0	

Quelle: Analyse durchgeführt mit (Bauer, 2019) (Wüest, 2019) & (Vock, 2019)

