

# Wasserstoffantriebe in Kraftfahrzeugen als langfristige Lösungsalternative gegen Emissionen

## Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M. Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinen-  
bau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Birjukow



Vorname: Kevin



Prüfer:

Prof. Dr. Michael H. Breitner

Hannover, den 15. April 2020

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis .....	VII
Abstract .....	X
1. Einleitung .....	1
1.1. Motivation und Relevanz der Thematik.....	1
1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	2
2. Auswirkungen der globalen Entwicklungstendenzen .....	4
2.1. Entwicklung der Weltbevölkerung.....	4
2.2. Rückgang der natürlichen Ressourcen .....	8
2.3. Fahrzeugemissionen .....	9
2.4. Industrialisierung und Globalisierung .....	14
3. Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff in Kraftfahrzeugen.....	16
3.1. Aufbau und Funktionsweise von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen.....	19
3.1.1. Wasserstoff.....	19
3.1.1.1. Herstellung .....	19
3.1.1.2. Speicherung und Transport .....	22
3.1.2. Wasserstoffbasierte Antriebskonzepte .....	25
3.1.2.1. Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV).....	25
3.1.2.2. H <sub>2</sub> -Verbrennungsmotor .....	32
Exkurs: Kraftwärmekopplung in Blockheizkraftwerken (BHKW) .....	35
3.1.2.3. Brennstoffzellen Range Extender Fahrzeuge (FCREEV).....	36
3.2. Vergleich der wasserstoffbasierten Antriebskonzepte mit den konventionellen Verbrennungsmotoren .....	38
3.3. Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland, Europa und Weltweit .....	44
3.4. Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff .....	50
3.5. Internationale und nationale Wasserstoffstrategien .....	51
3.5.1. Europäische Wasserstoffstrategie .....	52
3.5.2. Deutsche Wasserstoffstrategie .....	53
4. Alternative Antriebskonzepte und Kraftstoffe .....	55

4.1.	Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV).....	55
4.1.1.	Aufbau und Funktionsweise.....	56
4.1.2.	Potentiale und Herausforderungen.....	58
4.1.3.	Kosten.....	61
4.2.	Elektrische Hybridfahrzeuge (HEV).....	63
4.2.1.	Hybridisierungsgrad.....	63
4.2.2.	Antriebssysteme.....	63
4.2.3.	Vor- und Nachteile.....	64
4.3.	Erd- (CNG/LNG) und Flüssiggas (LPG).....	65
4.4.	Biokraftstoffe.....	67
4.4.1.	Biogas.....	67
4.4.2.	Biodiesel.....	68
4.4.3.	Bioethanol.....	69
4.4.4.	Biomass-to-Liquide-Kraftstoffe (BtL).....	70
4.5.	Solar Electric Vehicle (SEV).....	70
4.6.	Vergleich der vorgestellten Antriebskonzepte mit den Wasserstoffantrieben.....	71
5.	Diskussion.....	80
5.1.	Chancen und Herausforderungen.....	82
5.2.	Konkurrenzsituation.....	86
5.3.	Marktpotential der Wasserstoffverbrennung.....	88
5.4.	Limitationen.....	89
6.	Fazit.....	90
	Literaturverzeichnis.....	93
	Anhang A. Tabellen.....	108
	Anhang B. Berechnungen für den Fahrzeug- und Kraftstoffvergleich.....	113
	B.1. Gesamtkostenvergleich FCEV vs. konventionelle Verbrenner.....	113
	B.2. Gesamtkostenvergleich FCEV vs. BEV.....	113
	B.3. Reichweitenvergleich der Kraftstoffe/Antriebe.....	113
	B.4. Ladekosten BEV.....	114
	B.5. Ladezeiten BEV.....	114

B.6. Tankstellenvergleich Wasserstoff vs. konventionelle Kraftstoffe .....	115
Anhang C. Fahrzeugdaten .....	116
C.1. Audi A4 Avant g-tron .....	116
C.2. A4 Limousine 35 TFSI .....	126
C.3. A4 Limousine 35 TDI.....	135
C.4. Audi e-tron 50 quattro.....	145
C.5. Audi e-tron 55 quattro.....	156
C.6. VW Passat 1,5 l TSI OPF .....	167
C.7. VW Passat 2,0 l TDI SCR.....	177
C.8. VW ID. 4 Pure (52 kWh).....	187
C.9. VW ID.4 Pro (77 kWh).....	196
C.10. VW ID.3 Pure (45 kWh).....	205
C.11. Tiguan 1,5 l TSI OPF.....	214
C.12. Tiguan 2,0 l TDI SCR.....	223
C.13. VW e-Golf .....	232
C.14. Toyota Mirai II.....	239
C.15. Hyundai Nexo .....	243
C.16. BMW 318i Limousine .....	245
C.17. BMW 318d Limousine .....	254
C.18 Tesla Model 3 Standard .....	263
C.19. Tesla Model 3 Long Range.....	267
C.20. Mitarbeiter-Chat Tesla Batteriekapazität.....	271
Ehrenwörtliche Erklärung .....	272

# 1. Einleitung

## 1.1. Motivation und Relevanz der Thematik

Das Streben nach wirtschaftlichem Wachstum hat lange Zeit das Handeln der Menschen bestimmt. Angesichts der Folgen der Erderwärmung polarisiert die Klimaproblematik in den vergangenen Jahren zunehmend. Also Hauptverursacher hierfür gelten von Menschen produzierte Treibhausgase. Getrieben durch die voranschreitende Industrialisierung und Globalisierung sowie ein stetiges Bevölkerungswachstum, stiegen auch die globalen Emissionen kontinuierlich an. Dieser Trend führte dazu, dass sich die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1960 bis 2019 fast vervierfachen konnten. (vgl. Friedlingstein et al. 2020). Einer der Hauptverursacher ist der Verkehrssektor mit einem Anteil von knapp 25 Prozent an den jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen (vgl. IEA 2020c, S. 6). Erst durch die Schwere der Folgen wurde den Nutzern vor Augen geführt, welche weitreichenden Konsequenzen ein weiterer Anstieg der Treibhausgase zu bedeuten hat. Mit dieser Erkenntnis begann parallel zur Energiewende auch eine Verkehrswende, welche als langfristiges Ziel die Klimaneutralität des Verkehrs verfolgt. Die gewaltige Anzahl an Kraftfahrzeugen auf unseren Straßen führen zudem nicht nur bei der Umwelt zu weitreichenden Konsequenzen. Auch der Mensch, als Teil des Ökosystems, erleidet enormen Schaden und bedroht langfristig seine Existenz. Sei es dabei durch die Verschlechterung der Luftqualität oder die zunehmende Geräuschbelastung durch den Straßenverkehr.

Für Diesel- und Ottomotoren läutet diese Wende das Ende ihrer Existenz ein. Kaum eine Erfindung prägte das Leben der Menschen so sehr wie die Entwicklung des Verbrennungsmotors. Ihr Einsatz mit konventionellen Kraftstoffen bietet allerdings nur noch geringes Optimierungspotential und ist zudem weit von dem Ziel der Klimaneutralität des Verkehrssektors entfernt. Angesichts dieser Tatsache macht dies den Einsatz von alternativen Antriebskonzepten erforderlich. Die Notwendigkeit einer Sache garantiert dabei jedoch keineswegs, dass diese auch auf Akzeptanz in der Gesellschaft stößt. Insbesondere der Fahrzeugmarkt unterlag in der Vergangenheit einem ständigen Optimierungsprozess, woraus sich bis heute eine Vielzahl an Kriterien und Voraussetzungen für neue Kraftfahrzeuge ergaben. Da einige dieser Kriterien entscheidenden Einfluss auf das Kaufverhalten eines Individuums haben, macht dies eine Untersuchung im Zusammenhang mit den Antriebsalternativen erforderlich. Eine vielversprechende Alternative ist dabei der Einsatz von Wasserstoff in Kraftfahrzeugen. Die Nutzung von Wasserstoff kann dabei bereits auf eine lange Vergangenheit zurückblicken. Bereits im 19. Jahrhundert schrieb Jules Verne in seinem Werk „Die geheimnisvolle Insel“:

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

- Jules Verne

Das Potential von Wasserstoff ist den Menschen bereits seit langer Zeit bewusst und dennoch wird dieser bislang nur in wenigen Bereichen effektiv genutzt. Die Vorteile reichen dabei von seiner fast unendlichen Verfügbarkeit bis hin zu dem höchsten Energiegehalt aller bisher bekannten Kraftstoffe. Dennoch gelang dem Wasserstoff bislang nicht der Durchbruch im Verkehrssektor. Verantwortlich dafür waren unter anderem die wesentlich höheren Anforderungen beim Transport und der Speicherung, aufgrund seiner stoffspezifischen Eigenschaften. Durch den technologischen Fortschritt weckte die Nutzung von Wasserstoff jedoch wiederholt das Interesse der Gesellschaft und damit auch der Wirtschaft.

Bereits serienreife und seriennahe Wasserstofffahrzeuge beweisen die Realisierbarkeit eines solchen Antriebssystems. Der zunehmende Druck der Öffentlichkeit auf die Automobilindustrie veranlasste diese dazu, ihre Bemühungen hinsichtlich neuer Antriebskonzepte konsequent auszuweiten. Als Folge dieser Bemühungen sind verschiedene Antriebskonzepte entwickelt wurden und stehen nun in direkter Konkurrenz zueinander. Für einen Erfolg der wasserstoffbasierten Antriebskonzepte ist es daher entscheidend, inwiefern sich diese von den anderen Konzepten unterscheiden und sich gegen diese behaupten können. Daher umfasst der Inhalt dieser Arbeit nicht nur Wasserstoff und seine Einsatzmöglichkeit in Kraftfahrzeugen, sondern auch die batterieelektrischen Antriebe, Hybridantriebe und alternativen Kraftstoffe.

Die Aktualität des Themas zeigt sich in dem am 11. Dezember 2018 vom Europäischen Parlament veröffentlichten Erneuerbaren-Energie Gesetz II. Mit Beginn des Jahres 2021 sorgt der gesetzliche Rahmen dafür, dass alle Mitgliedsstaaten dazu verpflichtet sind, ihren Anteil an erneuerbaren Energien im Verkehrssektor sukzessiv zu steigern, um dadurch die Erreichung der Klimaschutzziele 2030 gewährleisten zu können (Richtlinie (EU) 2018/2001). Darüber hinaus sind die europäischen Automobilhersteller dazu veranlasst, den Geräuschpegel von neuen Fahrzeugen zu begrenzen, da sich hieraus ein nachweislich negativer Einfluss auf die Gesundheit ergibt (Verordnung (EU) Nr. 540/2014).

## **1.2. Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Die Entwicklung von neuen Antriebskonzepten ist zum aktuellen Zeitpunkt einer der treibenden Kräfte in der Automobilindustrie. Für viele Hersteller bedeutet dies zumeist eine völlige Umstrukturierung der bisherigen Produktionsstrukturen. Dabei ist die grundlegendste Frage, welche Antriebsalternative die Kraftfahrzeuge zukünftig antreiben wird, noch nicht beantwortet. Im Laufe der Arbeit wird sich zeigen, dass hierzu nicht zwangsläufig ein neues Antriebskonzept notwendig ist. Der ständige Strukturwandel und die daraus resultierende Planungsunsicherheit erschweren es den Automobilherstellern zudem, sich auf eine Alternative festzulegen. Insbesondere der Einsatz von Wasserstoff wirft dabei etliche Fragen auf. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an und geht der Forschungsfrage nach:

*„Welche langfristige Relevanz besitzen wasserstoffbasierte Antriebskonzepte in Kraftfahrzeugen und wie können diese die Emissionsproblematik des Verkehrssektors lösen?“*

Die vorliegende Arbeit gliedert sich dabei in sechs Kapitel. Die theoretischen Grundlagen der Technik bilden das Fundament der Arbeit. Erweitert werden diese durch einen Vergleich der Alternativen, welcher durch eigens durchgeführte Berechnungen ergänzt wird.

**Kapitel 2** thematisiert die Ursachen, welche zu der Problematik aus den Fragestellungen geführt haben. Dabei erhält der Leser einen Einblick über die bisherige Entwicklung sowie gleichzeitig eine Vorschau auf die Entwicklung der bevorstehenden Jahrzehnte. Die zu erwartenden Konsequenzen bilden dabei die Essenz für die Entwicklung von neuen Antriebsalternativen.

Das **Kapitel 3** befasst sich mit den Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff in Kraftfahrzeugen. Basierend auf den in Kapitel zwei vorgestellten Auswirkungen der globalen Entwicklungstendenzen, ist es in diesem Kapitel das Ziel, inwiefern die vorgestellten Wasserstoffantriebe diese Auswirkungen bewältigen können. Unter der Berücksichtigung von aktuellen Daten und neuen Technologien werden die Herausforderungen und das Marktpotential für Wasserstofffahrzeuge ermittelt. Die wesentlichen Inhalte sind hierbei die Herstellung, Speicherung und der Transport von Wasserstoff. Eine Kostenanalyse gibt zudem Auskunft über die aktuelle Konkurrenzfähigkeit von Wasserstofffahrzeugen gegenüber konventionellen Verbrennern. Auf Basis der gesammelten und vorgestellten Daten wird abschließend ein Vergleich zwischen den vorgestellten Wasserstoffalternativen und den konventionellen Verbrennern vorgenommen. Zu guter Letzt zeigt eine Vorstellung der Ziele und Maßnahmen der Bundesrepublik und der EU, welche zukünftige Relevanz der Wasserstoffwirtschaft zugesprochen wird.

**Kapitel 4** untersucht die Einsatzmöglichkeit weiterer Antriebskonzepte. Das wesentliche Ziel ist es, die hierbei vorgestellten Alternativen von den Wasserstoffantrieben abzugrenzen und so ihr Lösungspotential hinsichtlich der Fragestellung zu beurteilen. Mittels der bereits in Kapitel drei verwendeten Kategorien findet abschließend eine Gegenüberstellung mit den bereits untersuchten Wasserstoffantrieben und konventionellen Verbrennern statt. Erhöhte Aufmerksamkeit erhalten hierbei die Antriebskonzepte, welche bereits die Serienreife erreicht haben.

In **Kapitel 5** erfolgt eine Diskussion auf Grundlage der erlangten Erkenntnisse sowie eine Erläuterung der Limitationen. Im Vordergrund stehen hierbei insbesondere Chancen, Herausforderungen und die Konkurrenzsituation für Wasserstoff und Wasserstoffantriebe. Abschließend befasst sich das **Kapitel 6** mit dem Fazit der Arbeit und zukünftige Forschungsansätze.

FCEV dieser Fahrzeugklasse zu erhalten. Inwiefern die Entwicklung von weiteren Fahrzeugmodellen eine Relevanz für die Wasserstoffmobilität darstellt, kann daher Gegenstand weiterführender Forschung sein.

## 6. Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Beurteilung von Wasserstoffantrieben zur Bewältigung der globalen Emissionsproblematik. Auf Basis einer umfangreichen Datenuntersuchung und eigenen Berechnungen wurde hierzu ein Vergleich mit den bislang bekannten und konkurrenzfähigen Antriebsalternativen durchgeführt. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Prognose für die Wasserstoffmobilität der Zukunft aufgestellt.

Eine zentrale Erkenntnis der Arbeit ist, dass ausschließlich die Entwicklung eines emissionsfreien Antriebes keinesfalls auch seinen Erfolg garantiert. Hierzu müssen weitaus mehr Bedingungen erfüllt sein. Dabei kristallisierten sich insbesondere die Integrationsfähigkeit der Antriebslösung und möglichen Kraftstoffalternative, in die bestehende Produktions-, Verkehrs-, und Versorgungsinfrastruktur, als entscheidendes Kriterium heraus. Des Weiteren gilt eine neue Alternative grundlegend als ungeeignet, wenn sie die bereits bestehende hinsichtlich der Effizienz nicht übertreffen oder zumindest nur ein gleiches Niveau erreicht. Unter Berücksichtigung der genannten Erkenntnisse lassen sich die verschiedenen Wasserstoffantriebe auf dem Markt einordnen und ihr Potential abschätzen.

In Bezug auf die Emissionsfreiheit des Antriebs kann bereits zu Beginn gesagt werden, dass die chemische Zusammensetzung des Kraftstoffes dabei ein entscheidender Faktor ist. Während konventionelle Kraftstoffe aus Kohlenstoff bestehen, ist dieser in Wasserstoff nicht vorhanden. Dadurch können die notwendigen chemischen Reaktionen für die Schadstoffbildung nicht stattfinden. Das Abgas eines FCEV besteht somit nur aus Wasserdampf. Bei der Wasserstoffverbrennung hingegen kommt es dennoch zu der Bildung von Stickoxiden, welche auf den Stickstoff aus der Umgebungsluft zurückzuführen sind. Dies macht eine Abgasnachbehandlung beim H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor notwendig. Gleichzeitig verbleiben geringfügige Reste des Schmiermittels im Brennraum, wodurch weitere Schadstoffe gebildet werden können. Im direkten Schadstoffvergleich stellt die Brennstoffzelle somit die bessere Alternative dar.

Hinsichtlich der Integrationsfähigkeit der Wasserstoffantriebe zeigt sich, dass hierbei der H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor die bessere Alternative ist. Der Aufbau ähnelt dem des konventionellen Verbrenners, wodurch sich die bereits bestehende Produktionsinfrastruktur nutzen lässt. Die Fertigung von FCEV hingegen erfordert die Einbindung von neuen Produktionsschritten. Dabei stellt die Brennstoffzelle die aufwendigste und kostenintensivste Änderung dar. Die Nutzung der bestehenden Versorgungsinfrastruktur gestaltet sich bisher für beide Varianten schwer. Obgleich es Wasserstofftankstellen gibt, ist ihre Anzahl heute noch äußerst gering. Aufgrund der



Ziele der einzelnen Nationen ist in den kommenden Jahren mit einer deutlichen Verbesserung der Wasserstoffverfügbarkeit zu rechnen. Eine entscheidende Rolle könnte hierzu die LOHC-Technologie einnehmen. Die Speicherung und der Transport von Wasserstoff sind mittlerweile eine gängige Methode, allerdings bislang noch mit einer Vielzahl an Nachteilen (Verluste, hohes Risiko, erhöhter Aufwand, Kosten). Durch den Einsatz eines flüssigen Trägermediums erleichtert sich nicht nur den Umgang mit Wasserstoff, sondern auch die verlustfreie Speicherung über einen unbestimmten Zeitraum ist möglich.

Eine Betrachtung der Effizienz zeigt, dass sie dem konventionellen Verbrenner ebenbürtig sind. Während ein H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor ein gleiches Leistungsniveau erreicht, erreicht die Brennstoffzelle einen wesentlichen höheren Wirkungsgrad im Kraftfahrzeug. Beide Antriebe müssen sich allerdings auch die Überlegenheit des BEV eingestehen. Trotz höchstem Wirkungsgrad stellen sie nicht automatisch die optimale Alternative dar. Auch das BEV kämpft seit der Einführung mit diversen Problemen, wie einer geringeren Reichweite oder der verhältnismäßig hohen Ladezeiten. Der Beginn der Elektromobilität wurde daher oftmals als kritisch angesehen. Im Laufe der letzten Jahre konnten durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Batterien enorme Verbesserungen erzielt werden. Auch das BEV steht noch am Anfang seiner Entwicklung und bedarf noch weiterer umfangreicher Forschungsarbeit, bis es zu dem heutigen Leistungsniveau des konventionellen Verbrenners aufschließen kann. Damit stehen sich der Einsatz von Brennstoffzelle und Batterie im Kraftfahrzeug in nichts nach. Beide Alternativen verfügen daher über ein ausreichend hohes Potential, um die Bemühungen in den Bereichen fortzuführen.

Für den Einsatz in Nutzfahrzeuge stellt sowohl die Brennstoffzelle als auch die Batterie bislang keine wirtschaftliche Alternative dar. Zwar existieren verschiedene Fahrzeuge, deren Einsatz beschränkt sich zumeist allerdings auf den Betrieb im Stadtverkehr oder auf dem Betriebsgelände. Der Grund dafür sind die kurzen Strecken und schnellen Lade- und Tankmöglichkeiten, sowie ein hoher Anteil an Rekuperation. Für längere Strecken mit Nutzfahrzeugen, wie sie für den Güterverkehr notwendig sind, eignen sich beide Varianten allerdings nicht. Die erhöhten Anforderungen verlangen eine größere Ausführung der Brennstoffzelle oder der Batterie. Beides führt zu einer signifikanten Erhöhung des Fahrzeuggewichts, woraus eine Reduzierung der Nutzlast und -fläche resultiert. Zudem bedeutet die Erhöhung der Batteriekapazität wesentlich längere Ladezeiten. Der höhere Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren in Nutzfahrzeuge stellt ein Potential für den Einsatz der Wasserstoffverbrennung dar. Neben einem geringen Umrüstungsaufwand entfällt der kostenintensive Austausch des gesamten Fahrzeuges.

Eine endgültige Kaufentscheidung wird stark durch die persönlichen Präferenzen und Bedürfnissen eines Individuums, sowie den Einsatzbereichen beeinflusst. Die Nutzung eines BEV ist in der Stadt aufgrund des Nutzungsprofil sinnvoller als auf dem Land, dennoch ergeben sich im ländlichen Umfeld andere logistische Vorteile für die eingesetzte Technologie. Beispielsweise ist ein privater Stellplatz in Großstädten keine Selbstverständlichkeit, weshalb die Installation

einer privaten Wallbox nicht möglich ist. Besitzer eines BEV sind somit auf die Nutzung der öffentlichen Ladesäulen angewiesen, welche bislang ebenfalls nur in geringerer Anzahl vorhanden sind und daher eine begrenzte Stand-/Parkzeit besitzen. Wasserstoff wird hingegen an öffentlichen Tankstellen bereitgestellt und bietet damit eine bekannte und einfache Zugangsmöglichkeit, sofern der Ausbau der Infrastruktur vorangetrieben wird. Trotz einer eindeutigen Verbesserung der Emissionswerte durch die Wasserstoffverbrennung steht der Verbrennungsmotor von dem Ende seines Einsatzes im Kraftfahrzeug. Der Einsatz von H<sub>2</sub>-Verbrennungsmotor kann daher nur als Brückentechnologie in Nutzfahrzeugen gesehen werden.

Schlussendlich lässt sich sagen, dass Wasserstoff aufgrund seiner chemischen Eigenschaften als einzigartig angesehen werden kann. Die Überlegenheit gegenüber den konventionellen und alternativen Kraftstoffen zeigt sich bereits durch seinen höheren Energiegehalt und seine Reinheit. Beide allein sind bereits ausreichende Argumente für die Intensivierung der Forschungsarbeiten im Bereich der Wasserstofftechnologien. Basierend auf den untersuchten Daten ist daher ein Szenario, in dem Brennstoffzelle und Batterie koexistieren, ähnlich wie es bereits Otto- und Dieselmotor tun, als realistisch anzusehen. Mit Sicherheit lässt sich daher sagen, dass das Zeitalter der Verbrennung durch die Elektromobilität abgelöst wird. Hinsichtlich der Effizienz stellt das BEV die mit Abstand beste Alternative dar, weshalb viele Hersteller vermehrt auf batterieelektrischen Antrieb setzen.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich aus dem Vergleich der Fahrzeugmodelle, aufgrund mangelnder Datenlage. Durch die geringe Anzahl an Wasserstofffahrzeugen ist nur ein eingeschränkter Vergleich möglich, weshalb sich nur schwer Aussagen zu weiteren Fahrzeugklassen tätigen lassen. Für eine konkrete Beurteilung des Marktpotentials von Wasserstofffahrzeugen ist die Untersuchung weiterer Fahrzeuge unerlässlich. Zudem ist es empfehlenswert, dass auf Basis der vorgestellten LOHC-Technologie verschiedene Szenarien, für den Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur, entwickelt werden. Ziel der Untersuchung sollte die Entwicklung eines optimalen Tankstellennetzes, Kosten- und Preissenkungspotentials sein. In diesem Zusammenhang ist zudem eine tiefere Analyse des Preissenkungspotentials von Wasserstoff sinnvoll. Basierend auf den zu erwartenden Entwicklungen der kommenden Jahre kann so ein Stufenplan zur Senkung des Wasserstoffpreises entworfen werden. Anhand der ermittelten Preis- und Kostendifferenz des FCEV, gegenüber dem konventionellen Verbrenner und BEV, sollten zudem weitere Maßnahmen zur Kostenreduzierung definiert werden.