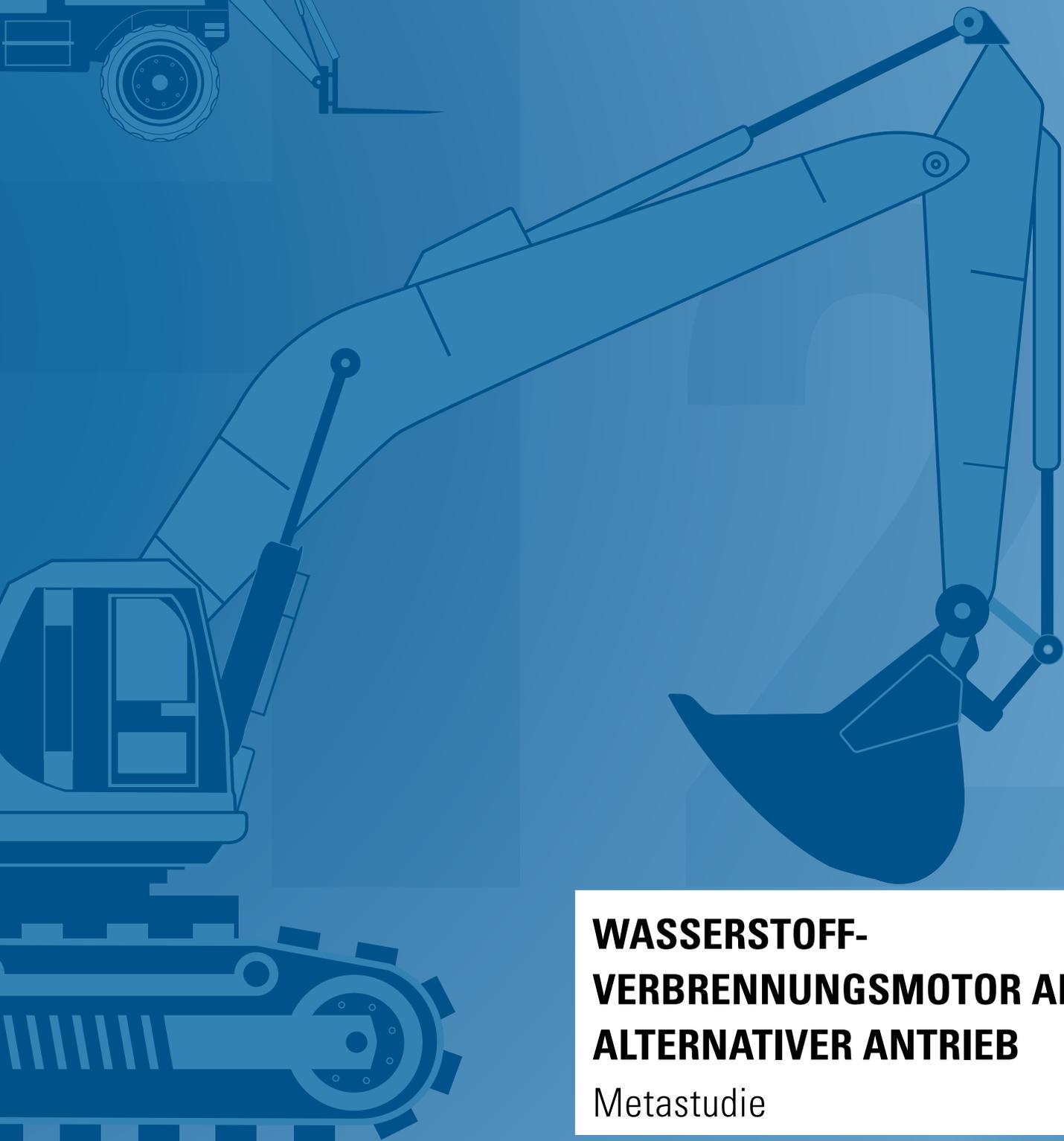


H₂



**WASSERSTOFF-
VERBRENNUNGSMOTOR ALS
ALTERNATIVER ANTRIEB**

Metastudie

IMPRESSUM

Herausgeber und Auftraggeber:

NOW GmbH
Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie
Fasanenstraße 5
10623 Berlin

Gefördert durch

Bundesministerium für Verkehr
und digitale Infrastruktur (BMVI)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin

Autoren

Dipl.-Ing. Michael Schrank –
Professur Alternative Fahrzeugantriebe
Vivien Langer, M.Sc. –
Professur Unternehmensrechnung und Controlling
Benjamin Jacobsen, M.Sc. –
Professur Unternehmensrechnung und Controlling

Co-Autoren

Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth
Prof. Dr. Prof. h. c. Uwe Götze

Stand: 02.03.2021

Gestaltung

kursiv Kommunikationsdesign, Katrin Schek
Peter Frey, Angela Köntje

Copyright

Die Nutzungsrechte liegen – soweit nicht explizit
genannt – bei NOW und den Autoren.



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ



Professur Alternative Fahrzeugantriebe
Prof. Dr.-Ing. Thomas von Unwerth
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz
www.tu-chemnitz.de/mb/alf



Professur Unternehmensrechnung und Controlling
Prof. Dr. Prof. h. c. Uwe Götze
Thüringer Weg 7
09126 Chemnitz
www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/bwl3

Abstract

Die vorliegende Metastudie wertet basierend auf Publikationen und Expertenaussagen die Potenziale für den Einsatz eines Wasserstoffverbrennungsmotors als alternativer Antrieb aus. In der Metastudie wird zum einen eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik des Wasserstoffverbrennungsmotors gegeben und die aktuell offenen Forschungsfragen werden zusammengestellt. Zum anderen werden technische, wirtschaftliche und anwendungsbezogene Vergleiche mit der Brennstoffzellenantriebstechnologie gezogen und die Vor- und Nachteile beider Antriebssysteme gegenübergestellt.

Der Stand der Technik legt dar, dass viele Grundlagen bereits erarbeitet sind und die technische Funktion nachgewiesen ist. In der technischen Umsetzung hat sich der saugrohr-einblasende Motor als einfach und leicht umsetzbar mit Emissions- und Wirkungsgradvorteilen im mageren bis sehr mageren Betrieb herausgestellt. Der direkteinblasende Motor erreicht eine deutlich höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Emissionen. Bei der Zulassung von Fahrzeugen mit Wasserstoffmotoren werden diese in die Klassen mit den niedrigsten Emissionen, in Kalifornien in die Kategorien SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) und TZEV (Transitional Zero-Emission Vehicle), eingeordnet, da sie hauptsächlich Wasserdampf und Stickoxide emittieren. Im technischen Vergleich der Antriebssysteme mit dem Brennstoffzellen-Hybridantrieb haben sich Vorteile des Wasserstoffmotors bei Größe und Gewicht ab Leistungen von 350 kW, bei der Robustheit gegen Verschmutzung und im Thermomanagement herausgestellt. Ein Einsatz des Wasserstoffmotors wird von Experten erst ab 2025 im Bereich der Vor- oder Kleinserien gesehen.

Ziel der ökonomischen Analyse ist es, die aktuellen Kosten sowie die prognostizierte zukünftige Kostenentwicklung des Wasserstoffverbrenners aufzuzeigen. Auf Basis einer Analyse der TCO (Total Cost of Ownership) dieses Antriebskonzepts im Vergleich zum Referenzantrieb Diesel sowie zum Brennstoffzellenantrieb zeigen sich zwei zentrale Ergebnisse der Untersuchung. Zunächst besteht die Prognose einer ähnlichen Kostenentwicklung des Wasserstoffverbrennungs- sowie des Brennstoffzellenantriebs mit einem bereits bis zum Jahr 2030 bestehenden Kostenreduktionspotenzial. Weiterhin kann die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen und Veröffentlichungen hinsichtlich der Kosten eines Wasserstoffverbrenners identifiziert werden.

Die Frage, ob eine Koexistenz beider wasserstoffbasierter Antriebe möglich ist, kann mit Ja beantwortet werden. Daraus folgend ergibt eine Analyse der Anwendungen, dass sich der Wasserstoffmotor vor allem in Bereichen hohen Leistungsanforderungen und geringen Bauraums sowie bei schwierigen und extremen Umweltbedingungen eignet.

1	Einleitung zur Studie	7
1.1	Hintergrund und Zielsetzung	7
1.2	Begriffsdefinitionen	8
1.3	Vorgehensweise	9
2	Technischer Stand des Wasserstoffverbrennungsmotors	10
2.1	Historische Einordnung des Wasserstoffmotors	10
2.2	Eigenschaften von Wasserstoff als brennbarer Kraftstoff	11
2.3	Aktueller Stand der Technik	13
2.3.1	Aufbau des Grundmotors und relevante Komponenten für den Wasserstoffbetrieb	14
2.3.2	Brennverfahren	16
2.3.3	Gemischbildung und Injektoren	18
2.3.4	Aufladung und Abgasrückführung	24
2.3.5	Emissionen und Abgasnachbehandlung	24
2.3.6	Wirkungsgrad und Leistung	28
2.4	Aktuelle Projekte, Entwicklungen und Prototypen	34
2.5	Patentsituation	36
2.6	Zusammenfassung des Stands der Technik	40
2.7	Offene Forschungs- und Entwicklungsfragen	41
3	Systemanalyse des Wasserstoffmotorantriebs	44
3.1	Vergleich mit Otto- und Dieselmotoren	46
3.2	Vergleich mit Brennstoffzellen-Hybridantrieben	48

4

Ökonomische und ressourcenbezogene Analyse des Wasserstoffverbrennungsmotors

54

4.1	Ergebnisse der Literaturrecherche	54
4.2	Mehrkostenabschätzung für den Wasserstoffverbrennungsmotor	55
4.3	TCO-Analyse	57
4.3.1	Methodik und Vorgehen	57
4.3.2	TCO-Analyse des Wasserstoffverbrennungsantriebs	59
4.3.3	TCO-Analyse des Brennstoffzellenantriebs	64
4.3.4	Ergebnisse und ihre Interpretation	71
4.3.5	Kritische Würdigung	73
4.4	SWOT-Analyse	74
4.5	Analyse der Ressourceneffizienz	76

5

Anwendungsanalyse zum Wasserstoffverbrennungsmotor

80

5.1	Können Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen koexistieren?	80
5.2	Einschätzung der mobilen/dynamischen Anwendungen	81
5.2.1	Anwendung bei Personenkraftwagen	82
5.2.2	Anwendung bei Lastkraftwagen	82
5.2.3	Anwendung bei Bussen	82
5.2.4	Anwendung bei Baufahrzeugen und -maschinen	83
5.2.5	Anwendung bei Agrarfahrzeugen	83
5.2.6	Anwendung bei Nischenprodukten	83
5.2.7	Anwendung bei Schiffen	84
5.3	Einschätzung der stationären/quasistationären Anwendungen	84
5.3.1	Anwendung als Range-Extender in batterieelektrischen Fahrzeugen	85
5.3.2	Anwendung als stationärer Erzeuger einer Energieform	86
5.3.3	Anwendung in Kraft-Wärme-Kopplung	86

6	Zusammenfassung	88
----------	------------------------	-----------

7	Anhang	91
----------	---------------	-----------

-	Literaturverzeichnis	91
-	Abbildungsverzeichnis	100
-	Tabellenverzeichnis	101

1 Einleitung zur Studie

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Die deutsche Bundesregierung verabschiedete im Juni 2020 eine nationale Wasserstoffstrategie zur Erreichung der Klimaziele für 2030. Mit dem Energieträger Wasserstoff wird die Senkung der CO₂-Emissionen um 55 % bis 2030 bzw. bis zu 95 % bis 2050 in allen Sektoren mit Energiebedarf angestrebt. Die nationale Wasserstoffstrategie beinhaltet dabei die Förderung von allen wasserstoffbasierten Technologien, unter anderem auch als Antrieb für Fahrzeuge. Die Wandlung chemischer in nutzbare Energie, die sowohl elektrochemisch mittels Brennstoffzelle als auch thermodynamisch mittels Verbrennungsmotor erfolgen kann, versorgt alle Systeme mit Energie und treibt das Fahrzeug an.

Die vorliegende Metastudie soll basierend auf Publikationen und Expertenaussagen die Potenziale für den Einsatz eines Wasserstoffverbrennungsmotors als alternativer Antrieb im Personen- und Gütertransportsektor darstellen. Ziel der Metastudie ist es zum einen, eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik des Wasserstoffverbrennungsmotors zu geben und die aktuell offenen Forschungsfragen darzustellen. Zum anderen sollen je ein technischer, ein wirtschaftlicher und ein anwendungsbezogener Vergleich mit der Antriebstechnologie der Brennstoffzelle gezogen und die Vor- und Nachteile beider Antriebssysteme gegenübergestellt werden.

Die Metastudie soll eine wissenschaftlich-technische Grundlage für strategische Entscheidungen in den nächsten Jahren bieten. Sie dient als Nachschlagewerk für die Einschätzung und Bewertung von Projektideen und für die Beantwortung von Anfragen aus Politik und Gesellschaft. Die Studie soll auch dabei helfen, offene Forschungsfragen zu definieren und den Bedarf an finanziellen Förderungen dieser Technologie im Rahmen bestehender oder künftiger Förderprogramme bewerten zu können.

1.2 Begriffsdefinitionen

Wasserstoffverbrennungsmotor oder Wasserstoffmotor

Ein Wasserstoffverbrennungsmotor ist eine Verbrennungskraftmaschine und damit eine Wärmekraftmaschine mit zyklischer innerer Verbrennung eines zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemischs zur Umsetzung von chemischer in mechanische Energie. Der reine Wasserstoffverbrennungsmotor ist ein monovalenter Motor und nutzt als Kraftstoff reinen gasförmigen oder flüssigen Wasserstoff. Ein bivalenter Motor (auch als Bi-Fuel-Wasserstoffmotor oder Bi-Fuel-Gasmotor bezeichnet) kann ein Kraftstoffgemisch aus Wasserstoff und anderen Gasen (wie Methan oder Erdgas) oder flüssigen Kraftstoffen (wie Benzin) erzeugen und mit Luftsauerstoff verbrennen.

Gasverbrennungsmotor oder Gasmotor

Gasmotoren sind eine Kategorie der Verbrennungsmotoren, die anstatt mit flüssigen Kraftstoffen (wie Benzin und Diesel) mit gasförmigen Kraftstoffen betrieben werden. Zu den gasförmigen Kraftstoffen zählen Erdgas, beispielsweise als CNG (Compressed Natural Gas), Biogas und Flüssiggas (LPG – Liquefied Petroleum Gas). Auf den Betrieb mit CNG und LPG ausgelegte Gasmotoren sind bereits seit vielen Jahren in Serienproduktion und fester Bestandteil des Motorsortiments der Nutzfahrzeughersteller. Wasserstoffmotoren gehören in die Kategorie der Gasmotoren, da Wasserstoff gasförmig in den Zylinder geleitet wird.

Brennstoffzellen-Hybridantrieb oder Brennstoffzellenantrieb

Ein Brennstoffzellen-Hybridantrieb basiert auf einem elektrischen Antriebssystem in Kombination mit einem Akkumulator als Zwischenspeicher und einem Brennstoffzellensystem als Energielieferant. Im Brennstoffzellensystem setzen die Brennstoffzellen chemische Energie mittels einer Redoxreaktion von Wasserstoff und Luftsauerstoff in elektrische Energie um und versorgen den Antrieb oder laden den Akkumulator. Das elektrische Antriebssystem besteht aus Spannungswandlern und einem oder mehreren Elektromotoren mit einer Kraftübersetzung zu den Rädern, die das Fahrzeug antreiben.

1.3 Vorgehensweise

Zur Erarbeitung der Inhalte wurden Literaturquellen mittels freier Internetsuche und in verschiedenen Datenbanken wie beispielsweise der Springer Nature Plattform (Springer Link) und der Technischen Informationsbibliothek (TIB – Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaft) recherchiert. Bei der Recherche wurde sowohl stichwortartig nach Begriffen wie „Wasserstoff“, „Verbrennungsmotor“ und „Wasserstoffmotor“ sowie ihren Übersetzungen ins Englische als auch nach bekannten Personen und Institutionen gesucht. Zudem wurden Veröffentlichungen und Pressemitteilungen bekannter Forscher und Unternehmen gesichtet, die an der Entwicklung von Wasserstoffverbrennungsmotoren beteiligt sind. Von thematisch passenden Veröffentlichungen aus dem Zeitraum 1999 bis 2020 erfolgte eine Auswertung nur der direkt relevanten Publikationen. Parallel wurden Kontakte zu verschiedenen Unternehmen und Forschungseinrichtungen aufgebaut und Interviews mit Entwicklern und Forschern geführt. Aus den Veröffentlichungen und Daten wurde der Stand der Technik zusammengestellt und es wurden die Grundlagen für den technischen und wirtschaftlichen Vergleich erarbeitet. Der Fokus der Studie liegt auf dem Segment der schweren und industriellen Nutzfahrzeuge.

2 Technischer Stand des Wasserstoffverbrennungsmotors

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Veröffentlichungen zum Stand der Technik für Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff als Primärkraftstoff. Zusätzlich erfolgte eine Patentrecherche und -auswertung zu deutschen und internationalen Patenten.

2.1 Historische Einordnung des Wasserstoffmotors

Der wohl erste durch Wasserstoff betriebene Motor entstand um das Jahr 1807. In diesem Jahr meldete der französische Offizier Francois Isaac de Rivaz (1752–1828) einen Motor mit explosionsartiger Verbrennung von Wasserstoff zum Patent an. Der Motor basierte auf einer verbrennungsgetriebenen Aufwärtsbewegung eines Kolbens, der im Anschluss bei der gravitationsgetriebenen Abwärtsbewegung Kraft an die Räder abgab. Vier Jahre später unternahm Rivaz erste Fahrversuche und konnte einige Hundert Meter zurücklegen.

Bereits 1860 entwickelte Etienne Lenoir (1822–1900) einen doppelt wirkenden Kolbenmotor nach dem Vorbild einer Dampfmaschine, der im Zweitaktverfahren Luft und Wasserstoff verbrannte und eine Leistung von 0,7 kW bei 80 1/min erreichte. Der Motor konnte auch mit anderen Gasen betrieben werden und arbeitete mit einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 3 %. Exemplare sind noch in Museen in München und Paris zu sehen [1, S. 32-35].

Rudolf Arnold Erren rüstete im Jahr 1938 mit Kollegen die ersten Verbrennungsmotoren auf eine direkte Einblasung von Wasserstoff in den Zylinder um. Kurz nach dem Lufteinlassschluss wurde der gasförmige Kraftstoff über ein Drosselventil bei Drücken bis zu etwa 6 bar in den Brennraum eingeleitet, verdichtet und gezündet. 1939 erhielt Erren in den USA das Patent „Internal Combustion Engine using Hydrogen as Fuel“ (US-Patent-Nr. 2,183,674) [2, S. 517].

In den Jahren 1971 bis 1978 wurden in Amerika, in Japan (Musashi Institute of Technology) und in Deutschland (Mercedes-Benz und DFVLR) Versuchsfahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotor aufgebaut und in Betrieb genommen. 1996 rüstete MAN erste Busse mit Wasserstoffmotoren zur Demonstration in München aus. Von 2006 bis 2015 fuhr eine Flotte von MAN-Stadtbussen (14 Busse bis 2009, 4 Busse bis 2015) im Rahmen der Projekte HyFLEET:CUTE [3] und „Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren“ (CEP Phase II – Förderkennzeichen 03BV219) im Berliner Stadtverkehr. Weitere Fahrzeugflotten mit Wasserstoffmotoren wurden von BMW in den Jahren 2000 (BMW 750 hL, 15 Stück) und 2007 (BMW Hydrogen 7) aufgebaut und getestet [1, S. 40ff].

2.2 Eigenschaften von Wasserstoff als brennbarer Kraftstoff

Konventionelle flüssige Kraftstoffe in Form von Benzin und Diesel werden seit Beginn der Verbrennungsmotoren am häufigsten eingesetzt. Seit den 1950er Jahren gibt es mit Erdgas und Methan gasförmige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren, seit den 1990er Jahren werden sie unter den Bezeichnungen CNG (Compressed Natural Gas) und LPG (Liquefied Petroleum Gas) an Tankstellen geführt. Diese Kraftstoffe basieren auf Kohlenwasserstoffverbindungen, die bei der Verbrennung aufgespalten und oxidiert werden. Dabei macht der Wasserstoff einen Anteil von 30 % bis 35 % der umgesetzten Energie aus.

Reiner Wasserstoff unterscheidet sich in seinen chemischen und thermodynamischen Eigenschaften von den konventionellen Kraftstoffen. Auch im Vergleich zu anderen gasförmigen Kraftstoffen weist Wasserstoff Unterschiede auf. Die wesentlichen Eigenschaften der genannten Kraftstoffe in Bezug auf die Verbrennung sind in Tabelle 1 gegenübergestellt.

TABELLE 1 Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen [1, S. 203]

Eigenschaft	Einheit	Super Plus	Diesel	Methan	Wasserstoff
Dichte (flüssig) ^a bei Temperatur	kg/m ³ °C	750 – 770 15	820 – 845 15	423 –162	70,8 –253
Dichte (gasförmig) ^{a,b}	kg/m ³	–	–	0,716	0,090
Siedepunkt /-bereich ^a	°C	30 – 190	210 – 355	–161,5	–252,8
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg _{Luft} /kg _{Kst} Vol%	14 –	14,7 –	17,2 9,5	34,3 29,5
Unterer Heizwert	MJ/kg	41,4	42,9	50	120
Gemischheizwert ^{a,b,c} (äußere Gemischbildung)	MJ/m ³	3,76	–	3,40	3,19
Gemischheizwert ^{a,b,c} (innere Gemischbildung)	MJ/m ³	3,83	3,77	3,76	4,52
Zündgrenze ^{a,d,e}	Vol% λ-Bereich	1,0 – 7,6 1,4 – 0,4	0,60 – 5,5 1,35 – 0,48	4,4 – 15 2,0 – 0,6	4,0 – 76 10 – 0,13
Entzündungstemperatur ^{a,e}	°C	230 – 450	250	595	585
Zündenergie (min.) ^{c,e}	mJ	0,24	0,24	0,29	0,017
Laminare Flammgeschwindigkeit ^{a,c,e,f}	cm/s	~ 40	~ 40	~ 42	~ 230
Diffusionskoeffizient ^{a,b,e}	cm ² /s	0,05	–	0,16	0,61
<i>Massenanteile</i>					
Kohlenstoff	%	85,6	86,1	74,9	0
Wasserstoff	%	12,2	13,9	25,1	100
Sauerstoff	%	2,2	0	0	0

Legende^a bei 1,013 bar^b bei 0 °C^c bei λ = 1^d bei 25 °C^e in Luft^f bei 350 bar und
280 K

Da Wasserstoff das kleinste chemische Element ist, besitzt er eine sehr geringe Dichte und einen geringen Siedepunkt, was deutlich größere Kraftstoffspeicher bzw. einen erheblichen energetischen Mehraufwand bei der Flüssigspeicherung erfordert. Die geringe Dichte wirkt sich auch beim Gemischheizwert bei äußerer Gemischbildung aus, da der Wasserstoff im Vergleich zu anderen Kraftstoffen mehr Luft verdrängt und sich somit ein geringerer Gemischheizwert ergibt. Im Gegensatz dazu kann der Gemischheizwert bei einer Direkteinblasung deutlich oberhalb von dem konventioneller Kraftstoffe liegen, was theoretisch eine höhere Leistungsdichte bedeutet.

1 Dargestellt mittels Diffusionskoeffizient, der dem durchschnittlichen Quadrat der zurückgelegten Wegstrecke pro Zeit entspricht

Wasserstoff hat im Vergleich vor allem bei den Zündgrenzen Vorteile gegenüber den konventionellen Kraftstoffen. Bis zu einem theoretischen Luftverhältnis von $\lambda = 10$ kann das Gemisch homogen verbrannt und der Motor somit in sehr weiten Teillastbereichen ohne Schichtladung oder gesonderte Einspritzung zur Zündung betrieben werden. Zusätzlich begünstigt die hohe Diffusionsgeschwindigkeit¹ eine schnelle homogene Gemischbildung. Die erforderliche Zündenergie für ein stöchiometrisches Wasserstoff-Luft-Gemisch beträgt nur ein Zehntel im Vergleich zu Super Plus. Dies ermöglicht eine einfache und schnelle Zündung, erhöht aber auch das Risiko einer Rückzündung in den Ansaugtrakt oder einer Frühzündung [1, S. 203f].

Ein Brennverfahren mit Selbstzündung wie bei Dieselmotoren ist bei reinem Wasserstoff aufgrund der hohen erforderlichen Entzündungstemperatur nicht sinnvoll durchführbar, da eine sehr hohe Kompression bzw. Ladungsvorwärmung notwendig ist und die Brennraummaterialien sehr hohen Temperaturen ausgesetzt werden [1, S. 224].

Durch die hohe laminare Flammenausbreitungsgeschwindigkeit sind mit Wasserstoff extrem kurze und wirkungsgradgünstige Brenndauern möglich. Wie bei konventionellen Kraftstoffen sinkt die Flammengeschwindigkeit mit steigendem Luftverhältnis, die Brenndauer bleibt im Vergleich auch im Teillastbereich niedriger. Der durch die schnellere Verbrennung entstehende höhere Druckanstieg belastet die Triebwerksteile stärker und führt zu lauterem Verbrennungsgeräuschen [1, S. 204].

2.3 Aktueller Stand der Technik

Der wesentliche Anteil an Publikationen zum Stand der Technik des Wasserstoffmotors entstammt den Forschungsarbeiten des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz (Österreich, Prof. Eichlseder) und der Professur Strömungs-, Wärme- und Verbrennungsmechanik der Universität Ghent (Belgien, Prof. Verhelst) sowie aufseiten der Industrie von der Keyou GmbH. Da während der industriellen Entwicklung, speziell in den Bereichen der Vorserienentwicklung, es nur wenige Publikationen gibt und Informationen aus Wettbewerbsgründen geheim gehalten werden, ist diese Zusammenfassung möglicherweise eine einseitige Darstellung zum aktuellen Stand der Technik. Am Ende des Kapitels folgt die Auswertung einer Patentrecherche, um einen Überblick über die industriellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu geben.

2.3.1 Aufbau des Grundmotors und relevante Komponenten für den Wasserstoffbetrieb

2 Als Grundmotor wird die Gleichteilbasis für verschiedene Motoranwendungen bezeichnet. Der Grundmotor enthält dabei die folgenden Teile: Kurbel- und Schwungradgehäuse, Kurbel- und Nockenwellen, Kolben und Pleuel, Steuertrieb, Zylinderkopf und Zylinderkopphaube (inklusive Kipphebeln, Ventilen usw.), Ölkreislauf
Quelle: <https://www.engines.man.eu/global/de/faszination-und-technik/wissenswertes/Grundmotor.html>
abgerufen am 02.11.2020

3 Im Artikel wird das Verdichtungsverhältnis des Dieselmotors von 17:1 auf 16,8:1 und 17,6:1 im Wasserstoffbetrieb erfolgreich variiert.

Basis und auch Referenz für den Wasserstoffmotor bilden im Pkw-Bereich Ottomotoren [4] und bei den Nutzfahrzeugen Dieselmotoren [5]. Aus der bekannten Verbrennungsmotortechnologie werden die Grundmotoren² übernommen und nur die für den Betrieb mit Wasserstoff relevanten Komponenten angepasst. Diese relevanten Komponenten sind insbesondere der Kolben und die Kolbenringe sowie die Ventile und Ventilsitzringe [4] [5].

Kolben und Kolbenringe, Verdichtungsverhältnis

Aufgrund der hohen Klopfneigung von Wasserstoff wird das Verdichtungsverhältnis abgesenkt, was durch eine Modifikation der Kolbengeometrie und/oder der Pleuellänge erreicht werden kann. Die Verdichtungsreduzierung fällt bei Motoren mit äußerer Gemischbildung zwischen 16 % (BMW [4]) und 33,7 % (Keyou [6]) aus. Dies hat gleichfalls eine Reduzierung des maximal erreichbaren Wirkungsgrads zur Folge [5]. Dagegen zeigt die Arbeit von Dr. Rottengruber [7] einen direkteinblasenden Motor mit keiner bzw. geringer Verdichtungsänderung³. Ebenfalls mit einem Dieselmotor vergleichbare Verdichtungsverhältnisse zeigen die Versuche von Spuller [8] an einem Forschungsmotor mit Direkteinblasung und Glühstiftzündung. Die Veröffentlichungen von Prof. Eichlseder enthalten unspezifische Angaben zu einem deutlich höheren Verdichtungsverhältnis des Dieselmotors gegenüber dem Wasserstoffmotor [1, S. 220]. Somit gibt es keine abschließende wissenschaftliche Aussage zum optimalen Verdichtungsverhältnis für den Wasserstoffbetrieb. Allgemein hängt das Verdichtungsverhältnis wie bei allen Verbrennungsmotoren von der Gemischbildungsart und dem Brennverfahren ab.

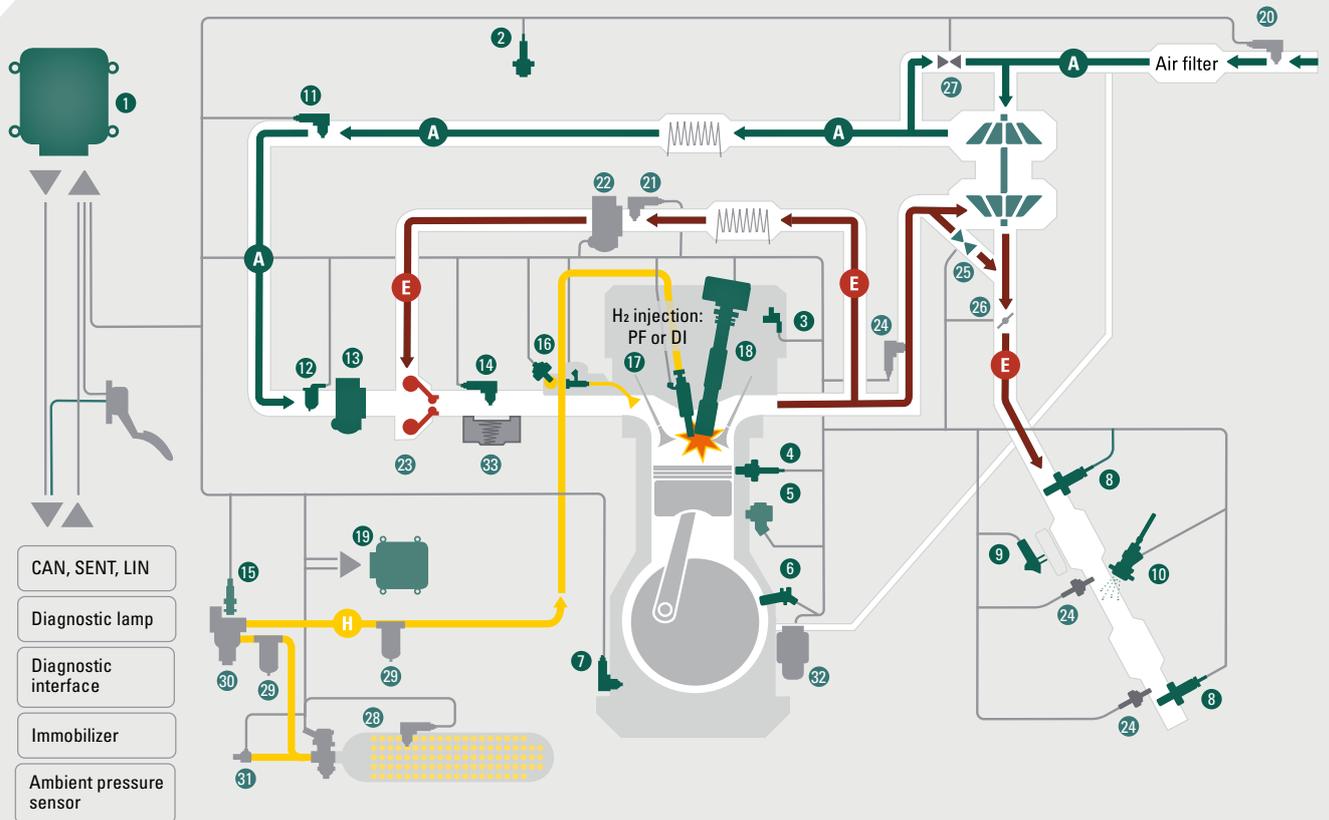
Neben dem Verdichtungsverhältnis sind die Kolbenringe anzupassen, um den Gasübertritt ins Kurbelgehäuse (Ölraum) zu minimieren, was eine verstärkte Ölalterung und den Öleintritt in den Verbrennungsraum begünstigen kann [4].

Ventile und Ventilsitzringe

Aufgrund der fehlenden Schmiereigenschaft sowie der geringen Dichte von Wasserstoff sind die Ventilsitze⁴ auf Dichtheit und Verschleißreduktion zu optimieren. Dieses Problem ist allgemein bei Gasmotoren bekannt. Hierzu sei auf [9, S. 197] verwiesen.

4 Ventilsitz: Kontaktfläche zwischen Ventil und Ventilsitzring zum Abdichten des Verbrennungsraums

ABBILDUNG 1 Systemaufbau eines Wasserstoffmotors mit Komponenten der Robert Bosch GmbH ©Bosch [10]



- | | | | |
|----|--|----|---|
| 1 | Engine control unit | 20 | Ambient humidity / T sensor |
| 2 | H ₂ safety sensor | 21 | EGR p/T sensor |
| 3 | Phase sensor | 22 | EGR valve |
| 4 | Engine temperature sensor | 23 | EGR mixer |
| 5 | Knock sensor | 24 | Exhaust temperatures sensors |
| 6 | Speed sensor | 25 | Waste gate |
| 7 | Oil p/T sensor | 26 | Brake flap |
| 8 | NO _x sensor | 27 | Electronic dump valve |
| 9 | Differential pressure sensor | 28 | H ₂ gas tank with integrated tank valve and p/T sensor |
| 10 | AdBlue dosing module | 29 | H ₂ filter |
| 11 | Boost p/T sensor | 30 | Pressure regulator block |
| 12 | Pressure-based air flow meter | 31 | H ₂ filling receptacle |
| 13 | Throttle valve | 32 | Crank case ventilation with pressure sensor |
| 14 | Manifold p/T sensor | 33 | Explosion relief valve (opt.) |
| 15 | H ₂ high-pressure sensor | | |
| 16 | H ₂ low-pressure p/T sensor | | |
| 17 | H ₂ rail with injectors | | |
| 18 | Ignition coils, spark plugs | | |
| 19 | H ₂ storage control unit | | |

Über den Grundmotor hinaus sind speziell die Luft- und Kraftstoffzuführung, das Zündsystem, die Aufladung und Abgasnachbehandlung sowie die Sensorik zur Erkennung des Betriebszustands an den Primärbetrieb mit Wasserstoff anzupassen. Zusätzlich ist die Software der Motorsteuerung an die neuen oder geänderten Komponenten sowie an die neuen Betriebsbedingungen anzupassen und es sind entsprechende Betriebskennfelder zu erstellen [11]. Eine schematische Übersicht zum Systemaufbau und zu den Komponenten an einem Wasserstoffmotor ist in Abbildung 1 und in [12] dargestellt. Zu erkennen sind der Grundmotor (mittig, grau) mit der Frischluftzuführung (A, grün) und der Abgasabführung (E, rot), verbunden mittels Abgasturbolader (oben rechts). Das Tanksystem (unten links, gelb) mit den zugehörigen Ventilen und Sicherheitsfunktionen bildet ein eigenständiges System, wohingegen die Kraftstoffzuführung mittels Saugrohreinblasung und/oder Direkt-einblasung (17) zu den Motorkomponenten zählt und über das Motorsteuergerät (oben links) geregelt wird. Zusätzlich zu sehen sind das Zündsystem (18) und die Abgasnachbehandlung (unten rechts) sowie Sensoren für die Überwachung und Regelung des Motorbetriebs.

2.3.2 Brennverfahren

Die theoretische und experimentelle Forschung zu den Grundlagen der Wasserstoffverbrennung wird in vielen Veröffentlichungen beschrieben. Berechnungen und experimentelle Daten zu den Reaktionsmechanismen und der Reaktionskinetik, der Flammenausbreitung und der Flammengeschwindigkeit sind in [13] enthalten. Gerke [14] untersuchte die theoretischen Reaktionsmechanismen und die Flammengeschwindigkeit unter verbrennungsmotorischen Bedingungen und wies dies experimentell nach. Auf eine detaillierte Auswertung der Publikationen wird hier verzichtet.

In den ausgewerteten Publikationen wird zumeist von einem fremdgezündeten Brennverfahren – dies ist bei Gasmotoren der aktuelle Stand der Technik – ausgegangen und dieses in den bekannten Prototypenaufbauten experimentell umgesetzt. Weiterhin wird die schnelle Verbrennung von Wasserstoff (basierend auf der höheren Flammengeschwindigkeit) hervorgehoben, was zu einer Annäherung des realen Verbrennungsprozesses an den wirkungsgradgünstigeren Otto-Kreisprozess führt.

Fremdzündung (Otto-Brennverfahren)

Die Fremdzündung des Luft-Kraftstoff-Gemischs bietet die Möglichkeit, unabhängig von der Verdichtung und dem Zeitpunkt der Kraftstoffeinblasung die Verbrennung zu initiieren. Dies bringt Vorteile hinsichtlich einer besseren homogenen Gemischbildung und einer lastabhängigen Steuerung der Verbrennung mit sich. Zur Zündung wird eine Zündkerze verwendet, die direkt in den Brennraum hineinragt und aus den Benzinmotoren bzw. Gasmotoren bekannt ist. Da Standardzündkerzen eine hohe Zündenergie bereitstellen, kann das Wasserstoff-Luft-Gemisch in jedem Betriebspunkt sicher gezündet werden. Untersuchungen zum Einfluss der Zündkerze auf die Verbrennung gibt es in der ausgewerteten Literatur nicht hinreichend. Unter Berücksichtigung der minimalen Zündenergie von Wasserstoff, die um den Faktor 10 kleiner ist als bei Benzin oder Erdgas (vgl. Tabelle 1), und der weiten Zündgrenzen besteht zudem die Frage, welches Zündverfahren (beispielsweise direkte Zündung mittels Lichtbogen, Corona- oder Vorkammerzündung oder indirekt mittels Glühstift) die Verbrennung optimal einleitet.

Die Anpassung des Vorkammerzündverfahrens aus dem Gasmotor auf den Betrieb mit Wasserstoff wurde in [15] erforscht. Es wird eine neue Zündkerze für das Vorkammerverfahren vorgestellt, die das Kraftstoff-Luft-Gemisch effizienter zündet und zu einer Reduktion der Stickoxidemissionen während der Verbrennung führt gegenüber einer Standardzündkerze für die Erdgasanwendung. Einen Vergleich zu Zündverfahren ohne Vorkammer und Rückschlüsse auf die Optimierung der Kerze lässt die Publikation nicht zu.

Selbstzündung (Diesel-Brennverfahren)

Die chemischen Eigenschaften von Wasserstoff erlauben auch den Einsatz von selbstgezündeten Brennverfahren im Motor. Speziell die geringe minimal notwendige Zündenergie und die weiten Zündgrenzen begünstigen die Selbstzündung, die hohe Entzündungstemperatur behindert dies jedoch (vgl. Tabelle 1). Den Einsatz eines Dieselmotors in Wasserstoffmotoren konnten Prechtl und Dorer [16] experimentell nachweisen. Auch Spuller [8] konnte theoretisch und experimentell die Machbarkeit eines Diesel- und HCCI-Brennverfahrens⁵ am Versuchsmotor nachweisen. Allerdings sind für die sichere Selbstzündung von Wasserstoff bei unter einer Millisekunde Zündverzögerung Verdichtungsendtemperaturen über 1.100 K notwendig [16]. Dies erfordert neben dem hohen Verdichtungsverhältnis zusätzlich eine starke Erwärmung der Ansaugluft. Die notwendigen hohen Gemischtemperaturen für eine kontrollierte Selbstzündung konnten ebenso verschiedene Studien nachweisen, gesammelt dargestellt in [13, S. 125]. Auch das HCCI-Brennverfahren ist

⁵ HCCI: Homogeneous Charge Compression Ignition – Homogene Kompressionszündung, bei der die Verbrennung eines homogenen Gemischs infolge sehr hoher Verdichtung gleichzeitig im gesamten Brennraum erfolgt
Quelle: <https://www.hs-karlsruhe.de/genlab/forschungsprojekte/hcci>, abgerufen am 03.11.2020

nicht ohne zusätzliche Ansaugluftvorwärmung möglich. Bei beiden Brennverfahren besteht zudem die Beschränkung der Last nach oben durch Klopfen (unkontrollierte Selbstzündung verteilt im ganzen Brennraum). Spuller kommt zu dem Ergebnis, dass ein selbstgezündetes Wasserstoffbrennverfahren aufgrund der hohen geforderten Temperaturen zum Zündzeitpunkt nicht für den automotiven Einsatz geeignet ist [8].

Weitere Brenn-/Zündverfahren

Zu den verschiedenen Brennverfahren für reinen Wasserstoff geben Yip et al. [17] eine gute Übersicht. Sie zeigen zudem eine weitere Zündmethode mittels Pilotinjektion von Diesel- oder Erdgaskraftstoffen (Pilot-Fuel-Ignited), bei der der kohlenstoffhaltige Kraftstoff sich selbst entzündet und die Verbrennung des Wasserstoffs initiiert.

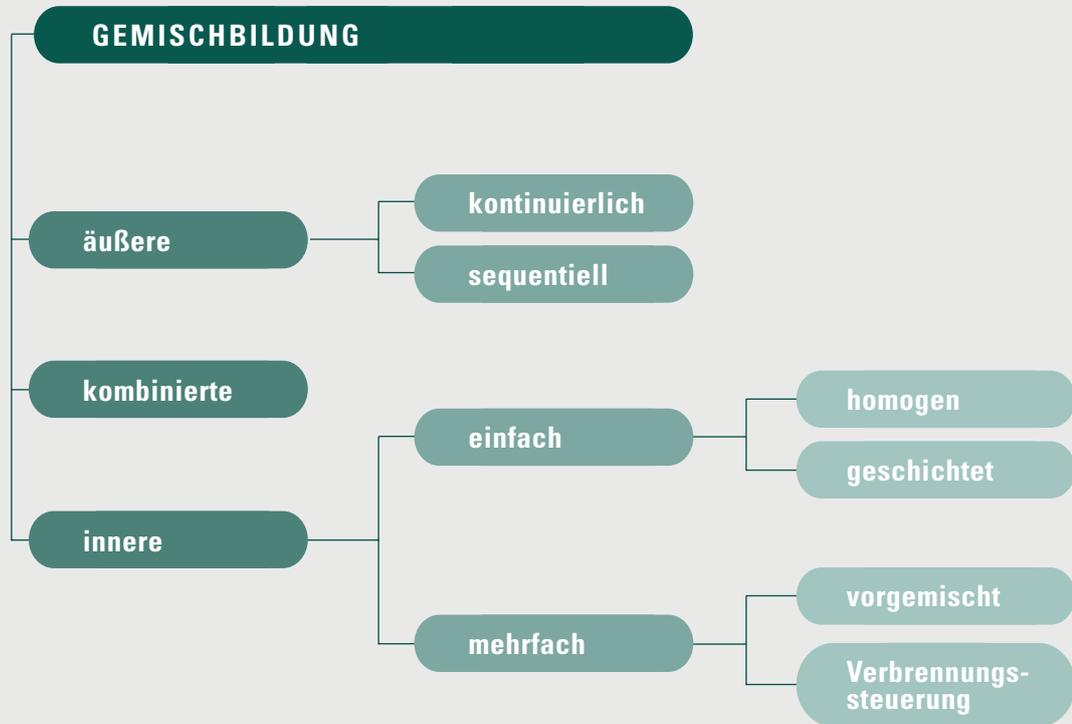
2.3.3 Gemischbildung und Injektoren

Die Gemischbildung wird in der ausgewerteten Literatur als wichtigster Einflussfaktor für Leistung, Wirkungsgrad und Emissionen genannt und zeigt die größten Unterschiede in Aufbau und Funktionsweise der Motoren.

Grundsätzlich wird zwischen zwei Gemischbildungsvarianten unterschieden: der äußeren Gemischbildung mittels Saugrohreinblasung (Port Fuel Injection – PFI) und der inneren Gemischbildung mittels Direkteinblasung (Direct Injection – DI). Abbildung 2 zeigt die Einteilung nach Grabner/Eichlseder mit weiterer Unterteilung in die Arbeitsweise der Einblssysteme. Zusätzlich wird als kombiniertes Verfahren die Zusammensetzung aus äußerer und innerer Gemischbildung bezeichnet. Zu diesem Verfahren zählt auch das Dual-Fuel-Brennverfahren mit zwei unterschiedlichen Kraftstoffen, bei dem Wasserstoff im Saugrohr eingebracht und mittels eines Dieselizeündstrahls im Brennraum entzündet wird [1, S. 205].

Die äußere Gemischbildung wird weiterhin in kontinuierlich (eine Zuführung in die angesaugte Luft für den gesamten Motor) und sequenziell (bedarfsgerecht pro Zylinder) arbeitende Systeme unterteilt. Bei Direkteinblasung kann der Kraftstoff mit einem oder mehreren Pulsen pro Arbeitsspiel zugeführt werden, wodurch sich signifikante Unterschiede in der Ladungszusammensetzung realisieren lassen, zum Beispiel Einblasung eines Teils des Kraftstoffs während der laufenden Verbrennung (Verbrennungssteuerung) [1, S. 205].

ABBILDUNG 2 Einteilung der Gemischbildungsverfahren [1, S. 205]

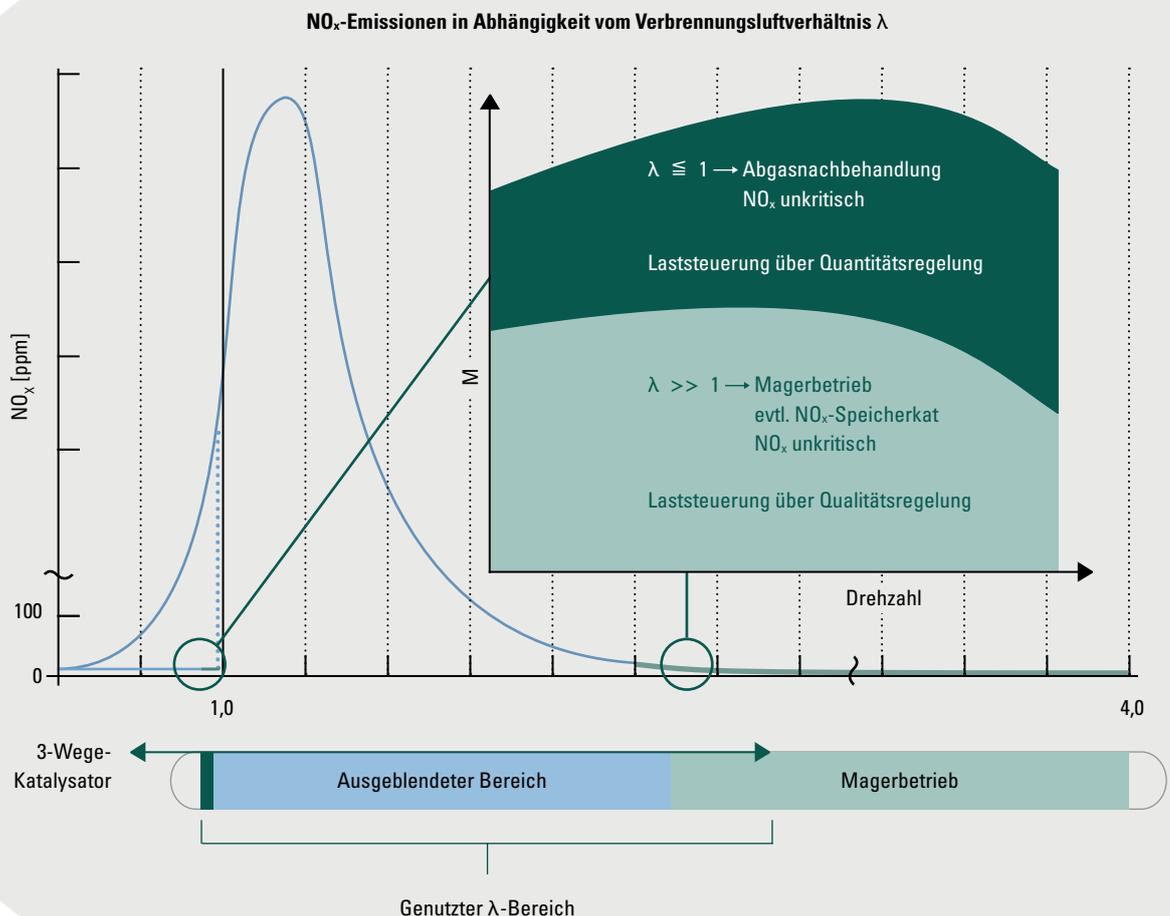


Das Leistungspotenzial von Motoren mit innerer und äußerer Gemischbildung unterscheidet sich bei der Wasserstoffanwendung sehr stark, was Abbildung 3 veranschaulicht. Die konventionelle äußere Gemischbildung erreicht aufgrund der geringen Dichte von gasförmigem Wasserstoff und der damit einhergehenden großen Verdrängung von Frischluft nur einen niedrigen Gemischheizwert. Erst bei Nutzung kryogener Wasserstoffspeicher und der Einblasung von sehr kaltem Wasserstoff vor dem Zylinder lassen sich Gemischheizwerte vergleichbar mit denen des Dieselmotors ($3,77 \text{ MJ/m}^3$, vgl. Tabelle 1) erreichen. Somit ist es möglich, die Leistungsdichte des saugrohreinblasenden Wasserstoffmotors an Otto- oder Dieselmotoren anzugleichen [1, S. 208]. Mittels gesteuerter Direkteinblasung lässt sich ein deutlich höherer Gemischheizwert erzeugen, der theoretisch 20 % über dem Gemischheizwert eines Dieselmotors liegt (vgl. Tabelle 1). Im Vergleich unter optimalen Bedingungen kann somit ein Wasserstoffmotor mit Direkteinblasung eine höhere Leistungsdichte als ein Dieselmotor gleicher Größe erreichen.

metrischem Luftverhältnis ($\lambda = 1$) bis zu sehr magerem Gemisch mit $\lambda = 4$, und bei der Lastregelung auch die Reduzierung der Abgasemissionen berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.3.5).

Nachteile dieser Gemischbildung ergeben sich zum einen aus der geringen Dichte von Wasserstoff, da bei der Einblasung im Saugrohr viel Frischluft verdrängt wird. Dies kann durch eine stärkere Aufladung ausgeglichen werden, da aufgrund des höheren Luftdrucks eine größere Gemischmasse in den Zylinder gelangt und den Leistungsnachteil ausgleicht. Zum anderen kann es an heißen Teilen im Brennraum (beispielsweise am Abgasventil oder an der Zündkerze) zur vorzeitigen Entzündung kommen, was zu einer Verbrennung des Gemischs im Saugrohr (als Rückzündung bezeichnet) oder einer Verbrennung vor der eigentlichen Zündung (Frühzündung) führt. Da diese beiden Anomalien mit steigender Gemischtemperatur häufiger auftreten, ist die Frischluftaufladung begrenzt [1, S. 210f].

ABBILDUNG 4 Betriebsstrategie des BMW Hydrogen 7 [4]



Die Einblasung von tiefkaltem Wasserstoff (bei kryogener Speicherung) reduziert die Nachteile der äußeren Gemischbildung, da die Gemischtemperatur deutlich gesenkt wird. Rück- oder Frühzündungen können damit verringert werden und die Gemischdichte steigt an, wodurch eine theoretische Leistungsdichte äquivalent zum Dieselmotor möglich ist. Nachteilig wirkt sich die Einblasung von Wasserstoff bei Temperaturen von 40 K bis 80 K (-233 °C bis -193 °C) auf die Materialien des Injektors und des Saugrohrs aus, da diese den hohen Temperaturschwankungen standhalten müssen [1, S. 208].

Innere Gemischbildung mit Direkteinblasung

Bei der inneren Gemischbildung erfolgt das Einbringen des Kraftstoffs direkt in den Brennraum. Die Konzepte der direkten Einblasung werden anhand der Anzahl der Einblaspulse pro Arbeitszyklus in Einfach- und Mehrfacheinblasung sowie anhand des Zeitpunkts in frühe (homogene Ladung) und späte (geschichtete Ladung) Einblasung unterteilt. Die Versorgungsdrücke für die innere Gemischbildung sind gegenüber der äußeren Gemischbildung höher, da während und nach der Kompression oder auch während der Verbrennung der Kraftstoff zugeführt wird. Dabei sind Einblasdrücke von 10 bar bis 40 bar bei früher Einblasung noch aus Druckspeichern realisierbar. Eingeschränkt ist dies auch bei später Einblasung mit mindestens 50 bar noch möglich, bei höherer Verdichtung und der Einblasung während der Verbrennung (100 bar bis 300 bar) ist der Einsatz einer Hochdruckpumpe notwendig [1, S. 212].

Der Vorteil der inneren Gemischbildung liegt in der erreichbaren Leistungsdichte, die aufgrund des höheren Gemischheizwerts theoretisch über der Leistungsdichte eines Dieselmotors liegen kann. Zudem können die bei äußerer Gemischbildung auftretenden Rückzündungen ausgeschlossen und auch Frühzündungen durch die späte Einblasung minimiert werden. Der Betriebspunkt des Motors kann mit vielen freien Parametern gesteuert werden, der Magerbetrieb wird qualitativ (kraftstoffmengengesteuert) über die Einblasdauer bzw. die Anzahl der Einblasungen geregelt und im Vollastbetrieb wird quantitativ (Luftmengengesteuert) über die Drosselung der Frischluftzufuhr das stöchiometrische Luftverhältnis zur Reduzierung der Emissionen eingestellt. Als zentraler Einflussfaktor für eine optimale innere Gemischbildung und Verbrennung wird der Einblaszeitpunkt genannt. Für geringe Motorlasten bis hin zum Leerlauf sehen sowohl Klell et al. [1] als auch Verhelst und Wallner [18] die homogene magere Gemischbildung ($\lambda \geq 2$) mit früher Einblasung als vorteilhaft, wohingegen für hohe Lasten bis zur Vollast eine späte Einblasung mit stöchiometrischer bis lokal fetter Gemischbildung ($\lambda \leq 1$, Ladungsschichtung) effizienter ist.

Verschiedene Konzepte zur Einblasstrategie bei innerer Gemischbildung zeigen Klell et al. [1, S. 218ff]. Es werden dabei verschiedene Einblaszeitpunkte verglichen und Möglichkeiten für eine Ladungsschichtung dargestellt. Ebenso wird eine Wasserstoffeinblasung während der Verbrennung diskutiert, die kleinere Druckerhöhungen und geringere Spitzendrücke im Zylinder zur Reduktion der Bauteilbelastungen sowie deutlich reduzierte Abgasemissionen erzielt.

Injektoren

Kritische Bauteile für den Betrieb von Wasserstoffmotoren sind die Wasserstoffinjektoren. Für die Saugrohreinspritzung sind die Anforderungen hinsichtlich thermischer Belastung, Kraftstoffdruck und Öffnungszeiten gering. Es können aus den Erdgasmotoren bekannte Injektoren an den Betrieb mit Wasserstoff angepasst werden und stehen schnell zur Verfügung.

Die Direkteinspritzung stellt deutlich höhere Anforderungen an geeignete Injektoren. Hofherr et al. [2, S. 527] und Verhelst und Wallner [18] definieren die Anforderungen wie in Tabelle 2 dargestellt. Weiterhin sind in [2, S. 529ff] verschiedene Injektor-konzepte und praktische Ausführungen beschrieben.

TABELLE 2 Anforderungen an Hochdruckinjektoren für Wasserstoffdirekteinspritzung

Parameter	Werte – Hofherr et al. [2]	Werte – Verhelst und Wallner [18]
Maximaler Einblasdruck	bis 300 bar	bis 300 bar
Einblasdauer	bis 3 ms	0,1 ms bis 3 ms
Pulse pro Zyklus	≥ 2	–
Einblasmengenverhältnis	20 (von Leerlauf zu Volllast)	–
Maximaler Leckage	< 1 g/h	0,1% des maximalen Durchflusses
Temperatur an Injektorspitze	–	300 – 400 °C
Haltbarkeit	–	1.000 – 20.000 h

Nach Aussagen der Robert Bosch GmbH sind Injektoren für die Saugrohreinspritzung bereits verfügbar, die Direkteinspritzinjektoren befinden sich noch in der Erstbemusterung bzw. Vorserienentwicklung. Die größten Probleme bestehen in der Haltbarkeit

des Dichtsitzes an der Injektornadel, da durch die hohen Öffnungs- und Schließgeschwindigkeiten und die fehlende Schmierung die Oberflächen schnell verschleifen und damit undicht werden [10].

2.3.4 Aufladung und Abgasrückführung

Die Leistungsdichte von Wasserstoffmotoren wird ebenso wie bei modernen Otto- und Dieselmotoren durch eine Aufladung gesteigert. Ein Verdichter in Verbindung mit einem Ladeluftkühler erhöht die Dichte der zugeführten Luft im Brennraum, wodurch mehr Kraftstoff eingebracht und mehr Energie bei der Verbrennung freigesetzt werden kann. Für eine Aufladung mittels Abgasturbolader, der die notwendige Verdichtungsleistung aus dem Abgas des Motors erhält, muss die Geometrie der Turbine nach Koch et al. [6] an die teilweise deutlich geringere Abgasenergie eines Wasserstoffmotors angepasst werden. Aufgrund der schnellen Verbrennung von Wasserstoff und des Magerbetriebs im Teillastbereich sind die Abgastemperaturen und der Abgasdruck niedriger als bei einem Ottomotor im gleichen Betriebspunkt. Dies bringt Vorteile hinsichtlich der Lebensdauer, da die thermischen Belastungen geringer sind. In [6] werden vier Aufladekonzepte verglichen, wobei die Aufladung mit variabler Turbinengeometrie (VTG) bevorzugt wird.

Ebenso wie die Aufladung ist die Abgasrückführung eine aus Otto- und Dieselmotoren bekannte Technik. Dabei wird Abgas vor oder nach dem Turbolader in das Saugrohr geführt, um mittels Sauerstoff- und Temperaturreduktion während der Verbrennung die schädlichen Abgasemissionen zu senken. Verhelst [19] und Koch et al. [6] beschreiben den positiven Einfluss der Abgasrückführung auf die Stickoxidbildung. Messungen am Einzylinder-Versuchsmotor in [20, S. 70ff] zeigen, dass eine nahezu vollständige Reduzierung der Stickoxidemissionen bei Abgasrückführungsraten von bis zu 30 % der Zylinderladung möglich ist. Die Rückführungsrate ist dabei abhängig vom Betriebspunkt und Luftverhältnis. Weiterhin zeigen Versuche den positiven Einfluss der Abgasrückführung auf das Klopfverhalten und den Verbrennungsverlauf [6].

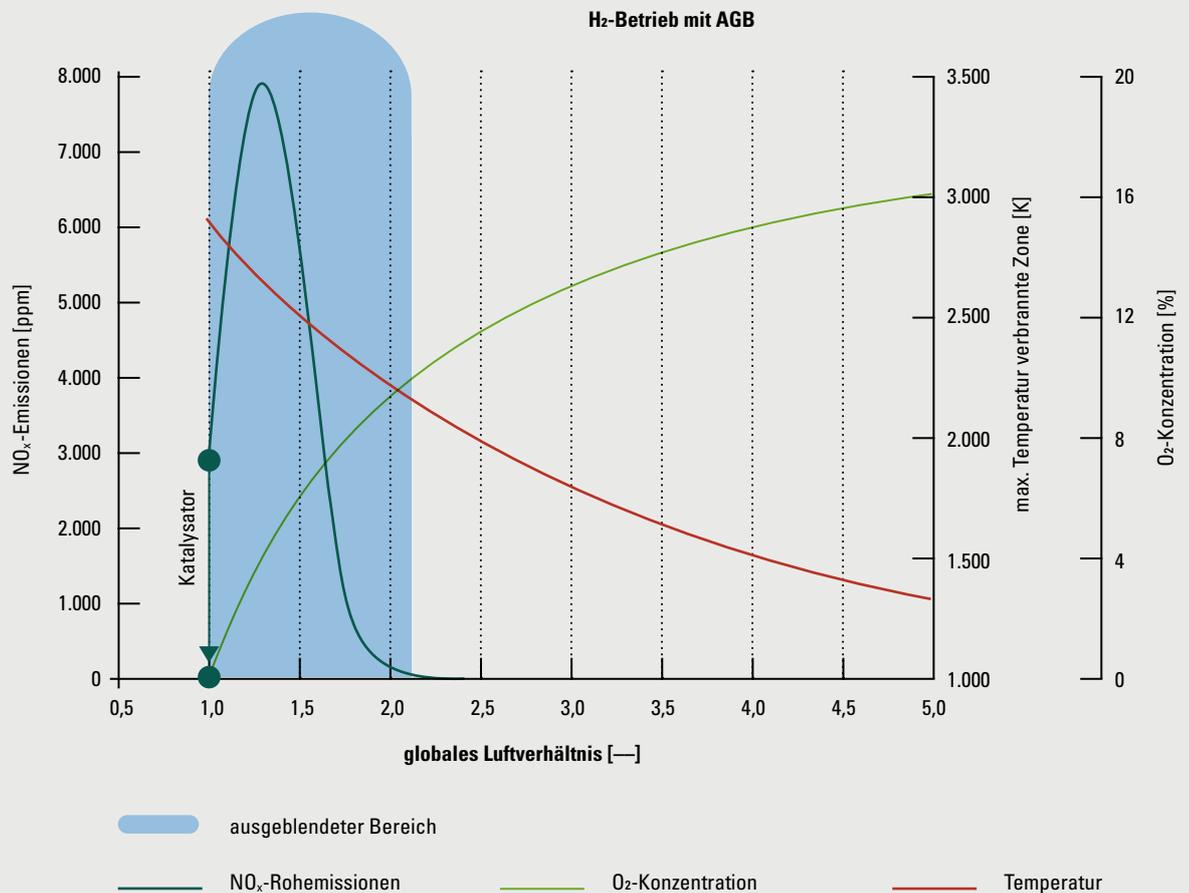
2.3.5 Emissionen und Abgasnachbehandlung

Bei der motorischen Verbrennung von Wasserstoff entsteht primär Wasserdampf. Dieser wird nicht als schädlich betrachtet und entsteht auch bei der Verbrennung von Otto- oder Dieselmotoren. Sowohl Klell et al. [1] als auch Verhelst und Wallner [18] geben Stickoxide (NO_x) als wesentlichen Schadstoffanteil bei der Wasserstoffverbrennung an. Zusätzliche kohlenstoffhaltige Abgase entstehen aus der Verbrennung von Motorölrückständen an der Zylinderwand oder aus der Kurbelge-

häuseentlüftung. Fouquet [20] konnte am Beispiel des BMW Hydrogen 7 nachweisen, dass die kohlenstoffhaltigen Emissionen sehr gering sind und deutlich unter den weltweit zulässigen Grenzwerten liegen, aber nicht bei 0 g/km.

Die Entstehung von Stickoxiden während der Verbrennung ist nach [1] auf hohe Temperaturen während der Verbrennung und einen Überschuss an Sauerstoff zurückzuführen. Nach Fouquet [20] beginnt die Stickoxidbildung ab Temperaturen von 1.800 K. In Abbildung 5 wird ersichtlich, dass bei Luftverhältnissen zwischen $\lambda = 1$ und $\lambda = 2,2$ die NO_x -Entstehung während der Verbrennung deutlich zunimmt. Ausgehend vom mageren Betrieb steigen ab Verbrennungstemperaturen von 2.200 K bei einem Luftverhältnis von $\lambda = 2,2$ die Stickoxidemissionen bis zu einem Maximalwert bei $\lambda = 1,2$ an. Danach sinken die Emissionen bis hin zum stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$), da der verfügbare Sauerstoff für die Reaktion sinkt.

ABBILDUNG 5 NO_x -Emissionen bezogen auf das Luftverhältnis bei der Verbrennung eines homogenen Gemischs mit äußerer Gemischbildung [1]



Für direkteinblasende Motoren hat nach [17] neben dem Luftverhältnis auch der Einblaszeitpunkt Einfluss auf die Stickoxidemissionen. Bei geringen und mittleren Lasten steigen die Emissionen durch eine späte Einblasung an, da es nicht zu einer homogenen Gemischbildung kommt, wodurch heiße Zonen mit hoher NO_x -Bildung entstehen. Im Gegensatz dazu sinken die Emissionen signifikant bei hohen Lasten und später Einblasung, da es in der Einblaszone zu stöchiometrischer und in den anderen Bereichen zu magerer Verbrennung mit geringer NO_x -Bildung kommt.

Auch Verhelst und Wallner stellen in [18, S. 62] Betriebsstrategien für geringe NO_x -Emissionen vor, die bei niedrigen Lasten und im Leerlauf auf magere Gemischbildung setzen und ohne Abgasnachbehandlung auskommen. Im mittleren und hohen Lastbereich sind eine stöchiometrische Gemischbildung mit Drosselung und Abgasnachbehandlung oder eine verstärkte Aufladung mit gleichzeitig magerer Gemischbildung ohne Abgasnachbehandlung möglich.

Für die Abgasnachbehandlung können verschiedene Systeme zum Einsatz kommen. Eine Abgasnachbehandlung ist nach [20] bei unterstöchiometrischem Betrieb ($\lambda < 1$) bereits mit einem 3-Wege-Katalysator aus dem Ottomotor möglich, da im Abgas vorhandener Wasserstoff die Stickoxide reduziert. Bei Luftverhältnissen von $\lambda = 2,2$ und höher kann auf eine Abgasnachbehandlung verzichtet werden, da die Emissionen des Motors sehr gering sind. Das NO_x -Rohemissionskennfeld des Versuchsmotors von Keyou und Deutz in Abbildung 9 (unten rechts) verdeutlicht dies, da die Rohemissionen die EU-Grenzwerte Stufe V für mobile Arbeitsmaschinen von $0,40 \text{ g/kWh}$ unterschreiten. In weiten Bereichen des Kennfelds emittiert der Motor im stationären Magerbetrieb weniger als die Hälfte des Grenzwertes. Erst im dynamischen Betrieb ist eine Anfettung des Gemischs ($\lambda \leq 1,3$) für schnelle Lastwechsel notwendig und die Rohemissionen müssen mittels Abgasnachbehandlung reduziert werden [21].

Der NO_x -emissionsreiche Motorbetrieb zwischen $\lambda = 1$ und $\lambda = 2$ erfordert eine Abgasnachbehandlung mittels SCR-System⁶ oder muss gänzlich vermieden werden. SCR-Systeme mit AdBlue (Harnstoff-Lösung) sind in Nutzfahrzeugen bereits im Serieneinsatz. In [22] wird ein neuer DeNO_x -Katalysator vorgestellt, der Wasserstoff als Reduktionsmittel benutzt, welcher aus dem Tank zugeführt wird. Messungen im Labor und am Versuchsmotor zeigen eine Reduzierung der Stickstoffemissionen um bis zu 60 %. Im Vergleich dazu erreichen aktuelle SCR-Systeme in Dieselmotoren einen Reduktionsgrad von bis zu 90 %.

⁶ Selective Catalytic Reduction – selektive katalytische Reduktion unter Einsatz von AdBlue

Der Wasserstoffmotor wird bei der weltweiten Emissionsregulierung für Verbrennungsmotoren in die Kategorie mit den geringsten Emissionen eingeordnet. Das CARB (California Air Resources Board) des Bundesstaats Kalifornien in den USA, das aktuell die weltweit striktesten Emissionsregeln erlassen hat, stufte den BMW Hydrogen 7 als SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) ein [20, S. 49]. Nach Angaben der Behörde unterschritten die gemessenen Abgaswerte die der Emissionsstandards LEV III, welche in Tabelle 3 aufgelistet sind, deutlich.

TABELLE 3 Kaliforniens LEV-III-Emissionsstandards für die Kategorie SULEV [23]

Fahrzeugtyp	Emissions-kategorie	NMOG + NO _x	CO	HCHO	PM
		g/mi	g/mi	mg/mi	mg/mi
Pkws und leichte Trucks bis 3,856 t	SULEV30	0,030	1,0	4	3
	SULEV20	0,020	1,0	4	3
Leichte NFZ mit 3,856 bis 4,536 t	SULEV170	0,170	4,2	6	8
	SULEV150	0,150	3,2	6	8
Mittelschwere NFZ mit 4,536 bis 6,35 t	SULEV230	0,230	4,2	6	10
	SULEV200	0,200	3,7	6	10

Legende
 NMOG + NO_x – Nicht-Methan-organische Gase und Stickoxide
 CO – Kohlenstoffmonoxid
 HCHO – Formaldehyde
 PM – Partikelmasse

In Kalifornien kann der Hersteller bei der Zulassung von Fahrzeugen mit Wasserstoffmotoren zusätzliche Punkte für den Fahrzeugflottenanteil an Zero-Emission Vehicles (ZEV) erhalten. Unter den Bedingungen, dass ein Fahrzeug mit Wasserstoffmotor die SULEV-Standards und eine Mindestreichweite von 250 Meilen einhält, wird es als TZEV (Transitional Zero-Emission Vehicle, Übergangs-Null-Emissionen-Fahrzeug) eingestuft und erhält 0,75 Punkte bzw. mit Hybridisierung bis zu 1,25 Punkte. Im Vergleich bringt ein batterieelektrisches Fahrzeug mit 50 Meilen Reichweite 1 Punkt und ein Brennstoffzellenfahrzeug mit 350 Meilen bis zu 4 Punkte [24].

Für schwere Nutzfahrzeugmotoren sieht das CARB ebenso strenge NO_x-Grenzwerte vor (siehe Tabelle 4). In dieser Kategorie kann der Wasserstoffmotor von Keyou bereits in weiten Kennfeldbereichen NO_x-Rohemissionen von unter 0,1 g/kWh erreichen [6]. Der Einsatz einer Abgasnachbehandlung mittels H₂-DeNO_x-Katalysator [22] reduziert die NO_x-Emissionen nahezu im gesamten Kennfeld unter 0,1 g/kWh. Verglichen mit den Grenzwerten der Europäischen Union (siehe Abbildung 6) wird der Euro-VI-Grenzwert durch diese Werte um den Faktor 4 unterschritten.

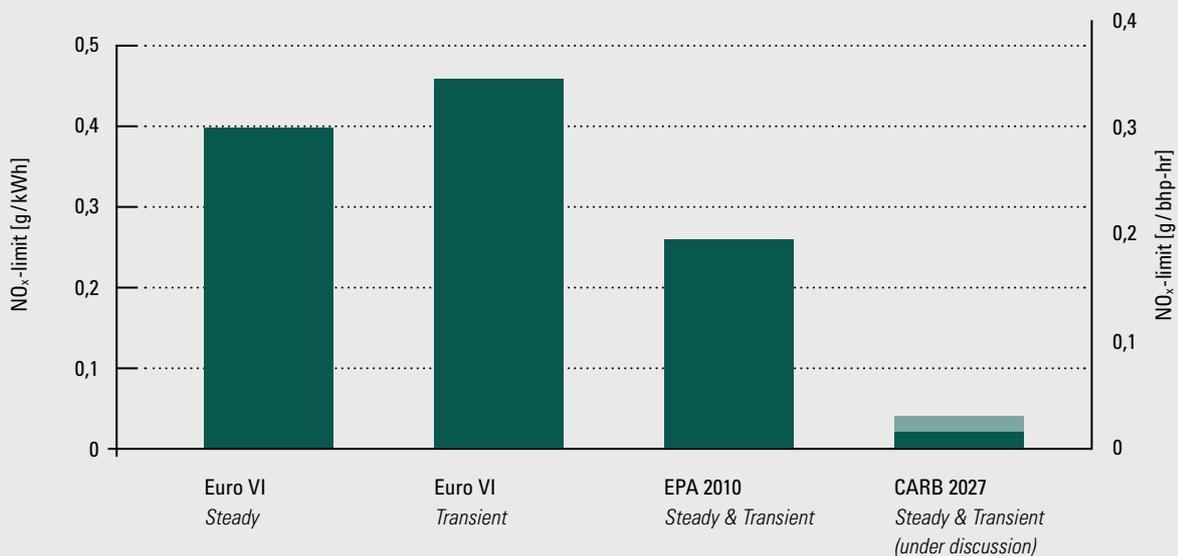
TABELLE 4 US EPA und Kaliforniens Emissionsstandards für schwere NFZ-Motoren [23]

Legende

^a NMHC – Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe

^b Optional: Hersteller können aus Kaliforniens Low-NO_x-Standards wählen

Einheit	CO	NMHC ^a	NO _x ^b	PM
g/bhp-hr (g/kWh)	15,5 (20,79)	0,14 (0,188)	0,10/0,05/0,02 (0,134/0,058/0,027)	0,01 (0,013)

ABBILDUNG 6 NO_x-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge in Europa und den USA [25]

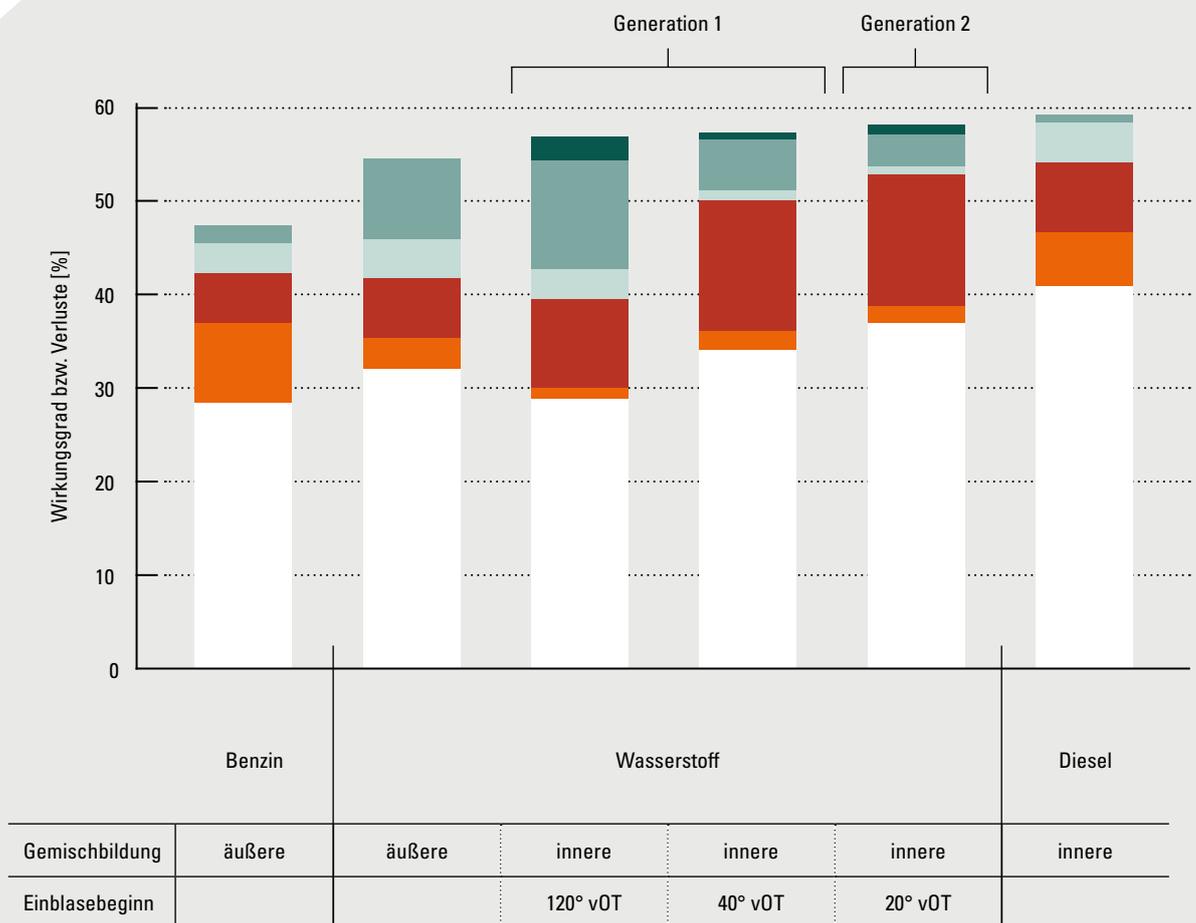
Zu anderen Motoremissionen, wie beispielsweise Wärmeabstrahlung und Geräuschen, gibt es keine Veröffentlichungen. Auf Basis der Eigenschaften von Wasserstoff mit einer schnelleren Verbrennung und höheren Druckanstiegsraten können die Geräusch- und Vibrationsabstrahlungen des Wasserstoffmotors höher (lauter) sein als bei einem vergleichbaren Dieselmotor.

2.3.6 Wirkungsgrad und Leistung

In den Veröffentlichungen gibt es vielfältige Angaben zum Wirkungsgrad und zur Leistung. Dabei muss beachtet werden, dass es sich um Angaben für Forschungs- und Versuchsmotoren handelt, die das technische Potenzial zeigen, aber noch keinen Serieneinsatz darstellen. In der Serienproduktion sind vor allem Robustheit,

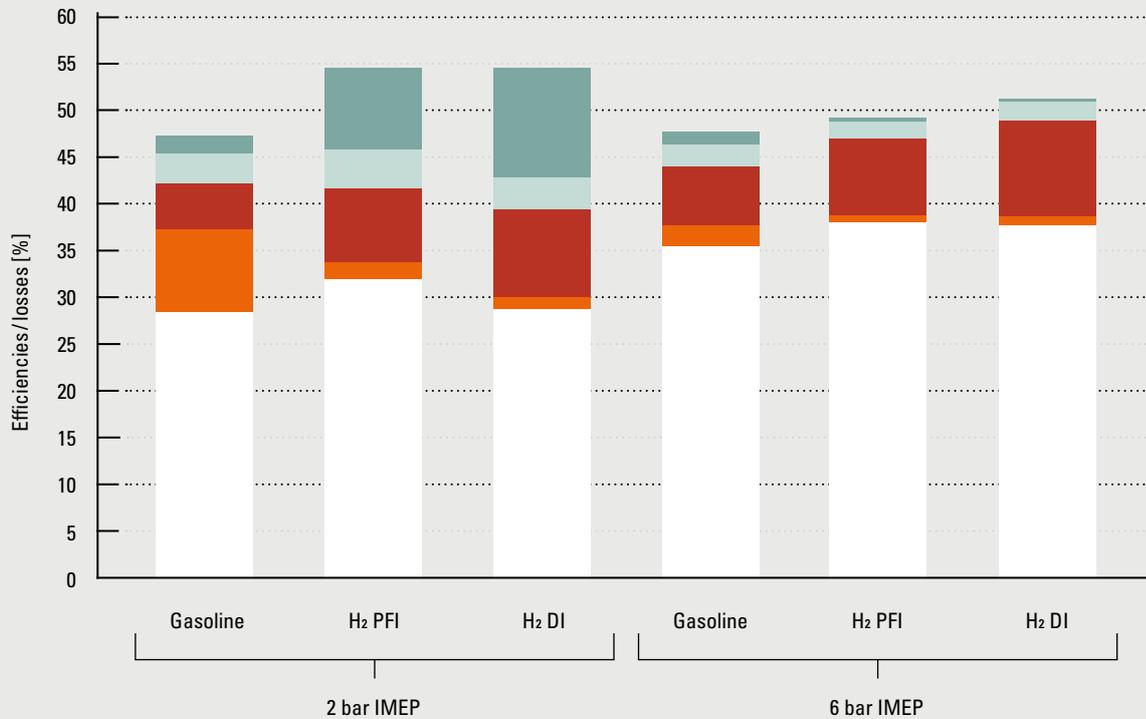
das heißt Funktionsfähigkeit auch unter harschen äußeren Bedingungen, lange Lebensdauer und niedrige Kosten wichtig. Diese Eigenschaften wirken sich zumeist negativ auf den Wirkungsgrad und die Spitzenleistung aus, womit im Serieneinsatz ein Kompromiss zwischen allen Kriterien zu finden ist. Wird nur die Verbrennung von Wasserstoff im Zylinder betrachtet, so gibt der thermodynamische Wirkungsgrad die maximale Effizienz eines Motors bei idealem Wärmeumsatz vor.

ABBILDUNG 7 Vergleich der Verlustleistungen und des Wirkungsgrads zwischen Otto-, Wasserstoff- und Dieselmotor [1]



- Verlust durch nicht ideale Einblasung
- Wandwärmeverlust
- $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$
- Verlust durch unvollkommene Verbrennung
- Ladungswechselverlust
- $p_i = 2 \text{ bar}$
- Verlust durch reale Verbrennung
- Indizierter Wirkungsgrad

ABBILDUNG 8 Vergleich der Verlustleistungen und des Wirkungsgrads zwischen Otto- und Wasserstoffmotor bei niedriger und mittlerer Last [18]



■ Incomplete combustion losses
■ Actual combustion losses
■ Wall heat losses

■ Gas exchange losses
■ Indicated thermal efficiency

$n = 2.000 \text{ min}^{-1}$

7 Bei Verdichtungsverhältnis 10:1 und Luftverhältnis $\lambda = 1$

8 Bei Verdichtungsverhältnis 19:1 und Luftverhältnis $\lambda = 5$

Spuller [8] errechnet dafür Werte zwischen 47 %⁷ und 65 %⁸, mit einem jeweils ansteigenden Verdichtungs- und Luftverhältnis. Von der idealen Verbrennung hin zum realen Energieumsatz am Kolben entstehen Verluste, die Klell et al. [1] und Hofherr et al. [2] in Abbildung 7 denen konventioneller Motoren gegenüberstellen.

Die vergleichende Darstellung zeigt die Motorprozessberechnung für einen niedrigen Lastpunkt bei verschiedenen Gemischbildungsverfahren an einem Wasserstoffmotor: äußere und innere homogene Gemischbildung (120° vOT) und die erste und zweite Generation für Ladungsschichtung. Ein ähnliches Bild zeigen die Messungen von Verhelst und Wallner [18] am Einzylinder-Versuchsmotor in Abbildung 8. Hier

9 IMEP – Indicated Mean Effective Pressure, induzierter effektiver Mitteldruck im Zylinder

werden ein Ottomotor (Gasoline) und zwei Wasserstoffmotoren mit homogener Gemischbildung (PFI und DI mit Einblasung bei 120° vOT) bei niedriger und mittlerer Last (2 bar und 6 bar IMEP⁹) verglichen. Die auffällig hohen Verluste bei niedriger Last durch die unvollkommene Verbrennung resultieren aus einem zu hohen Luftverhältnis ($\lambda = 5,3$), bei dem nicht alle Bereiche im Zylinder von der Flammenfront erreicht werden und unverbrannter Wasserstoff ins Abgas gelangt. Dies kann nach Darstellung von Klell et al. [1] durch die Ladungsschichtung bei später Einblasung verringert werden. Bei höheren Lasten und damit Luftverhältnissen von $\lambda < 4$ tritt die unvollständige Verbrennung nicht mehr auf.

Weiterhin fallen bei allen Wasserstoffmotoren die hohen Wandwärmeverluste auf. Sie treten verstärkt bei der Direkteinblasung auf, da die Ladung des Zylinders stark bewegt ist und die Wasserstoffverbrennung bis an die Brennraumwand heranreicht. So entsteht ein höherer Energieverlust durch die Kühlung der Brennraumwände. Bei Otto- und Dieselmotoren kann sich hingegen eine Sperrschicht bilden, in der keine Verbrennung stattfindet.

10 Indizierter Wirkungsgrad: Verhältnis zwischen mechanischer Leistung am Kolben und Kraftstoffeinsatz

Die Gaswechselverluste, als letzte aufgeführte Werte, sind bei Wasserstoffmotoren geringer, da die Luftzufuhr nicht gedrosselt werden muss, um eine stabile Verbrennung zu ermöglichen. Resultierend aus dem thermodynamischen Wirkungsgrad und den Verlusten folgt der indizierte Wirkungsgrad¹⁰, der in beiden Abbildungen besser ist als beim Ottomotor. Die Wirkungsgradanalysen zeigen, dass es beim Wandwärmeübergang und bei der Verbrennungsregelung weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt.

11 Effektiver Wirkungsgrad: Verhältnis zwischen abgegebener Leistung der Kurbelwelle und Kraftstoffeinsatz

Vollständige Wirkungsgradkennfelder für einen Wasserstoffmotor wurden von der Keyou GmbH in [5], [26] und [6] veröffentlicht. Die Publikation von 2019 (siehe Abbildung 9 unten links) zeigt den effektiven Wirkungsgrad¹¹ des auf reinen Magerbetrieb mit Saugrohrreinblasung optimierten Versuchsmotors, der in weiten Bereichen Werte von über 40 % erreicht. Der Motor leistet im Wasserstoffbetrieb maximal 210 kW bei 2.000 1/min, der Basis-Dieselmotor erreicht bis zu 250 kW bei 2.200 1/min.

ABBILDUNG 9 Leistungskurve und Wirkungsgrad-/NO_x-Rohemissionskennfeld des Deutz/Keyou TCG 7.8 Hz [6]

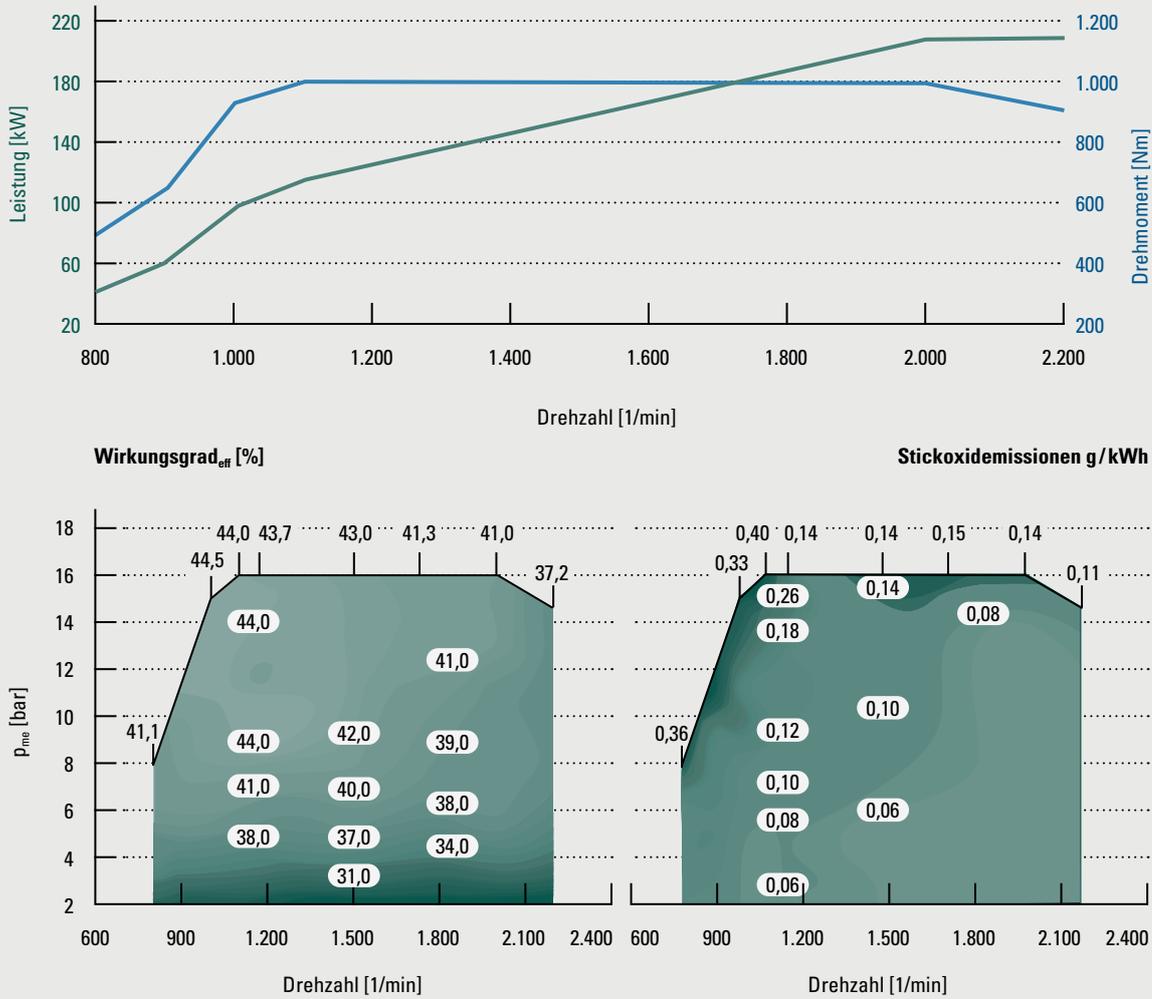


TABELLE 5 Übersicht zu Leistung und Wirkungsgrad von Wasserstoffverbrennungsmotoren

Hersteller / Institut	Motordaten*	Jahr	Max. Leistung (bei Drehzahl)	Spezifische Leistung	Max. effektiver Wirkungsgrad
Personenkraftwagen					
TU Graz [12]	R4, 2,0 l, Turbo, DI	2020	166 kW (5.000 1/min)	83 kW/l	–
TU Graz [12]	R4, 2,0 l, Turbo, PFI	2020	120 kW (5.000 1/min)	60 kW/l	–
TU Graz, Spuller [8]	1 Zylinder, 0,5 l, DI, Turbo, Glühstiftzündung	2011	33,33 kW (4.000 1/min)	66,67 kW/l	42 %
BMW Hydrogen 7 [4]	V12, 5,9 l, Turbo, PFI	2007	191 kW (5.100 1/min)	31,98 kW/l	–
Mazda RX-8 Hydrogen RE [1]	Wankelmotor, 2x 0,654 l, Sauger, DI	2004	81 kW (–)	61,93 kW/l	–
BMW 750 hL [27]	V12, 5,4 l, Turbo, PFI	2000	150 kW (5.800 1/min)	27,88 kW/l	–
Nutzfahrzeuge					
Deutz / Keyou [6]	R6, 7,8 l, Turbo, PFI	2019	210 kW (2.000 1/min)	26,92 kW/l 0,298 kW/kg	44,5 %
Deutz / Keyou [5]	R6, 7,8 l, Turbo, PFI	2018	180 kW (2.000 1/min)	23,08 kW/l	44 %
Deutz F1L511 / Newcastle University [28]	1 Zylinder, 0,825 l, Sauger, DI, Selbstzündung	2009	10,28 kW (2.100 1/min)	12,47 kW/l	–
MAN H ₂ -ICE Bus [3]	R6, 12,8 l, Turbo, DI	2006	200 kW (2.000 1/min)	15,63 kW/l	42 %
MAN H ₂ -ICE Bus [3]	R6, 12,8 l, Sauger, PFI	2006	150 kW (2.200 1/min)	11,72 kW/l	–

* Zylinderanzahl und -anordnung,
Hubraum, Aufladung, Einblasart,
ggf. abweichende Zündart

In Tabelle 5 ist eine Übersicht der Motoren der ausgewerteten Publikationen aufgeführt. Neben den ersten Versuchsträgern von MAN und BMW sind die Forschungsmotoren der TU Graz in Kooperation mit der Robert Bosch GmbH und der Universität Newcastle sowie die zwei Generationen des Versuchsmotors von Keyou aufgelistet. Da die Basismotoren aus unterschiedlichen Anwendungen – sowohl Pkws als auch Nutzfahrzeuge – stammen und auf den Wasserstoffbetrieb umgerüstet wurden, ergibt sich die große Varianz in der Zylinderanzahl und den Leistungen. Als Vergleichsbasis dient die auf den Hubraum bezogene spezifische Leistung. Bei

Betrachtung der Grundmotoren mit beiden Einblasarten, wie beispielsweise von der TU Graz oder MAN, ist die spezifische Leistung des saugrohreinblasenden Motors (PFI) geringer als beim jeweiligen direkteinblasenden Motor (DI). Im Vergleich mit modernen Pkw-Otto- und -Dieselmotoren, die im Durchschnitt eine spezifische Leistung zwischen 60 kW/l und 90 kW/l haben, erreichen die Motoren der TU Graz und Mazda bereits vergleichbare Werte. Beim Vergleich der NFZ-Motoren erreicht der Wasserstoffmotor von Keyou etwa 90 % der durchschnittlichen spezifischen Leistung von 30 kW/l der Dieselmotoren. Die Publikationen enthalten auch nur wenige Angaben zu den maximalen effektiven Wirkungsgraden, die alle über 40 % liegen.

2.4 Aktuelle Projekte, Entwicklungen und Prototypen

Der Wasserstoffmotor befindet sich derzeit noch in der industriellen Forschung und Entwicklung. Während der Erstellung der Studie waren keine laufenden öffentlich geförderten Projekte bekannt. Aufseiten der wissenschaftlichen Forschung ist die TU Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, an der Weiterentwicklung der Einblasverfahren und der Motorsteuerung in Kooperation mit der Robert Bosch GmbH beteiligt.

TABELLE 6 Entwicklungsstand der Industrie nach Recherche und Expertenaussagen [10], [21]

Unternehmen	Produkte im Bereich Wasserstoff	Aktueller Entwicklungsstand	Testbetrieb und Serienstart
MAN Truck & Bus SE	Wasserstoffmotoren für schwere Nutzfahrzeuge	Vorentwicklung	Testflotte in 2023/2024 im schweren NFZ-Segment
Keyou GmbH	Umrüstungssatz und Komponenten für Motoren	Vorentwicklung und Konzeptvalidierung	Testbetrieb ab 2021
Robert Bosch GmbH	Komponenten für Motoren	Vorentwicklung bei Injektoren und Serienvorbereitung für andere Komponenten	Serienstart frühestens ab 2025
Liebherr Machines SA	Wasserstoffmotoren für Baumaschinen	Vorentwicklung	Testbetrieb ab Ende 2025
Deutz AG	Wasserstoffmotoren für Landwirtschafts- und Baumaschinen	Vorentwicklung	Testbetrieb nach ca. 2,5 Jahren und Serienstart nach 4 Jahren – beides ab Förderzeitpunkt

Die industrielle Entwicklung betreiben intensiv die Unternehmen MAN Truck & Bus SE und die Robert Bosch GmbH sowie die Keyou GmbH. Der aktuelle Entwicklungsstand wurde auf Basis der Aussagen von Experten der beteiligten Unternehmen in Tabelle 6 zusammengestellt. Gemeinsam ist allen Aussagen, dass sich die Entwicklung noch in einem frühen Stadium befindet. Erste Fahrzeugtests mit Wasserstoffmotoren sind von Keyou für das Jahr 2021 geplant, die meisten Fahrzeughersteller sehen den Beginn eines Flottentests ab Mitte des Jahrzehnts.

Verschiedene Hersteller haben in den vergangenen Jahren bereits Erfahrungen im Betrieb von Wasserstoffmotoren aufbauen können. Wie in Tabelle 7 ersichtlich, konnte BMW mit einer ersten Flotte von 15 Fahrzeugen zur EXPO 2000 [27] und in den folgenden Jahren sowie ab 2007 mit einem weiterentwickelten Modell Erfahrung sammeln [4]. Im Jahr 2009 wurden die Versuche und die Entwicklung eingestellt. Seitdem entwickeln ehemalige Mitarbeiter von BMW bei der Keyou GmbH die Technologie weiter. Der vorgestellte Motor von Keyou in Kooperation mit der Deutz AG läuft bisher auf dem Motorprüfstand.

TABELLE 7 Prototypen mit Straßenzulassung

Unternehmen	Prototypen	Daten	Betriebszeit
MAN Truck & Bus SE [3]	MAN Saugmotor (H 2876 UH01)	6-Zylinder-Reihenmotor 12,8 l Hubraum 150 kW (760 Nm)	2006 – 2015 HyFLEET:CUTE und Weiterbetrieb bei den BVG (Berliner Verkehrsbetriebe)
	MAN Turbomotor (H 2876 LUH01)	6-Zylinder-Reihenmotor 12,8 l Hubraum 200 kW (1.100 Nm)	2006 – 2009 HyFLEET:CUTE
BMW AG [4]	Hydrogen 7 (bivalent mit H ₂ und Benzin)	12-Zylinder-V-Motor 5,97 l Hubraum 191 kW (390 Nm)	2007 – 2009 Feldversuch in Berlin
BMW AG [27]	750 hL (bivalent mit H ₂ und Benzin)	12-Zylinder-V-Motor 5,38 l Hubraum 150 kW (300 Nm)	2000 – 2004 Feldversuch in Berlin
Mazda [1]	RX-8 Hydrogen (bivalent mit H ₂ und Benzin)	2-Scheiben-Wankelmotor 2 x 0,654 l Hubraum 81 kW (140 Nm)	2004
ohne Zulassung			
Keyou GmbH / Deutz AG [6]	Deutz TCG 7.8 H ₂	6-Zylinder-Reihenmotor 7,8 l Hubraum 210 kW (1.100 Nm)	2018/2019

Erste Nutzfahrzeugerfahrung sammelte MAN bereits 1996 mit der Umrüstung von Bussen auf Wasserstoffmotoren. Von 2006 bis 2009 waren 14 Busse (4 x PFI und 10 x DI) im Projekt HyFLEET:CUTE [3] im Einsatz. Bei den Bussen mit direkteinblasenden Motoren traten Defekte im Kraftstoffsystem und bei den Injektoren auf, weshalb diese Busse häufig ausfielen und nach Ablauf der Projektdauer nicht weiterbetrieben wurden. Die vier Busse mit Saugmotoren wurden von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) noch bis 2015 ohne wesentliche technische Defekte weiterbetrieben [29]. Am 19.10.2020 hat MAN in der Zero-Emission-Roadmap¹² einen Flottenbetrieb von schweren Nutzfahrzeugen mit Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen ab 2023/24 angekündigt.

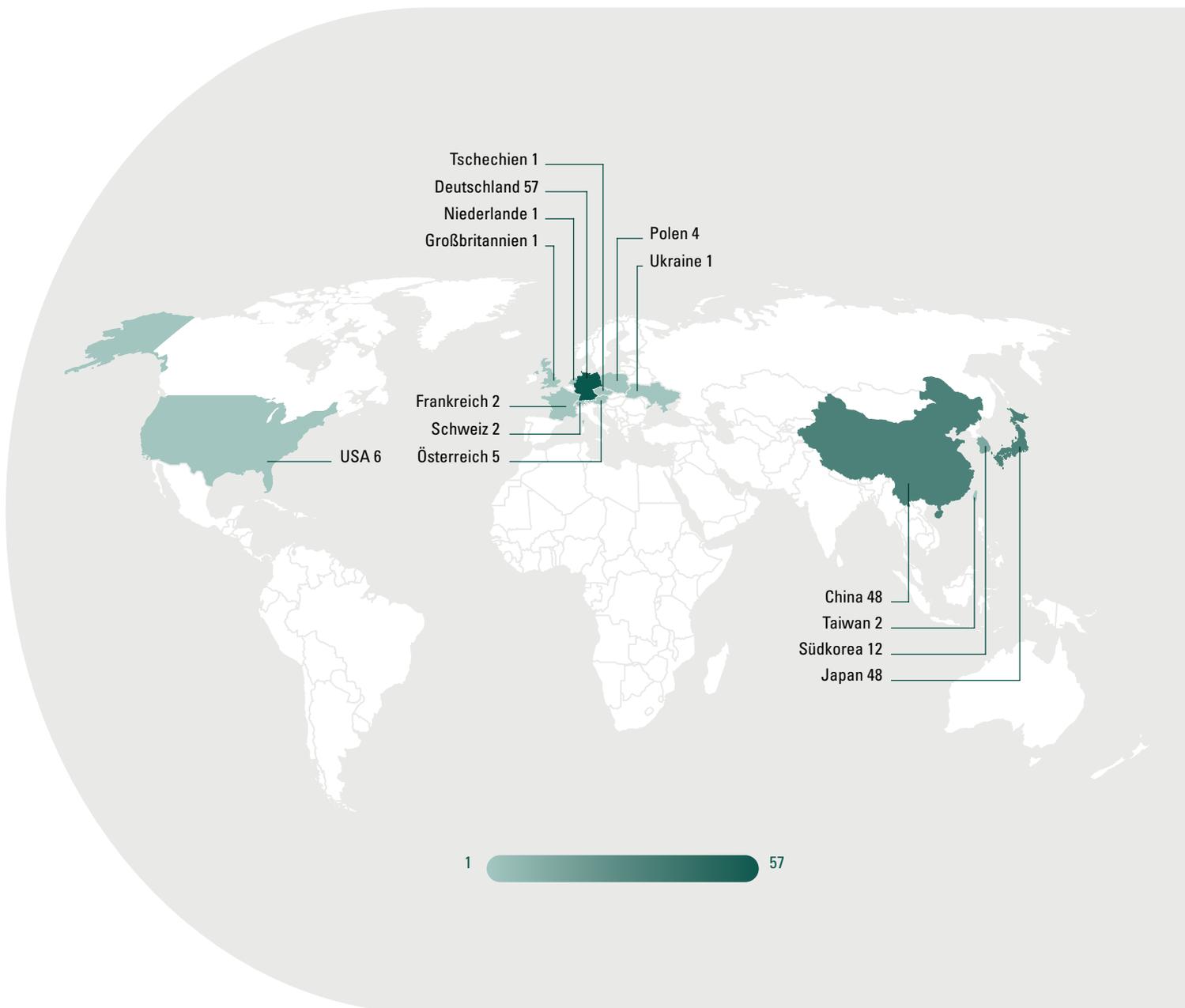
¹² Quelle: <https://press.mantruckandbus.com/de/zero-emission-roadmap-vorgestellt>, abgerufen am 01.11.2020

2.5 Patentsituation

Patentanmeldungen spiegeln immer auch den Stand und die Zeit der Entwicklungen wider. Je mehr an einem Thema anwendungsbezogen geforscht und entwickelt wird, umso mehr Patente werden angemeldet und mit steigender Reife der Produkte enthalten diese spezifischere Probleme und detailliertere Lösungen.

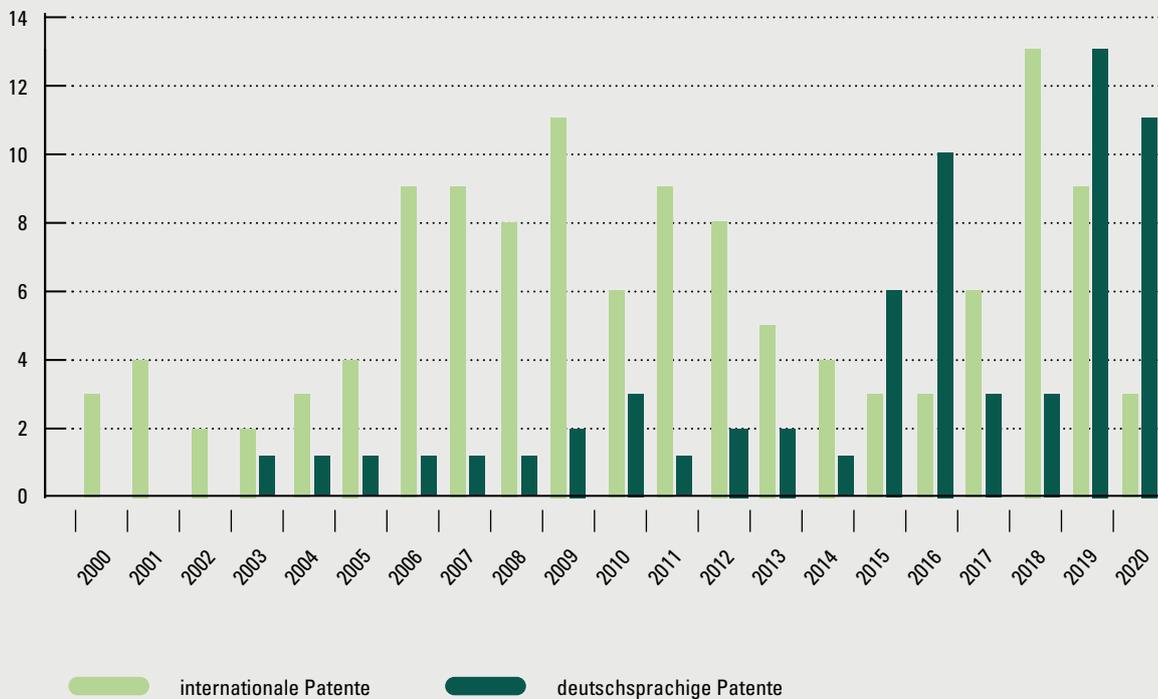
Für diese Studie wurden nationale und internationale Patente in der Datenbank des Deutschen Patent- und Markenamts anhand von Stichwörtern und Patentklassifikationen recherchiert. In die Übersicht wurden Patente mit passenden Beschreibungen zu Motoren, Motorsystemen und Komponenten sowie Betriebsverfahren einbezogen. Die Recherche ergab insgesamt 190 Patentschriften mit spezifischem Bezug zu Wasserstoffverbrennungsmotoren, davon sind 64 Patente aus dem deutschsprachigen Raum (Deutschland, Österreich, Schweiz). Wie sich die Patentveröffentlichungen weltweit verteilen, zeigt Abbildung 10. Deutlich erkennbar ist eine Konzentration auf Zentraleuropa und Ostasien.

ABBILDUNG 10 Internationale Verteilung der Patentveröffentlichungen zu Wasserstoffmotoren



Wird die Verteilung der Patentveröffentlichungen in Abbildung 11 betrachtet, so fallen die Höhepunkte um 2009 und ab 2015 bis heute auf. Zwischen 2006 und 2012 resultierten die meisten Patente aus der Entwicklungsarbeit der Unternehmen Mazda und Toyota, seit 2017 steigt die Anzahl der chinesischen Patente. Im deutschsprachigen Raum wurden die meisten Patente in 2015/2016 von der Robert Bosch GmbH und in 2019/2020 von MAN Energy Solutions SE und der Keyou GmbH veröffentlicht.

ABBILDUNG 11 Patentveröffentlichungen nach Jahr ab 2000

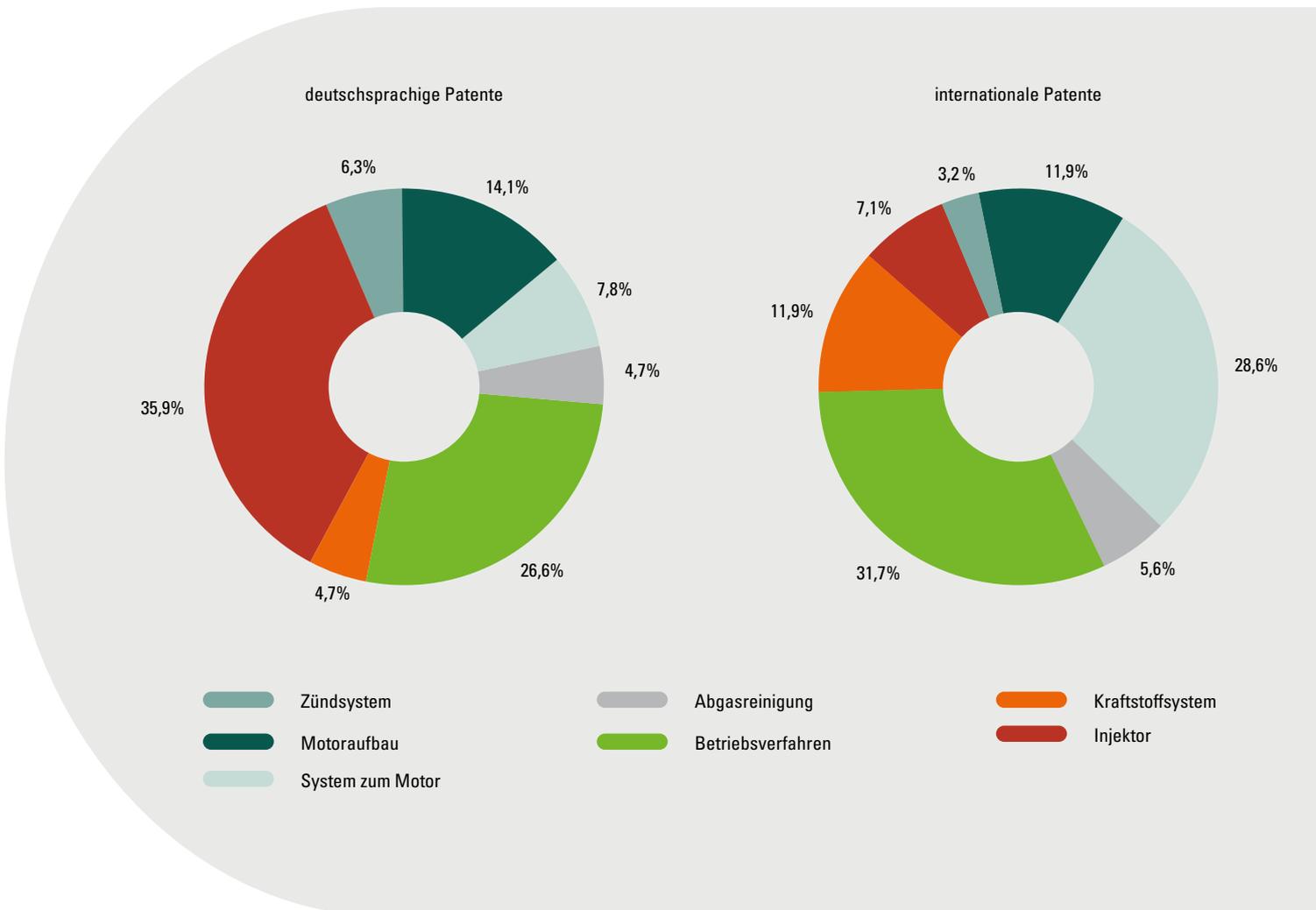


Die inhaltliche Auswertung der Patente zeigt die Entwicklungsschwerpunkte für den Wasserstoffmotor. An den deutschsprachigen Patenten (Abbildung 12, links) haben die Injektoren und Injektorsysteme den größten Anteil, gefolgt von Patenten zu Betriebsverfahren und der Steuerung von Wasserstoffmotoren. Im internationalen Vergleich (Abbildung 12, rechts) überwiegen die Betriebsverfahren. Hierbei handelt es sich überwiegend um Steuer- und Kontrollverfahren des Luft-Kraftstoff-Gemischs, um beispielsweise die Zusammensetzung der Emissionen zu steuern, Frühzündungen zu vermeiden oder die Leistung zu steigern. Außerdem werden häufig Verfahren mit Abgasrezirkulation beschrieben, in einigen Beispielen mit einem zusätzlichen Arbeitsmedium wie Argon (Toyota). Die genannten Kategorien enthalten sowohl allgemein gefasste als auch sehr detaillierte Patentbeschreibungen. Der hohe Detailgrad ist vor allem bei den Injektoren zu finden, was auf eine konkrete Produktentwicklung hinweist. Hier wird sich zum Beispiel bei der Direkteinblasung mit

Lösungen zur Dichtung und Dämpfung der Injektordichtflächen durch Elastomere beschäftigt, die durch höhere Temperaturen im Brennraum im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren stärker belastet sind.

Verschiedene Konzepte zum Aufbau von Wasserstoffmotoren als Hubkolben-, Rotations- oder Gegenkolbenmotoren sind in der Kategorie Motoraufbau enthalten. Auf einzelne Komponenten, die für den Betrieb eines Wasserstoffmotors essenziell sind, beziehen sich die Kategorien Zündsystem und Kraftstoffsystem sowie Abgasreinigung, bei der hauptsächlich die NO_x-Reduzierung im Fokus steht. Diese Patente enthalten zumeist detaillierte Bauteilbeschreibungen und Funktionen. Zudem lässt sich kategorieübergreifend sowohl bei Injektoren und Betrieb als auch beim Motoraufbau eine Präferenz für die Direkteinblasung gegenüber der Saugrohrreinblasung erkennen.

ABBILDUNG 12 Patentveröffentlichungen nach Kategorie



Die letzte Kategorie der Systeme zum Motor ist eine Sammlung von Patenten mit Bezug zu Antriebsystemen und Komponenten oder Systemen, die nicht in eine der anderen Kategorien fallen. Die Antriebssysteme mit Wasserstoffmotoren und Systeme zur Wasserstofferzeugung, zumeist mittels Abgasenergie, sind dabei die häufigsten Anmeldungen.

Im Vergleich zu den jährlichen Patentanmeldungen bei Brennstoffzellen ist die Anzahl derjenigen zum Wasserstoffmotor allerdings sehr niedrig. Wie das Deutsche Patent- und Markenamt mitteilt¹³, wurden jährlich über die letzten zehn Jahre hinweg mehr als 600 Patente mit Wirkung in Deutschland angemeldet, in 2019 waren es 848. Dies zeigt, dass die Erforschung und Entwicklung des Wasserstoffmotors nicht mit der gleichen Intensität erfolgt.

13 Quelle: <https://www.dpma.de/service/presse/pressemitteilungen/20200519.html>, abgerufen am 18.11.2020

2.6 Zusammenfassung des Stands der Technik

Fasst man den aktuellen Stand der Technik der Wasserstoffverbrennungsmotoren zusammen, so sind bereits viele Grundlagen erarbeitet und die Funktion der Technik ist nachgewiesen. Die kritische Betrachtung der Publikationen zeigt allerdings, dass nur wenige akademische Forscher und Forschungseinrichtungen an diesem Thema arbeiten und ihre Ergebnisse veröffentlichen. Bei der industriellen Forschung arbeiten die Hersteller von Nutz- und Sonderfahrzeugen sowie einige Zulieferer am Wasserstoffmotor. Um den industriellen Entwicklungsstand und aktuelle Probleme in die Studie aufzunehmen, wurden Gespräche mit Experten dieser Unternehmen geführt und ausgewertet.

Die chemischen und thermodynamischen Grundlagen für die Wasserstoffverbrennung sind allgemein bekannt, aber in Bezug auf die speziellen Bedingungen in einem Verbrennungsmotor noch nicht ausreichend erforscht. Dies ist notwendig, um den Verbrennungsprozess gänzlich zu verstehen, Simulationsmodelle zu validieren und eine robuste Motorsteuerung zu entwickeln. Für die Simulation des Verbrennungsprozesses wurden bereits erste Modelle veröffentlicht, kommerzielle Simulationsprogramme sind aber noch nicht vorhanden.

In der technischen Umsetzung hat sich der saugrohrenblasende Motor als einfach und leicht umsetzbar mit Emissions- und Wirkungsgradvorteilen im mageren bis sehr mageren Betrieb herausgestellt. Nachteilig sind die geringe Leistungsdichte sowie die Neigung zu Rück- und Frühzündungen. Der direkteinblasende Motor kann diese

Nachteile umgehen und weist eine deutlich höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Emissionen auf. Die Direkteinblasung verursacht allerdings einen erheblichen Aufwand bei der Steuerung der Verbrennung und stellt wesentlich höhere Anforderungen an die Injektoren. Die Verfügbarkeit von Injektoren für die Direkteinblasung wird von Experten als großes Problem genannt.

Wasserstoffmotoren emittieren im Betrieb hauptsächlich Wasserdampf und Stickoxide. Die Stickoxidemissionen können durch den Magerbetrieb und eine Abgasnachbehandlung auf ein sehr niedriges Niveau reduziert werden, lassen sich aber nicht gänzlich vermeiden. Bei der Zertifizierung und Zulassung von wasserstoffmotorisch betriebenen Fahrzeugen werden diese in Europa und den USA der Klasse mit den niedrigsten Emissionen zugeordnet. In Kalifornien ordnet das CARB sie in die Kategorien SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) und TZEV (Transitional Zero-Emission Vehicle) ein.

2.7 Offene Forschungs- und Entwicklungsfragen

Offene Themen der Forschung zum Wasserstoffmotor haben Verhelst und Wallner [18] schon 2009 wie folgt zusammengefasst:

- Löschabstand der Wasserstoffflamme: Der Wärmeübergang an den Wänden des Brennraums macht einen erheblichen Teil der thermodynamischen Verluste aus. Diese Verluste zu verstehen und zu reduzieren, erfordert mehr quantitative Daten zum Löschabstand der Wasserstoffflamme bei variablen Wasserstoffgemischen, Drücken und Temperaturen.
- Selbstzündungstemperatur und Oberflächenentzündung: Frühzündungen und Klopfen begrenzen vor allem bei frühen homogenen Gemischbildungen die Leistung und Effizienz im Wasserstoffmotor. Hierzu ist das Zündverhalten unter verbrennungsmotorischen Bedingungen und mit verschiedenen Gemischverhältnissen zu untersuchen.
- Simulationsmodelle für Wasserstoffverbrennung: Validierte Modelle für die turbulente Verbrennung, die Strahlbildung bei der Direkteinblasung, das Zündverhalten und die Wärmeübertragung im Zylinder sind notwendig.

- Injektoren für Direkteinblasung: Injektoren sind eine wesentliche Komponente, deren Haltbarkeit und maximale Durchflussraten noch zu optimieren sind.
- Einblasverhalten und -strategie: Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss von Injektorlage, Düsengeometrie, Einblasdruck, Einblaszeitpunkt und -länge sowie Mehrfacheinblasung wurden erst begonnen.

Seit dem Artikel von Verhelst und Wallner wurden bei der Selbstzündung und den Simulationsmodellen, beispielsweise mit den Dissertationen von Spuller [8] und Fouquet [20], Fortschritte gemacht. Die meisten Aussagen sind noch immer aktuell.

Ähnliche Ansichten haben Prof. Eichseder und seine Mitarbeiter. In der aktuellsten Veröffentlichung von 2020 [12] benennen sie die weiteren Entwicklungsschritte:

- Verbesserung der Aufladesysteme, um einen hohen Ladedruck über das gesamte Betriebskennfeld zu erzeugen und damit niedrigste NO_x -Emissionen zu erreichen
- Konzeptentwicklung für die Abgasnachbehandlung, um nahezu keine Auswirkung auf die Luftqualität durch Abgase zu haben (Zero Impact Emission Level)
- Haltbarkeit und Funktionalität der wasserstoffspezifischen Komponenten, insbesondere der DI-Injektoren, gewährleisten
- Elektrifizierung des verbrennungsmotorischen Antriebsstrangs vorführen und Synergien hinsichtlich elektrisch unterstützter Aufladung nutzen

In den Gesprächen mit Experten wurden die folgenden Punkte genannt:

- Hauptproblem ist für die Wasserstoffspeicherung kostengünstigere, im Bauraum flexible Tanksysteme mit einer ausreichenden Kapazität zu entwickeln und bereitzustellen [21].

- Verfügbarkeit von Komponenten, speziell Injektoren für Direkteinblasung, mit ausreichend hoher Lebensdauer und zu Kosten, die mit konventionellen Injektoren vergleichbar sind [21]
- Motorsteuergeräte mit geeigneter Software für die Regelung eines ottomotorischen H₂-Magermotors im dynamischen Betrieb sind nicht erhältlich oder noch zu entwickeln [21].
- Hohe Einblasdrücke bei direkteinblasenden Motoren begrenzen das nutzbare Tankvolumen speziell bei 350-bar-Drucktanksystemen.

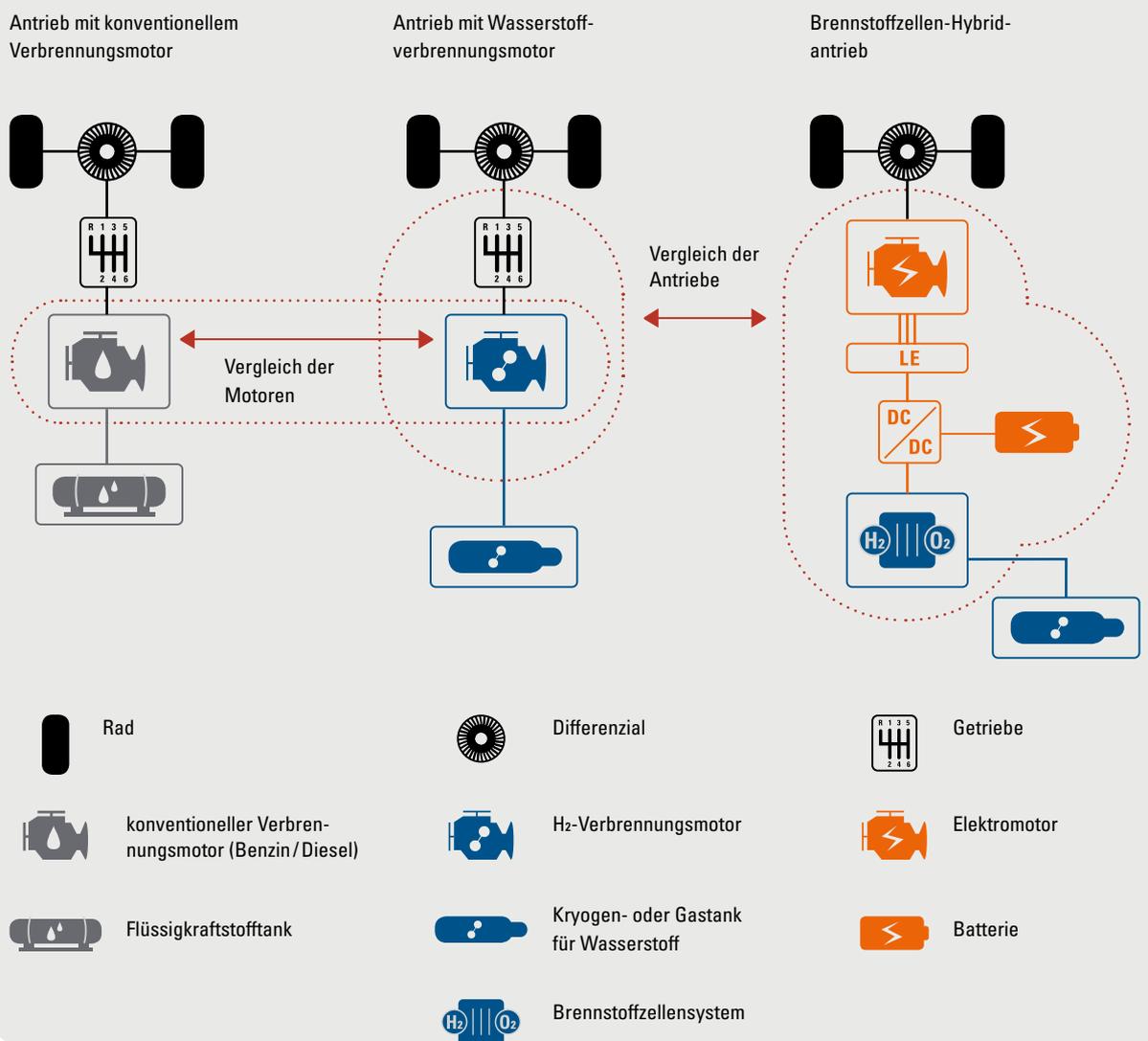
3 Systemanalyse des Wasserstoffmotorantriebs

Um den Wasserstoffmotor als Antriebstechnologie einzuordnen, erfolgt ein Vergleich mit konventionellen Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantrieben. Wird der Energietransfer in einem konventionellen und einem wasserstoffmotorischen Antriebsstrang am Beispiel eines schweren Lastkraftwagens (Lkw) wie in Abbildung 13 betrachtet, so fließt zuerst chemische Energie vom Tanksystem zum Motor. Dieser wandelt die chemische in mechanische Energie, die danach mittels Getriebe und Differenzial angepasst und an die Räder weitergeleitet wird. Bei den beiden verbrennungsmotorischen Antrieben sind die mechanischen Antriebskomponenten bei gleicher Motorleistung identisch. Einzig der Verbrennungsmotor und das Tanksystem unterscheiden sich.

Der schematische Aufbau eines Brennstoffzellen-Hybridantriebs ist in Abbildung 13 rechts zu sehen. Vom Wasserstofftank wird chemische Energie an das Brennstoffzellensystem geleitet, das diese in elektrische Energie wandelt und an einen Spannungswandler (DC/DC) abgibt. Als zweiter Energiespeicher befindet sich eine Hochvoltbatterie im Antriebsstrang, die ebenfalls über einen Spannungswandler angeschlossen ist. Somit entsteht eine Leistungsverzweigung oder Leistungsaddition, bei der elektrische Energie aus dem Brennstoffzellensystem zum Motor oder zur Batterie geleitet oder der Motor aus beiden Quellen versorgt wird. Die Wandlung elektrischer in mechanische Energie übernimmt ein Elektromotor, der über eine Leistungselektronik (LE) angesteuert wird. Der Antrieb der Räder kann über ein Differenzial oder aber einen zweiten Elektromotor in einer Portalachse, wie beispielsweise der ZF AxTrax AVE 130, erfolgen. Zur Vereinfachung der Berechnung wird von einem zentralen Elektromotor mit hohem Drehmoment und Differenzialgetriebe ausgegangen. Folge der Vereinfachung ist, dass insbesondere das Volumen und in geringem Maße auch die Masse des Brennstoffzellenantriebs höher ausfallen. Mit Integration

der Elektromotoren in eine Portalachse nehmen diese den Bauraum des Differenzials und der Antriebsachsen der konventionellen Achse ein. Die elektrischen Portalachsen sind aktuell nicht für alle Leistungsklassen erhältlich.

ABBILDUNG 13 Schematischer Aufbau des Diesel- und Wasserstoffantriebs am Beispiel eines Nutzfahrzeugs



Für den Motorenvergleich kann der mechanische Antriebsstrang außer Acht gelassen werden, da er bei beiden Antrieben identisch ist. Die Tanksysteme mit flüssigem Diesekraftstoff und gasförmigem oder kryogenem Wasserstoff unterscheiden sich stark voneinander, werden im Rahmen dieser Studie aber nicht berücksichtigt. Für Betrachtungen zu Wasserstofftanksystemen sei hier auf die Studie von Rivard, Trudeau und Zaghbi [30] verwiesen. Bei dem Vergleich Wasserstoffmotor mit Brennstoffzellensystem wird der Antriebsstrang zwischen Tank und Differenzial berücksichtigt. Sowohl das Tanksystem als auch das Differenzial und die Radanbindung sind bei beiden identisch. Da die Datenlage zu den Wasserstoffmotoren in den Literaturquellen ungenügend ist, beruhen allgemeine Fakten und Abschätzungen auf den Prototypenmotoren bzw. den Daten von vergleichbaren Dieselmotoren.

3.1 Vergleich mit Otto- und Dieselmotoren

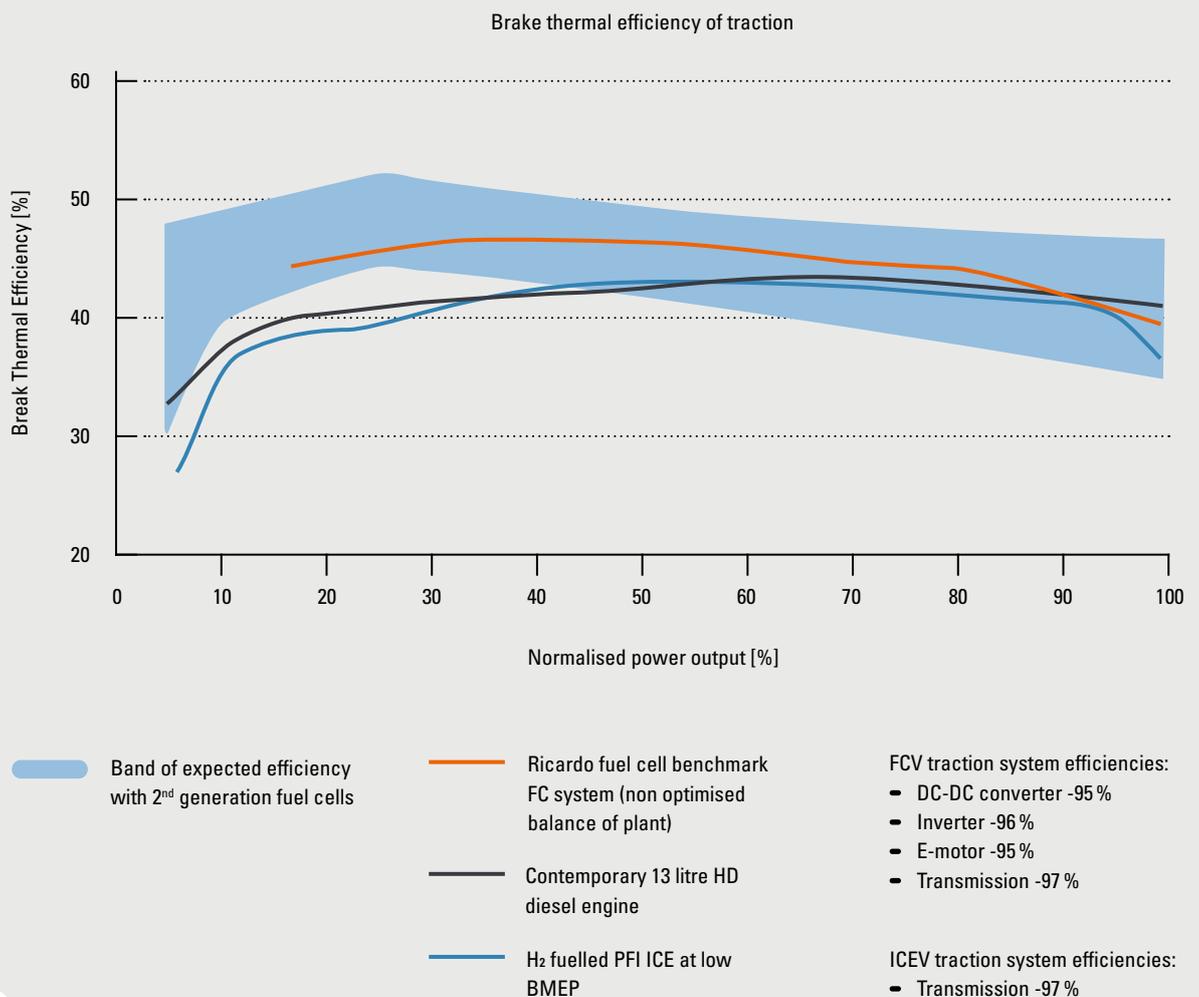
Der Wasserstoffmotor ist ein Gasmotor und basiert auf den gleichen Grundlagen wie konventionelle Verbrennungsmotoren. Auch wenn sich Wasserstoff als Kraftstoff deutlich von Benzin und Diesel unterscheidet, so sind Ladungswechsel, mechanische Kraftübertragung, Kühlung und Steuerung nahezu gleich. Die großen Komponenten wie Zylinderkurbelgehäuse, Zylinderkopf und Ölwanne bleiben damit vom Grundmotor erhalten und nur Anbauteile wie Kraftstoffführung, Frischluft- und Abgasstrang mit Aufladung und Sensorik ändern sich. Auszugehen ist beim Wasserstoffmotor von einem höheren Luftdurchsatz für den Magerbetrieb, daher können der Frischluft- und der Abgasstrang etwas größer ausfallen. Allerdings werden dadurch die Gesamtgröße und das Gewicht des Motors nur geringfügig bis gar nicht beeinflusst. Da die Hersteller zudem bestrebt sind, die Motoren in einer Motorenfamilie gegeneinander austauschbar zu gestalten, wird auch der Wasserstoffmotor den maximal vorgegebenen Bauraum einhalten und somit in Größe und Gewicht dem jeweiligen Diesel- oder Ottomotor gleichen [21].

Bezüglich der Komponenten und des Brennverfahrens unterscheidet sich der Wasserstoffmotor weniger vom Ottomotor als vom Dieselmotor, da er ebenso fremdgezündet wird und nahezu den idealen Ottoverbrennungsprozess nutzt. Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind in Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben.

Im Nutzfahrzeugsegment, wo die Motoren auf Haltbarkeit und Dauerbelastung ausgelegt sind und deshalb eine niedrigere spezifische Leistung haben, erreichen die Wasserstoffmotoren bereits vergleichbare Leistungen. Nach Expertenaussagen

ist es das Entwicklungsziel aller Hersteller, Wasserstoffmotoren auf dem gleichen Leistungsniveau wie Dieselmotoren zu bauen [21]. Auch beim Wirkungsgrad sind Wasserstoffmotoren und Dieselmotoren annähernd gleich. Wie der Vergleich von Ricardo [31] in Abbildung 14 zeigt, hat der Wasserstoffmotor in weiten Teilen des Lastbereichs einen nur um 1 % bis 2 % niedrigeren Wirkungsgrad als der Dieselmotor, in einem kleinen Bereich bei mittlerer Last sogar einen etwas höheren Wirkungsgrad. In Abbildung 8 ist die Differenz zwischen Diesel- und Wasserstoffmotor bei 10 % Last – dies entspricht etwa dem Betriebspunkt der Darstellung – ebenso erkennbar.

ABBILDUNG 14 Antriebswirkungsgrade von Wasserstoffmotor, Dieselmotor und Brennstoffzelle [31]



3.2 Vergleich mit Brennstoffzellen-Hybridantrieben

- 14 PEM-BZ – Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
- 15 Quelle: <https://agriculture.newholland.com/eu/en-uk/about-us/whats-on/news-events/2011/nh2>, abgerufen am 26.11.2020
- 16 Quelle: <http://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell>, abgerufen am 26.11.2020
- 17 Quelle: <https://www.daimler-truck.com/innovation-nachhaltigkeit/effizient-emissionsfrei/brennstoffzellen-lkw-mercedes-benz-genh2-truck.html>, abgerufen am 26.11.2020
- 18 Quelle: <https://www.hino-global.com/corp/news/2020/20201013-002707.html>, abgerufen am 26.11.2020
- 19 Quelle: <https://fuelcelltrucks.eu/project/scania-four-hydrogen-gas-trucks-with-asko-in-norway/>, abgerufen am 26.11.2020
- 20 Quelle: <https://fuelcelltrucks.eu/project/esoro/>, abgerufen am 26.11.2020
- 21 Quelle: <https://fuelcelltrucks.eu/project/vdl-27-ton-hydrogen-truck/>, abgerufen am 26.11.2020
- 22 Quelle: <https://vision-mobility.de/news/quantron-energon-iveco-hauber-mutiert-zum-fuel-cell-truck-50685.html>, abgerufen am 26.11.2020

Die Automobilindustrie favorisiert derzeit die PEM-Brennstoffzelle¹⁴ für den Aufbau von Brennstoffzellensystemen. Im Pkw-Segment sind bereits Fahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb auf der Straße. Die Brennstoffzellensysteme werden mit entsprechender Leistungsskalierung auch bei den Nutzfahrzeugen verbaut. So setzen sowohl Hyundai und Toyota als auch Daimler in ihren Nutzfahrzeugen Brennstoffzellensysteme mit je zwei Brennstoffzellen-Stacks aus dem Pkw ein. Die Brennstoffzellenhersteller haben aber auch speziell für den Nutzfahrzeugsektor entwickelte Brennstoffzellensysteme. Beispielsweise verkauft Ballard mit FCveloCity-HD85 und FCveloCity-HD100 oder Hydrogenics mit HD90 und HD180 Brennstoffzellensysteme für schwere Nutzfahrzeuge. Andere Hersteller bieten Brennstoffzellensysteme auch für Baumaschinen oder Sonderfahrzeuge, wie zum Beispiel Nuvera E-60-HD oder Powercell MS-100. Tabelle 8 zeigt aktuell im Einsatz befindliche oder kürzlich vorgestellte schwere Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb und ihre technische Antriebsspezifikation. Scania/Asko nutzt hier das bereits genannte Brennstoffzellensystem HD90 von Hydrogenics, VDL das Ballard-System FCveloCity-HD85. Parallel zu den Lastkraftwagen befinden sich etliche Omnibusse mit Brennstoffzellenantrieben im Einsatz, wie beispielsweise im CUTE und HyFLEET:CUTE-Projekt [3]. Auch im Landmaschinensektor wurde von New Holland¹⁵ bereits der Traktor NH₂ mit 200 kW Antriebsleistung und einem 100-kW-Brennstoffzellensystem vorgestellt.

TABELLE 8 Übersicht zu Brennstoffzellen-Lastkraftwagen

Fahrzeug	Zulässiges Gewicht	Fahrleistung	BZ-Systemleistung	Batteriekapazität	Reichweite bis zu	Wasserstoffverbrauch
Hyundai Xcient Fuel Cell ¹⁶	34.000 kg	350 kW	2 x 95 kW	73,2 kWh	400 km	8,0 kg / 100 km
Daimler GenH ₂ ¹⁷	40.000 kg	2 x 230 kW	2 x 150 kW	70 kWh	1.000 km	–
Toyota/Hino Motors ¹⁸	25.000 kg	200 kW	2 x 90 kW	–	600 km	–
Scania/Asko ¹⁹	27.000 kg	290 kW	90 kW	56 kWh	400 km	8,25 kg / 100 km
ESORO ²⁰	34.000 kg	250 kW	120 kW	120 kWh	375 km	7,5 – 8 kg / 100 km
VDL ²¹	27.000 kg	210 kW	88 kW	84 kWh	400 km	7,5 kg / 100 km
Quantron Energon ²²	44.000 kg	340 kW	130 kW	110 kWh	700 km	–

Aus Tabelle 8 lassen sich zwei Fahrzeuggrößen ableiten, die im Folgenden für den Vergleich zum Wasserstoffmotor herangezogen werden. Dies ist zum einen ein mittleres Nutzfahrzeug (Lkw oder Bus) bis 25.000 kg zulässigem Gesamtgewicht mit 200 kW Antriebsleistung (sowohl Verbrennungsmotor- als auch Elektromotorleistung), einem 85-kW-Brennstoffzellensystem und einer Batterie mit 45 kWh Kapazität. Zum anderen wird ein schweres Nutzfahrzeug bis 45.000 kg zulässigem Gesamtgewicht mit 350 kW Antriebsleistung, einem 180-kW-Brennstoffzellensystem und einer Batterie mit 70 kWh Kapazität betrachtet. Basierend auf dem schematischen Antriebsaufbau (vgl. Abbildung 13) enthalten Tabelle 9 und Tabelle 10 ausgewählte Komponenten für die beiden Antriebssysteme.

TABELLE 9 Größen- und Wirkungsgradvergleich bei 200 kW Antriebsleistung

Komponente	Eigenschaft	Wasserstoffmotor	Brennstoffzellen-Hybridantrieb
Motorleistung 200 kW – Brennstoffzellensystemleistung 85 kW – Batterie 45 kWh			
23 Brennstoffzellensystem	Masse	–	360 kg ²³
	Volumen	–	594 l
	Wirkungsgrad	–	45 – 55 %
24 Spannungswandler (DC/DC)	Masse	–	34 kg ²⁴
	Volumen	–	32 l
	Wirkungsgrad	–	99 %
25 Batterie	Masse	–	280 kg ²⁵
	Volumen	–	130 l
	Wirkungsgrad	–	96 – 99 %
26 Leistungselektronik	Masse	–	36 kg ²⁶
	Volumen	–	41 l
	Wirkungsgrad	–	95 – 97 %
27 Motor (Verbrennungs- oder Elektromotor)	Masse	710 kg ²⁷	340 kg ²⁸
	Volumen	1.128 l	146 l
	Wirkungsgrad	30 – 44 %	90 – 96 %
28 Getriebe	Masse	197 kg ²⁹	–
	Volumen	152 l	–
	Wirkungsgrad	97 – 99 %	–
Gesamtsumme		Masse	907 kg (4,54 kg/kW)
		Volumen	1.280 l (6,4 l/kW)
		Mittlerer Wirkungsgrad	
		37 % (30 – 43 %)	
		44 % (38 – 50 %)	

23 Basierend auf dem Hydrogenics Heavy Duty Fuel Cell HD90 – Quelle: www.hydrogenics.com

24 Basierend auf Aradex DC/DC-Wandler VP5000-DCDC60 – Quelle: www.aradex.de

25 Basierend auf Energiedichte von 0,16 kWh/kg und 0,35 kWh/l – Quelle: M. Doppelbauer, „Energiespeicher“, in: „Grundlagen der Elektromobilität“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.

26 Basierend auf Inverter für DANA TM4 Sumo HD – Quelle: <https://www.danatm4.com>

27 Basierend auf dem Deutz TCD 7.8 Quelle: deutz.de – technische Datenblätter

28 Basierend auf DANA TM4 Sumo HD Quelle: <https://www.danatm4.com>

29 Basierend auf dem ZF Ecotronic mid 9AS – Quelle: www.ZF.com/truck – Lkw- und Van-Antriebstechnik

TABELLE 10 Größen- und Wirkungsgradvergleich bei 350 kW Antriebsleistung

Komponente	Eigenschaft	Wasserstoffmotor	Brennstoffzellen-Hybridantrieb
Motorleistung 350 kW – Brennstoffzellensystemleistung 180 kW – Batterie 70 kWh			
30 Basierend auf dem Hydrogenics Heavy Duty Fuel Cell HD180 Quelle: www.hydrogenics.com	Masse	–	720 kg ³⁰
	Volumen	–	1.185 l
	Wirkungsgrad	–	45 – 55 %
31 Basierend auf Aradex DC/DC-Wandler VP5000-DCDC200 Quelle: www.aradex.de	Masse	–	85 kg ³¹
	Volumen	–	59 l
	Wirkungsgrad	–	99 %
32 Basierend auf Energiedichte von 0,16 kWh/kg und 0,35 kWh/l – Quelle: M. Doppelbauer, „Energiespeicher“, in: „Grundlagen der Elektromobilität“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.	Masse	–	440 kg ³²
	Volumen	–	200 l
	Wirkungsgrad	–	96 – 99 %
33 Basierend auf 2 x Inverter für DANA TM4 Sumo HD Quelle: https://www.danatm4.com	Masse	–	72 kg ³³
	Volumen	–	82 l
	Wirkungsgrad	–	95 – 97 %
34 Basierend auf dem MAN D2676 LF51 Quelle: https://www.engines.man.eu/man/media/content_medien/doc/global_engines/on_road/OnRoad_EN_160808_web.pdf, abgerufen am 26.11.2020	Masse	1.117 kg ³⁴	680 kg ³⁵
	Volumen	1.580 l	292 l
	Wirkungsgrad	30 – 44 %	90 – 96 %
35 Basierend auf 2 x DANA TM4 Sumo HD Quelle: https://www.danatm4.com	Masse	365 kg ³⁶	–
	Volumen	320 l	–
	Wirkungsgrad	97 – 99 %	–
36 Basierend auf dem ZF TraXon 12TX inklusive ZF-Intarder Quelle: ZF.com/truck – Lkw- und Van-Antriebstechnik	Masse	–	–
	Volumen	–	–
Gesamtsumme		1.482 kg (4,2 kg/kW)	1.997 kg (5,7 kg/kW)
		1.900 l (5,4 l/kW)	1.818 l (5,2 l/kW)
Mittlerer Wirkungsgrad		37 % (30 – 43 %)	44 % (38 – 50 %)

Bei dieser Auslegung der Antriebsgröße handelt es sich um eine Beispielrechnung. Der Anspruch an die Auswahl der Komponenten besteht in der Aktualität der Technik und der vorhandenen Daten, beim verbrennungsmotorischen Antrieb in der Übertragbarkeit von Drehmoment und Drehzahl und beim Brennstoffzellenantrieb in der passenden Systemspannungslage. Auf eine Betrachtung des Tanksystems wird verzichtet, da für beide die gleiche Tankgröße angenommen werden kann. Die Komponenten für den Wasserstoffmotor basieren auf den Prototypenmotoren von Keyou und MAN. Das Getriebe wird von ZF zur Nutzung in dieser Antriebsleistungsklasse empfohlen. Für das Brennstoffzellensystem wurden die zur Leistung passenden Systeme von Hydrogenics mit einem passenden Spannungswandler ausgewählt. Sowohl Brennstoffzelle als auch Batterie weisen dabei eine hohe Leistungsdichte auf, um den aktuellen Entwicklungsstand darzustellen. Für den Elektromotor wurde ein für den Direktantrieb von Nutzfahrzeugen entwickelter Motor des Unternehmens

DANA gewählt, der als Einzelmotor für den kleineren Antrieb sowie zweimal für den großen Antrieb verwendet wird. Im aktuellen Stand der elektrischen Nutzfahrzeugantriebe werden hauptsächlich Portalachsen mit integrierten Elektromotoren eingesetzt. Es gibt nicht ausreichend Daten, um zwei unterschiedliche Leistungsklassen mit einem Verbrennungsantrieb, der nur ein Differenzial in der Portalachse hat, vergleichen zu können. Wird der Einsatz von elektrischen Portalachsen berücksichtigt, sinkt das Gesamtvolumen des Brennstoffzellenantriebs um die Größe der Elektromotoren, da diese an die Stelle des Differenzials und der Antriebswellen rücken.

Beim 200-kW-Antrieb ist im Größenvergleich das Brennstoffzellenantriebssystem um etwa 16 % schwerer und 26 % kleiner als das verbrennungsmotorische System. Damit ist das Brennstoffzellenantriebssystem insgesamt im Vorteil, da es weniger Platz benötigt, modular verteilbar ist und nur geringfügig mehr wiegt. Mit fortschreitender Batterie- und Brennstoffzellenentwicklung, die in den kommenden fünf Jahren zu erwarten ist, kann der Gewichtsunterschied ausgeglichen werden. Beim 350-kW-Antrieb hat der Brennstoffzellenantrieb etwa 35 % mehr Masse und etwa 4 % weniger Volumen. Hier ist klar der Verbrennungsmotor im Vorteil, da das Mehrgewicht des Brennstoffzellensystems von der Nutzlast abgeht. An dem Berechnungsbeispiel lässt sich ein Trend feststellen: Bei kleiner Leistung haben beide Antriebssysteme die gleiche Masse, der Brennstoffzellenantrieb aber den kleineren Bauraum. Mit steigender Motorleistung wird der Verbrennungsmotor leichter und kleiner als der Brennstoffzellenantrieb.

Der Vergleich des mittleren Wirkungsgrads der Systeme ergibt einen Vorteil für den Brennstoffzellenantrieb. Er basiert auf Angaben zum maximalen Wirkungsgrad der Hersteller und Annahmen zur Verteilung über dem Betriebsbereich. Daraus wurde ein einfacher Mittelwert unter der Annahme gebildet, dass die Kraftstoffenergie in Motor und Brennstoffzelle umgesetzt und direkt für den Antrieb genutzt wird. Die Batterie und die Hybridfunktionen des Brennstoffzellenantriebs wurden vernachlässigt. Der angegebene mittlere Wirkungsgrad ist somit nur als Richtwert zu verstehen und stellt keinen vollständigen Systemwirkungsgrad dar. Eine ähnliche Aussage wird von Ricardo [31] in Abbildung 14 getroffen. Wird der Verlauf der Wirkungsgradkennlinie verglichen, so erreicht die Brennstoffzelle ihr Maximum bei niedriger bis mittlerer Last mit abfallender Linie zu hoher Last, wohingegen der Verbrennungsmotor bei mittlerer bis hoher Last mit relativ konstanter Linie seinen Bestpunkt hat. Daraus folgt, dass Brennstoffzellensysteme bei niedrigen bis mittleren Durchschnittslasten die größten Wirkungsgradvorteile haben, Verbrennungsmotoren bei Anwendungen mit hohem Volllastanteil aber den gleichen oder einen leicht höheren Wirkungsgrad erreichen. Eine qualifiziertere Aussage zum Wirkungsgrad

37 Rekuperation: Energierückgewinnung beim Verlangsamen/Bremsen des Fahrzeugs

38 Ballard FCveloCity

Quelle: https://www.ballard.com/docs/default-source/spec-sheets/fcvelocity-hd.pdf?sfvrsn=2debc380_4, abgerufen am 27.11.2020

39 Hydrogenics HD90

Quelle: <http://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/HyPM-90-Spec-Sheet.pdf>, abgerufen am 27.11.2020

und Wasserstoffverbrauch kann eine Fahrzyklusberechnung für eine oder mehrere Anwendungen mit gegebenen Fahr- und Leistungsprofilen treffen, da dort auch die Rekuperationsfähigkeit³⁷ und die Betriebspunktverschiebung hin zum konstanten Betrieb des Brennstoffzellensystems einfließen. Somit kann sich für die meisten Anwendungen ein deutlich größerer Unterschied im Systemwirkungsgrad zwischen Wasserstoffverbrennungsmotoren und Brennstoffzellenantrieben ergeben.

TABELLE 11 Vergleich der Eigenschaften von Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle [31]

Eigenschaft	Wasserstoffmotor	Brennstoffzellensystem
Lebensdauer	Basisdieselmotor: > 10.000 h Haltbarkeit der Wasserstoffkomponenten noch nicht nachgewiesen	> 30.000 h ³⁸ > 10.000 h ³⁹
Stoß und Schwingung	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zyklische Verbrennung erzeugt Schwingungen ➤ Tolerant gegen Stöße und Schwingungsanregung 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erzeugt kaum bis keine Schwingungen ➤ Empfindlich gegen Stöße und Schwingungsanregung
Schallemissionen	Mittlere bis starke Schallabstrahlung und Vibrationen	Geringe Schallabstrahlung
Abgasemissionen ➤ davon schädliche	Wasserdampf <ul style="list-style-type: none"> ➤ NO_x – gering im Magerbetrieb ➤ CO₂, CO, HC – sehr gering durch verbranntes Motoröl 	Wasserdampf <ul style="list-style-type: none"> ➤ keine
Kraftstoffreinheit	Tolerant gegenüber Verschmutzung mit kleinen Partikeln und Staub	Hohe Reinheit notwendig → Verunreinigung reduziert die Lebensdauer
Luftreinheit	Tolerant gegenüber Verschmutzung mit kleinen Partikeln und Staub	Hohe Reinheit notwendig → Verunreinigung reduziert die Lebensdauer
Betriebstemperatur	90 – 120 °C	60 – 80 °C
Kühlmitteltemperatur	80 – 100 °C	50 – 70 °C
Verhältnis Abwärme zu Kraftstoffenergie	ca. 30 % über Kühlung 20 – 25 % über Abgas	40 – 50 % über Kühlung
Abwärmennutzung	Heizung der Fahrgastzelle	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Heizung der Fahrgastzelle ➤ Erwärmung der Batterie

Neben der Größe und Leistungsfähigkeit stellt Tabelle 11 weitere Eigenschaften der Antriebssysteme gegenüber. Hinsichtlich der Lebensdauer kann davon ausgegangen werden, dass beide Systeme die von Nutzfahrzeugen geforderten Betriebsstunden erreichen. Die Brennstoffzelle ist vor allem bei den Emissionen dem Verbrennungsmotor überlegen. Da sie nur Wasserdampf emittiert, werden die Fahrzeuge in die Klasse ZEV (Zero-Emission Vehicle) eingeordnet. Zudem sind das Brennstoffzellensystem und der Elektromotor deutlich leiser als ein Verbrennungsmotor und können bei Anwendungen mit geringen Fahrgeräuschen, wie im Nahverkehr oder der Schifffahrt, und in störepfindlichen Umgebungen eingesetzt werden.

Der Verbrennungsmotor ist bei der Reinheit des Kraftstoffs und der angesaugten Luft robuster und toleranter als die Brennstoffzelle, da die Verbrennung nur wenig beeinträchtigt wird und erst bei großen Mengen zum Erliegen kommt. Bei der Brennstoffzelle können Partikel aufgrund der filigranen Zellstrukturen Beschädigungen hervorrufen und Verunreinigungen die Reaktionen in der Zelle blockieren. Somit hat der Verbrennungsmotor Vorteile bei staubigen oder schmutzigen Umgebungsbedingungen und wo Kraftstoff nur in minderer Qualität erhältlich ist.

Das Thermomanagement bei Verbrennungsmotoren ist aufgrund der höheren Betriebstemperatur einfacher zu realisieren. Die durchschnittliche Kühlmitteltemperatur liegt deutlich über der Umgebungstemperatur, wodurch die Wärmeabgabe größer ist. Zudem wird ein Teil der Abwärme über das Abgas abgegeben, wodurch das Kühlsystem kleiner werden kann. Mit Verbrennungstemperaturen über 1.500 °C und Abgastemperaturen über 100 °C kann der Verbrennungsmotor auch bei Umgebungstemperaturen unter dem Gefrierpunkt ohne Einschränkungen arbeiten. Das Brennstoffzellensystem hat bei sehr niedrigen Temperaturen Probleme durch Eisbildung in den Zellen und im Abgasstrang. In Anwendungen mit extremen Temperaturbedingungen, wie beispielsweise im Polarkreis oder in Wüsten, ist der Verbrennungsmotor vorteilhaft.

4 Ökonomische und ressourcen- bezogene Analyse des Wasserstoffverbrennungsmotors

4.1 Ergebnisse der Literaturrecherche

Im Zuge der Literaturrecherche zum Wasserstoffverbrennungsmotor hat sich schnell herausgestellt, dass insgesamt nur eine stark begrenzte Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu diesem Thema existiert. Deutlich wird dies vor allem im Vergleich zur hohen Anzahl an Veröffentlichungen zu konventionellen Motor- und Antriebskonzepten wie dem Diesel- und dem Benzinverbrennungsmotor, aber auch im Vergleich zu Veröffentlichungen zu neueren Technologien wie dem Brennstoffzellenantrieb sowie batterieelektrischen und verschiedenen hybriden Antriebskonzepten.

Weiterhin bezieht sich ein großer Teil der Literatur auf den Bereich der Pkws oder kleinen Nutzfahrzeuganwendungen wie Transporter und Pick-up-Trucks. Betrachtungsgegenstand des vorliegenden Berichts sollen jedoch Fahrzeuganwendungen in höheren Leistungsbereichen von 200 kW und 350 kW sein sowie nach Möglichkeit die Untersuchung des Einsatzes im Spezialanwendungsbereich.

Als dritte Herausforderung bei der Literaturrecherche hat sich der Fokus auf die mit den Antriebskonzepten verbundenen Kosten herausgestellt. Für quantitative Aussagen wurde hier auf bestehende TCO-Studien zurückgegriffen, die sich auf die Anwendung in den beiden zuvor genannten Leistungsbereichen beziehen. Konkret wurde für den niedrigeren Leistungsbereich nach vergleichenden TCO-Studien für Busse gesucht und für den höheren Anwendungsbereich nach TCO-Studien in Bezug auf Lkws.

Speziell für den Wasserstoffverbrennerantrieb konnte lediglich eine Studie [32] gefunden werden, die für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten Diesel-, Wasserstoffverbrenner- und Brennstoffzellenantrieb mit absoluten Kostenangaben gegenüberstellt. Ein stark aggregierter Vergleich der Gesamt-TCO der drei zuvor bereits genannten Antriebskonzepte findet sich zudem in [31], woraus jedoch keine differenzierten Werte für Anschaffungskosten und Kosten der Nutzungsphase entnommen werden können. Gleichzeitig ist dies die einzige Quelle, die Kosteninformationen für den Einsatz des Wasserstoffverbrenners in einer Spezialanwendung am Beispiel eines Baggers aufführt. Weitere Informationen zu Herstell- oder Anschaffungskosten und ihrer Entwicklung konkret für den Wasserstoffverbrenner können noch [33] und [34] entnommen werden. Hier finden sich aber lediglich qualitative Aussagen im Vergleich zum Referenzantrieb Diesel.

Auf Basis dieser geringen Anzahl an Literaturquellen bietet sich keine Möglichkeit für eine differenzierte Mehrkostenabschätzung oder TCO-Analyse des Wasserstoffverbrennungsmotors. Um trotzdem Ergebnisse ableiten zu können, wird als Äquivalent zum Wasserstoffverbrennungsmotor auf den (Erd-)Gasmotor zurückgegriffen und dies an den entsprechenden Stellen kenntlich gemacht. Sofern Ergebnisse aus spezifischen Informationen zum Wasserstoffverbrennungsmotor abgeleitet werden können, ist auch dies entsprechend gekennzeichnet.

4.2 Mehrkostenabschätzung für den Wasserstoffverbrennungsmotor

Wie in den Ergebnissen der Literaturrecherche bereits dargestellt, existieren in der betrachteten Literatur kaum (quantitative) Aussagen hinsichtlich der Kosten eines Wasserstoffverbrennerantriebs. Um trotzdem Aussagen hinsichtlich der Mehrkosten eines Wasserstoffverbrennungsmotors im Vergleich zu einem Dieselmotor ableiten zu können, wird in den folgenden Ausführungen auch auf den (Erd-)Gasverbrennerantrieb zurückgegriffen. Die Annahme vergleichbarer Kosten für Wasserstoffverbrenner und Gasverbrenner wird mit der technischen Ähnlichkeit beider Antriebssysteme [35, S. 8] begründet. Die Vergleichbarkeit hinsichtlich des Aufbaus und der Kosten wird auch von Vertretern der Unternehmenspraxis bestätigt [10].

Werden die Kosten für Gas- und Dieselantriebe zunächst auf Ebene der Gesamtfahrzeuge verglichen, zeigen sich aktuell noch Mehrkosten gegenüber dem Referenzantrieb Diesel. Es besteht jedoch die Annahme, dass sich perspektivisch Gas-Lkws (LNG) hinsichtlich der Kosten den Diesel-Lkws immer weiter annähern. Für das Jahr 2015 können noch Mehrkosten eines Gas-Lkw gegenüber einem Diesel-Lkw in Höhe von 33,00 % angenommen werden. Prognosen zufolge sollen sich diese Mehrkosten bis zum Jahr 2025 auf lediglich 10,00 % reduzieren. Als Gründe dafür werden potenziell steigende Produktionszahlen und damit einhergehende technische wie auch produktionsprozessbezogene Optimierungen genannt [36, S. 48].

Auch eine weitere Studie geht von sich perspektivisch annähernden Kosten für gas- und dieselgetriebene Lkws aus. Während 2015 noch Mehrkosten von 17,16 % bestanden, reduzieren sich diese in 2020 zunächst auf 13,73 % und können sich in 2025 bereits auf 9,62 % verringern. Für das Jahr 2030 werden dann abschließend nur noch Mehrkosten des Gas-Lkw (LNG, SI) im Vergleich zum Diesel-Lkw in Höhe von 4,59 % prognostiziert [37, S. 47].

Die Kosten eines solchen Gasverbrennungsantriebs zur Nutzung im hohen Leistungsbereich können sich bei Einsatz des Motorenkonzepts nach Fremdzünder-Prinzip (Spark Ignition, SI) auf 125 €/kW Leistung belaufen, während sie unter Nutzung des Selbstzünder-Konzepts (High Pressure Direct Injection Engine, HDPI) bei 180 €/kW Leistung liegen. Die Kosten für einen Dieselerbrennungsmotor (inklusive Getriebe und Intarder) liegen im Vergleich hierzu bei 120 €/kW und sind annähernd vergleichbar mit den Kosten für den Gasverbrennerantrieb (SI), die lediglich 4,17 % höher liegen [38, S. 13].

Diese Annahme geringfügig höherer Kosten für einen Gasverbrenner gegenüber dem konventionellen Dieselerbrenner wird auch auf Ebene der Motoren in wissenschaftlichen Veröffentlichungen belegt. Für den Einsatz in hohen Leistungsbereichen in Lkws können sich die Kosten für einen Dieselmotor beispielsweise auf 9.000 \$ und die Kosten für einen Gasmotor (LNG, SI) auf 10.000 \$ belaufen, was lediglich Mehrkosten in Höhe von 11,11 % entspricht [39, S. 7].

Die gleiche Annahme besteht konkret auch für die Herstellkosten des Wasserstoffverbrennungsmotors. Unter der Bedingung ausreichend hoher Produktionsstückzahlen erfolgt langfristig eine Angleichung der Herstellkosten eines Wasserstoffverbrennungsmotors auf das Niveau von konventionellen Dieselerbrennern [33, S. 246].

Aktuell werden zum Beispiel die Mehrkosten eines Busses mit Wasserstoffverbrennungsmotor im Vergleich zu einem Bus mit Dieselmotor gemäß Keyou mit rund 20 % beziffert, die auch auf entsprechende Umrüstungsmaßnahmen des Motors zurückgeführt werden können [34, S. 55].

Für eine aussagekräftige und fundierte Analyse der Herstellkosten eines Wasserstoffverbrennungsmotors fehlen jedoch weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen, die die Kosten auch auf Ebene einzelner Komponenten, die im Vergleich zum konventionellen Dieselmotor angepasst werden müssen, aufschlüsseln.

4.3 TCO-Analyse

4.3.1 Methodik und Vorgehen

Zur vergleichenden Analyse der Total Cost of Ownership (TCO) verschiedener Antriebssysteme sollen im Folgenden zunächst die Kosten für die Anschaffung betrachtet werden. Weiterhin können grundsätzlich neben der Investition in den Antrieb selbst auch mögliche Infrastrukturkosten berücksichtigt werden, die für die Bereitstellung des notwendigen Kraftstoffs an Tankstellen entstehen. Diese Infrastrukturkosten werden in der vorliegenden Studie jedoch nicht betrachtet, da die beiden zu vergleichenden Antriebssysteme die Investition in Wasserstofftankstellen erfordern, sodass diese Infrastrukturkosten keine entscheidungsrelevanten Kostenunterschiede zwischen den beiden Antriebssystemen verursachen. Für die Nutzungsphase der Antriebssysteme werden die Kraftstoffkosten ebenso wie die Kosten für Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt. Weiterhin fallen während der Nutzungsdauer von Fahrzeugen auch Kosten für Kraftfahrzeugsteuer und Versicherung an, die jedoch vernachlässigt werden, da primär die Kraftstoff- sowie die Reparatur- und Instandhaltungskosten als entscheidende Kostentreiber der TCO während der Nutzungszeit anzusehen sind [40, S. 51].

Wie bereits bei der Mehrkostenbetrachtung des Wasserstoffverbrennerantriebs wird auch bei der TCO-Analyse auf Werte des (Erd-)Gasverbrennerantriebs zurückgegriffen. Die im nächsten Kapitel angegebenen Werte hinsichtlich der TCO-Betrachtung des Wasserstoffverbrenners basieren deshalb weitestgehend auf Ergebnissen für den Gasverbrennerantrieb. Lediglich zwei Veröffentlichungen zur vergleichenden Betrachtung der TCO des Wasserstoffverbrennerantriebs konnten identifiziert werden, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel entsprechend abgegrenzt von den sonstigen Ergebnissen gekennzeichnet sind.

Für die Analyse der TCO wurde eine Auswertung verschiedener vergleichender TCO-Studien im Hinblick auf die beiden in den technischen Ausführungen definierten Leistungsbereiche durchgeführt. In den höheren Bereich mit (Antriebs-)Leistungen um die 350 kW fallen anwendungsbezogene TCO-Betrachtungen von sogenannten Heavy Duty Truck Vehicles bzw. Sattelzugmaschinen und Lkws bis 40 Tonnen. Zur Betrachtung des niedrigeren Leistungsbereichs (200 kW) erfolgt eine Auswertung von TCO-Studien mit dem Fokus auf (Solo-)Bussen, wie sie beispielsweise im Stadt- und Regionalverkehr Anwendung finden können.

Die betrachtete Literatur unterscheidet sich jedoch in vielerlei Hinsicht, wie folgend aufgeführt:

- Einbezogene Kosten zur Ermittlung der TCO im Laufe des Lebenszyklus (neben den hier betrachteten Anschaffungs- und Nutzungskosten teilweise auch Kosten für Versicherung, Steuer, Infrastruktur, Personal und Finanzierung)
- Unterschiedliche Annahmen hinsichtlich Laufleistung und Nutzungsdauer der Fahrzeuge
- Kosten als absoluter Betrag über den Lebenszyklus oder Angabe in €/km
- Kosten in Bezug auf ein einzelnes Fahrzeug oder eine gesamte Fahrzeugflotte

Um eine Vergleichbarkeit der wesentlichen Ergebnisse der betrachteten TCO-Studien zu erhalten, wurden alle Kostenangaben bezüglich Anschaffung, Kraftstoff sowie Reparatur und Instandhaltung auf Basis der Laufleistung einheitlich in Werte von Euro pro zurückgelegten Kilometer umgerechnet. In einem nächsten Schritt wurden die so erhaltenen Ergebnisse ins Verhältnis zum Referenzantrieb Diesel gesetzt, um relative Aussagen hinsichtlich der zusätzlichen Kosten oder auch der Kosteneinsparpotenziale für die Anschaffung, den Kraftstoffeinsatz sowie die Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen ableiten zu können. Weiterhin wurde in Anlehnung an [36, S. 42] eine Inflationsbereinigung der Werte mit einer einheitlichen Inflationsrate in Höhe von 1,60 % vorgenommen, um die Aussagen zu aktuellen Kosten sowie Kostenprognosen einheitlich auf das Betrachtungsjahr 2020 zu beziehen.

In den analysierten TCO-Studien werden hauptsächlich Aussagen auf Ebene von Gesamtfahrzeugen, die mit dem jeweils spezifischen Antriebssystem ausgestattet sind, getroffen. Diesem Bericht liegt deshalb die Annahme zugrunde, dass die Differenz

der TCO-Werte zwischen den Fahrzeugen auf deren spezifischen Antrieb zurückzuführen ist. Dieses Vorgehen ist zum Beispiel an [36, S. 48], [40, S. 39] und [41, S. 66] angelehnt, die von einem für alle betrachteten Antriebskonzepte einheitlichen Basisfahrzeug mit identischen Basiskosten ausgehen, das um antriebsspezifische Komponenten ergänzt wird, um die jeweiligen Gesamtanschaffungskosten ableiten zu können. Die Betrachtung des Gesamtfahrzeugs schließt kostenseitig dabei auch Tank und Getriebe ein, die jedoch in der technischen Betrachtung ausgeklammert sind. Diese Abweichung von den Systemgrenzen ergibt sich aus der nur auf geringem Niveau differenzierten Datenbasis und ist zudem ökonomisch sinnvoll, da bei einem Wasserstofftank von erheblichen Mehrkosten im Vergleich zum Dieseltank ausgegangen werden kann. Auch bei der Berücksichtigung des Tanks ist die Nutzung des Gasverbrenners als Äquivalent zum Wasserstoffverbrenner vertretbar, da ein Wasserstofftank nur geringfügig höhere Kosten als ein vergleichbarer Flüssiggastank verursacht [39, S. 7].

Da es sich bei der Auswertung der vorliegenden Studien lediglich um eine statische Betrachtung der TCO handelt, werden mögliche Restwerte, die zum Ende der Nutzungsdauer bestehen können, bei den Anschaffungskosten zum Abzug gebracht und damit bei der Berechnung der spezifischen Anschaffungskosten bereits berücksichtigt.

4.3.2 TCO-Analyse des Wasserstoffverbrennungsantriebs

Anschaffungskosten

Bei Betrachtung der TCO-Studien ergeben sich folgende Spannweiten der Mehrkosten für die Anschaffung, jeweils bezogen auf den Referenzantrieb Diesel. Die spezifischen Anschaffungskosten eines Lkw mit Gasverbrennungsantrieb können demnach zwischen 13,73 % und 35,71 % über denen eines Lkw mit Dieselerbrennungsmotor liegen.

TABELLE 12 Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrenner-Lkws 1

	2015		2018	2019	2020
Mehrkosten in %	17,16	33,01	17,08	35,71	13,73
Quelle	[37]	[36]	[40]	[42]	[37]

Für die Zukunft werden geringere Anschaffungskosten prognostiziert. 2025 können noch 10,00 % höhere Anschaffungskosten beim Vergleich von Gas- mit Dieselfahrzeugen erwartet werden, während sie sich bis 2030 durchaus auf 4,59 % reduzieren können und damit die Aussage von [38, S. 13] bestätigen. Die genauen Werte sind Tabelle 13 zu entnehmen:

TABELLE 13 **Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrenner-Lkws 2**

	2025		2030		
Mehrkosten in %	9,62	10,00	4,59	10,00	13,96
Quelle	[37]	[36]	[37]	[36]	[40]

Für den niedrigen Leistungsbereich bestätigt sich bei der Betrachtung der Anschaffungskosten für Busse, dass ein Gasverbrennungsantrieb mit (geringfügig) höheren Kosten als der Dieselerbrennungsantrieb verbunden ist. Konkret ergeben sich zum Beispiel für einen Linienbus mit Gasverbrennungsantrieb um 30.000 € höhere Anschaffungskosten als für ein vergleichbares Fahrzeug mit Dieselantrieb, was um 12,24 % höheren Kosten entspricht, die allein auf die antriebsspezifischen Komponenten zurückzuführen sind [41, S. 66].

Ähnliche Ergebnisse zeigen auch umfassendere TCO-Studien für die Fahrzeugklasse Bus, von denen sich bezogen auf den Vergleich von Gas- und Dieselantrieb aber weitaus weniger finden lassen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt:

TABELLE 14 **Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrennerbussen**

	2018		2020
Mehrkosten in %	10,25	11,11	17,65
Quelle	[43]	[44]	[45]

Um Fehlinterpretationen der aufgeführten Werte in den vorherigen und auch folgenden Tabellen vorzubeugen, sei darauf hingewiesen, dass sich die Jahresangabe lediglich auf den Betrachtungs- oder Prognosezeitpunkt der jeweiligen Studie bezieht. Insbesondere bei der Betrachtung eines kurzen Zeitraums kann daraus nicht auf die zukünftige Kostenentwicklung geschlossen werden.

Ergänzend finden sich in einer Studie auch konkrete Werte für den Vergleich von Diesel- und Wasserstoffverbrennungsantrieb bezogen auf verschiedene Fahrzeugklassen. Für den Einsatz in Lkws betragen die zusätzlichen Anschaffungskosten für einen Wasserstoffverbrennungs-Lkw aktuell noch 58,27 % gegenüber Diesel, während sie sich perspektivisch auf dem gleichen Niveau annähern [32, S. 38f.]. Bei Betrachtung der niedrigen Leistungsklasse entstehen beim aktuellen Erwerb eines Wasserstoffverbrennungs-Busses noch 75,00 % höhere Kosten als beim vergleichbaren Dieselmotorenmodell, wobei sich diese zusätzlichen Anschaffungskosten perspektivisch gesehen auf 14,63 % reduzieren [32, S. 36f.]

Kosten der Nutzungsphase

Für die laufenden Nutzungskosten der Fahrzeugantriebe werden als wesentliche Kostentreiber die Kraftstoffkosten sowie Kosten für Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt.

Reparatur- und Instandhaltungskosten

Für den Leistungsbereich von 350 kW ergeben sich für die vergangenen Jahre identische bis maximal 20,00 % höhere Reparatur- und Instandhaltungskosten für den Gasverbrennungsantrieb im Vergleich zum Dieselantrieb, was auf den ähnlichen Aufbau verbrennungsmotorischer Antriebssysteme zurückzuführen ist [36, S. 56]. Die genauen Werte sind Tabelle 15 zu entnehmen:

TABELLE 15 Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrenner-Lkws 1

	2015		2018	2019	2020
Mehrkosten in %	0,00	10,76	11,64	20,00	0,00
Quelle	[37]	[36]	[40]	[42]	[37]

Zukünftig können sich neben identischen Reparatur- und Wartungskosten bei optimistischer Einschätzung sogar Einsparpotenziale beim Gasverbrennungsantrieb im Vergleich zum Dieselantrieb ergeben, wie in folgender Tabelle ersichtlich wird:

TABELLE 16 **Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrenner-Lkws 2**

	2025		2030			
Mehrkosten in %	-1,06	0,00	-1,06	0,00	0,00	11,64
Quelle	[36]	[37]	[36]	[46]	[37]	[40]

Für den Einsatz des Gasverbrennerantriebs im niedrigeren Leistungsbereich ergeben sich aktuell ähnliche prozentuale Mehrkosten für Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen, wie zuvor für den hohen Leistungsbereich bereits aufgezeigt. Konkret liegen die Werte zwischen 9,09 % und 15,15 % höheren Kosten als beim Referenzantrieb Diesel, wie der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen ist:

TABELLE 17 **Spezifische Mehrkosten Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrennerbussen**

	2018		2020
Mehrkosten in %	9,09	11,20	15,15
Quelle	[44]	[43]	[45]

Kraftstoffkosten

Bei Betrachtung der Kraftstoffkosten ergeben sich erhebliche Einsparpotenziale im Vergleich zum Dieselerbrenner, wie in nachfolgender Tabelle beispielhaft für den hohen Leistungsbereich aufgeführt:

TABELLE 18 Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Gasverbrenner-Lkws

	2015	2019	2025	2030	
Mehrkosten in %	-39,63	-12,12	-47,32	-45,38	-17,13
Quelle	[36]	[42]	[36]	[46]	[46]

Zu beachten ist hier, dass die Ergebnisse des Erdgasverbrennungsmotors für den Bereich der Kraftstoffkosten *nicht* auf den Wasserstoffverbrennungsmotor übertragbar sind, da beide Antriebsvarianten zwar eine hohe technische Ähnlichkeit aufweisen, jedoch unterschiedliche Kraftstoffe nutzen. Für die Kraftstoffkosten bei Verwendung von Wasserstoff sei auf das folgende Kapitel, in dem Wasserstoff als Energieträger des Brennstoffzellenantriebs näher betrachtet wird, verwiesen.

In der Literaturrecherche konnte jedoch eine Studie identifiziert werden, die einen Vergleich der Kraftstoffkosten für den Betrieb von Lkws und Bussen mit Dieselerbrennungsantrieb und Wasserstoffverbrennungsantrieb ermöglicht. Aktuell können für den Betrieb eines 18-Tonnen-Lkw mit Wasserstoffverbrennungsmotor demnach spezifische Kraftstoffkosten identifiziert werden, die um 93,99 % höher liegen als die spezifischen Kraftstoffkosten des Dieselantriebs [32, S. 38f.]. Im Hinblick auf die spezifischen Kraftstoffkosten für den Betrieb von Bussen bestätigt sich dieses Bild. Der Wasserstoffverbrennungsantrieb erreicht hier spezifische Kraftstoffkosten, die um 96,47 % höher sind als die spezifischen Kraftstoffkosten des Dieselmotors [32, S. 36f.]. Diese erheblich höheren Kraftstoffkosten bei Verwendung von Wasserstoff ergeben sich aus dem aktuellen Wasserstoffbezugspreis von 9,50 €/kg, für den perspektivisch eine Senkung um mindestens 25,00 % angenommen werden kann [32, S. 30], sodass sich auch die Kraftstoffkosten eines Fahrzeugs mit Wasserstoffverbrennungsmotor in Zukunft erheblich reduzieren können.

Restwert

Am Beispiel der Lkws kann für konventionelle Dieselfahrzeuge beispielsweise von einer (Erst-)Nutzungsdauer von fünf Jahren ausgegangen werden, in der eine Laufleistung von 600.000 km erreicht wird. Bei Veräußerung für mögliche weitere Nutzungszyklen kann dann noch ein durchschnittlicher Restwert in Höhe von 24,90 % der Anschaffungskosten erreicht werden. Meist sind noch drei bis fünf

weitere Nutzungsjahre im Anschluss an diese (Erst-)Veräußerung möglich, sodass insbesondere diese schweren Nutzfahrzeuge in einem Second Lifecycle weiter genutzt werden können. Im Beispiel der hier betrachteten Lkw-Klasse sind so insgesamt Laufleistungen von 1 Mio. km erreichbar [36, S. 45]. Im Vergleich dazu kann für den Anwendungsbereich der Busse eine weitaus längere Fahrzeugnutzungsdauer beim Erstnutzer mit einer Dauer von beispielsweise zwölf Jahren angenommen werden [41, S. 67].

Werden Fahrzeuge in den betrachteten TCO-Studien nicht bis zum Ende der technischen Nutzungsdauer eingesetzt, wird der möglicherweise erzielte Wiederverkaufswert bei Betrachtung der spezifischen Anschaffungskosten berücksichtigt. Gleiches gilt für die TCO-Betrachtung des Brennstoffzellenantriebs.

4.3.3 TCO-Analyse des Brennstoffzellenantriebs

Anschaffungskosten

Brennstoffzellenantrieb allgemein

Gemäß aktuellen Veröffentlichungen aus dem Jahr 2020, die den Einsatz des Brennstoffzellenantriebs in hohen Leistungsbereichen, zum Beispiel zur Nutzung in Fernverkehr-Lkws, betrachten, ergeben sich für 2020 etwa dreimal so hohe Anschaffungskosten wie für vergleichbare Lkws mit Dieselantrieb. Bis 2025 erfolgt eine Reduktion auf etwa das Doppelte der Anschaffungskosten des Dieselfahrzeugs. Für das Jahr 2030 werden schließlich nur noch 64,78 % höhere Anschaffungskosten für den Brennstoffzellen-Lkw prognostiziert als beim Diesel-Lkw. Als wesentlicher Grund für diese Kostenentwicklung sind steigende Produktions- und Absatzzahlen anzunehmen [47, S. 12], [48, S. 38].

Bei Betrachtung der Auswertung von TCO-Studien, die den Brennstoffzellenantrieb im Vergleich mit dem Dieselantrieb zum Einsatz in Lkws untersuchen, ergeben sich positivere Werte. Während hier aktuell noch von etwa den doppelten Anschaffungskosten ausgegangen werden kann, reduzieren sich diese zusätzlichen Anschaffungskosten für Brennstoffzellen-Lkws auf 25,15 % bis zum Jahr 2030 im Vergleich zum Referenzantrieb Diesel, wie der nachfolgenden Tabelle entnommen werden kann:

TABELLE 19 Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Brennstoffzellen-Lkws

	2015	2019	2025	2030
Mehrkosten in %	116,48	100,00	47,17	25,15
Quelle	[36]	[32]	[36]	[36]

Bei Betrachtung der niedrigeren Leistungsklasse am Beispiel des Einsatzes des Brennstoffzellenantriebs in Bussen ergeben sich für den aktuellen Zeitraum stark differierende Werte, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt:

TABELLE 20 Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen

	2018		2019	2019	2020
Mehrkosten in %	124,44	184,92	123,60	225,00	48,15
Quelle	[44]	[43]	[49]	[32]	[50]

Da bei Betrachtung der TCO-Studien für beide Anwendungsbereiche keine einheitliche Kostenentwicklung erkennbar ist, wurden die Anschaffungskosten des Brennstoffzellenantriebs auf Komponentenebene näher untersucht. Dabei werden die Kosten relevanter Antriebskomponenten in Abhängigkeit von den Produktionsstückzahlen abgeschätzt, sodass auch die bereits angesprochene Kostendegression in Abhängigkeit von den steigenden Produktionsstückzahlen berücksichtigt wird.

Brennstoffzellensystem

Das Brennstoffzellensystem ist der eigentliche Energielieferant des Antriebssystems. Bei Verwendung von Brennstoffzellen ist darauf zu achten, dass die Wandlung der im Wasserstoff gebundenen chemischen Energie in die elektrische Nutzenergie am besten kontinuierlich im Arbeitspunkt des Brennstoffzellensystems erfolgt. Auf diese Art arbeitet das System in seinem optimalen Wirkungsgradbereich bei langer Lebensdauer [51, S. 212ff.].

⁴⁰ Es wird auf eine weitere Differenzierung der Kosten in Abhängigkeit von verschiedenen Leistungen und Einsatzzwecken verzichtet. Um Vergleichswerte liefern zu können, wird beispielhaft der Einsatz in einem Fernverkehr-Lkw mit einer Maschinenleistung von 350 kW angenommen.

Entsprechend den Stückzahlenszenarien können für das Brennstoffzellensystem die Herstellkosten der folgenden Tabelle entnommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer Antriebsleistung von 350 kW⁴⁰ eine Leistung des Brennstoffzellensystems von fast 200 kW angenommen werden sollte [36, S. 31], [52, S. 5ff.].

TABELLE 21 **Herstellkosten von Brennstoffzellensystemen [53, S. 30ff.]**

	Kosten			
	bei 1.000 Stück	bei 50.000 Stück	bei 100.000 Stück	bei 500.000 Stück
Brennstoffzellen-Stack	8.109,44 €	1.677,62 €	1.506,80 €	1.297,76 €
Balance of Plant (BoP)	4.205,80 €	1.969,45 €	1.867,45 €	1.753,55 €
BSZ-System gesamt für Lkws 350 kW (2 x Stack, 1 x BoP)	20.424,68 €	5.324,69 €	4.881,05 €	4.349,07 €

Die Batterie dient dem Ausgleich von Lastspitzen innerhalb der Nutzungszyklen, die durch die Brennstoffzelle nicht abgedeckt werden können. Außerdem sorgt die Batterie während ihrer Ladung für eine Grundlast des Brennstoffzellensystems in Situationen schwächerer Auslastung durch die Nutzungszyklen. Weiterhin kann mithilfe einer Batterie bei Verwendung entsprechender Motoren und Wechselrichter Bremsenergie rekuperiert werden. Die Kosten des Batteriespeichers werden hauptsächlich durch seine Kapazität und seinen Entwicklungsstand beeinflusst. So hat im Jahr 2010 eine Batterie ca. 800 €/kWh gekostet, aktuell belaufen sich diese Kosten auf rund 200 €/kWh, die sich bis 2030 weiter auf etwa 100 €/kWh reduzieren können [54, S. 44], [55, S. 66], [36, S. 43], [56, S. 33].

Für einen Lkw mit einer Antriebsleistung von 350 kW sollte eine Batterie von 70 kWh vorgesehen werden [36, S. 31], [52, S. 5ff.]. Damit sind aktuell Kosten von 21.000,00 € zu veranschlagen.

Elektromotor

Der Elektromotor besteht aus einer Vielzahl von Komponenten (Gehäuse; Rotor mit Welle, Wicklungen und teilweise Blechpaketen und Magneten; Stator mit Wicklungen und Blechpaketen), die in teilweise aufwendigen Fertigungsschritten montiert werden. Weiterhin existieren verschiedene Maschinentypen, die sich zum Teil in

ihren Wirkprinzipien unterscheiden. Jeder Maschinentyp hat somit Vor- und Nachteile für unterschiedliche Anwendungen, die im Rahmen der vorliegenden Studie aber nicht weiter untersucht und dargestellt werden.

Die Kosten für eine elektrische Maschine lassen sich gut entsprechend der Leistung sowie der Produktionsmenge skalieren. Die Werte sind als Durchschnittswerte standardmäßig verwendeter Maschinentypen zu verstehen.

TABELLE 22 **Herstellkosten von elektrischen Maschinen mit einer Leistung von 350 kW**

[57, S. 214ff.], [58, S. 3ff.], [59, S. 4f.], [60, S. 40ff.], [61, S. 300ff.], [62, S. 3ff.], [63], [64, S. 69ff.]

		Kosten			
		bei 1.000 Stück	bei 50.000 Stück	bei 100.000 Stück	bei 500.000 Stück
Elektromotor		6.490,71 €	3.409,15 €	3.121,99 €	2.576,40 €

Umrichter und Leistungselektronik

Zur Ansteuerung und Regelung der elektrischen Maschine wird ein Umrichter mit Leistungselektronik (LE) benötigt. Bei der Auswahl der Umrichterleistung muss beachtet werden, dass die Bauteile nicht auf die tatsächliche Antriebsleistung, sondern auf die Scheinleistung der elektrischen Maschine(n) ausgelegt werden müssen. Dementsprechend hängt die Wahl des Umrichters mit seiner Leistungselektronik auch maßgeblich von der Wahl des Maschinentyps ab [58, S. 3ff.], [59, S. 4f.], [65].

Auch für die Wechselrichter mit Leistungselektronik ergibt sich letztlich eine hauptsächlich von Antriebsleistung und Stückzahl abhängige Entwicklung der Herstellkosten.

TABELLE 23 **Herstellkosten von Umrichtern mit einer Leistung von 350 kW [58, S. 3ff.], [66, S. 8683ff.]**

		Kosten			
		bei 1.000 Stück	bei 50.000 Stück	bei 100.000 Stück	bei 500.000 Stück
Umrichter (DC/DC und LE)		6.421,56 €	3.387,65 €	3.024,73 €	2.324,99 €

Diskussion

Die Ergebnisse beschränken sich ausdrücklich auf die Komponenten innerhalb der technischen Systemgrenzen. Neben Kostendifferenzen beim Tanksystem sowie durch den Austausch des Getriebes ist nicht beachtet worden, dass je nach Anwendung Mehrmotorenkonzepte zum Einsatz kommen. Hierbei würde der einzelne Verbrennungskraftmotor durch mehrere (optimal ausgelegte) elektrische Maschinen ersetzt werden. Solche verteilten Konzepte beschränken sich oftmals nicht nur auf die Verteilung von Traktionsmotoren zu Achs- oder Radmotoren. Auch einzelne oder Gruppen von Nebenaggregaten werden dann von mehreren (verteilten) elektrischen Maschinen angetrieben.

Kosten der Nutzungsphase

Reparatur- und Instandhaltungskosten

Im Bereich der Reparatur- und Instandhaltungskosten eines Lkw können bei Einsatz eines Brennstoffzellenantriebs bereits aktuell Kosteneinsparpotenziale generiert werden gegenüber der Nutzung eines Dieselantriebs. Zurückzuführen ist dies vor allem auf die geringere Anzahl wartungsintensiver Bauteile des elektrischen Antriebsstrangs [36, S. 56]. Folglich ergeben sich hier für den brennstoffzellgetriebenen Lkw Kosteneinsparpotenziale gegenüber einem Diesel-Lkw, wie nachfolgender Tabelle zu entnehmen ist:

TABELLE 24 **Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Brennstoffzellen-Lkws**

	2015	2019	2025	2030		
Mehrkosten in %	66,78	-19,97	-9,09	-4,20	-9,09	-51,13
Quelle	[36]	[32]	[36]	[46]	[36]	[47]

Bei Betrachtung der TCO-Studien in Bezug auf Busse ergibt sich ähnlich wie bei der Betrachtung der Anschaffungskosten ein uneinheitliches Bild, wie folgende Tabelle zeigt:

TABELLE 25 Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Brennstoffzellenbussen

	2018		2019	2020
Mehrkosten in %	27,27	86,39	-9,78	27,27
Quelle	[44]	[43]	[49]	[45]

Einschränkend ist der eventuell notwendige Austausch von Batterie und Brennstoffzellensystem über die Nutzungsdauer zu berücksichtigen. Den TCO-Studien für Lkws liegt die Annahme zugrunde, dass innerhalb des Nutzungszyklus des Erstnutzers kein Ersatz erfolgen muss. Bei den Bussen kann einer Studie entnommen werden, dass die Batterie nach sechs Jahren und das Brennstoffzellensystem bereits nach vier Jahren ersetzt werden sollten [41, S. 67]. Annahmen und Angaben zur Nutzungsdauer von Brennstoffzellensystem und weiteren Komponenten unterscheiden sich in der betrachteten Literatur allerdings noch stark, sodass hier ein weiterer Forschungsbedarf identifiziert werden kann [54, S. 46]. Zukünftig sind für Brennstoffzellenantriebe auf Basis technologischer Weiterentwicklung längere Nutzungsdauern anzustreben. Für den Einsatz von Dieselnbussen müssen für diesen Teileersatz gemäß einer Studie so beispielsweise lediglich 0,04 \$/km angesetzt werden, während der Austausch wesentlicher Komponenten beim Brennstoffzellenbus mit 0,11 \$/km beziffert werden kann [49, S. 45].

Kraftstoffkosten

Die spezifischen Mehrkosten für Kraftstoff, die sich aus dem Vergleich von Diesel- und Wasserstoffpreis in Abhängigkeit vom jeweiligen Kraftstoffbedarf der Antriebskonzepte ergeben, weisen eine sehr große Spannweite auf. Aktuell liegt der Wasserstoffpreis bei rund 9,50 €/kg; er kann sich zukünftig jedoch, auch aufgrund der steigenden Abnahmemengen, bis auf ein Niveau von etwa 5,50 €/kg im Jahr 2030 reduzieren [36, S. 54]. Optimistischere Schätzungen gehen sogar von einem Preis unter 4,00 €/kg für das Jahr 2030 aus [48, S. 36], [37, S. 19]. Gleichzeitig besteht jedoch die Annahme, dass für das Jahr 2030 bereits eine Energiesteuer auf

Wasserstoff anfallen kann [36, S. 54]. Die Annahme sinkender Wasserstoffpreise spiegelt sich auch in der Auswertung der TCO-Studien hinsichtlich der Kraftstoffkosten wider. Bereits 2030 kann der Einsatz von Brennstoffzellen-Lkws hinsichtlich der Kraftstoffkosten kostengünstiger sein als der Einsatz von Diesel-Lkws, wie folgender Tabelle zu entnehmen ist:

TABELLE 26 **Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Brennstoffzellen-Lkws**

	2015	2019	2025	2030		
Mehrkosten in %	138,73	79,25	57,08	21,76	21,95	-7,69
Quelle	[36]	[32]	[36]	[36]	[46]	[47]

Die Analyse der TCO-Studien für die Anwendung Bus zeigt auch für die spezifischen Kraftstoffkosten ein ähnlich differierendes Bild wie zuvor bereits bei den Anschaffungs- sowie Reparatur- und Instandhaltungskosten. Die genauen Werte sind in folgender Tabelle dargestellt:

TABELLE 27 **Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Brennstoffzellenbussen**

	2018	2019	2020	
Mehrkosten in %	35,56	73,22	7,15	66,67
Quelle	[44]	[43]	[49]	[45]

Da insbesondere bei Lkws, die über ihre Nutzungsdauer sehr hohe Laufleistungen erreichen, die Kraftstoffkosten den größten Einfluss auf die TCO haben [42, S. 47], ergeben sich bei zukünftig erwarteten günstigen Wasserstoffpreisen erhebliche Einsparpotenziale für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge. Aufgrund dessen und des sparsameren Kraftstoffverbrauchs wird unter optimistischer Annahme davon ausgegangen, dass Lkws mit Brennstoffzellenantrieb bereits ab 2030 vergleichbare Gesamt-TCO wie Diesel-Lkws generieren können [48, S. 38].

Von dieser positiv prognostizierten Wasserstoffpreisentwicklung würde neben dem Brennstoffzellenantrieb ebenso der Wasserstoffverbrennungsantrieb profitieren.

4.3.4 Ergebnisse und ihre Interpretation

Bei Betrachtung der TCO des Wasserstoffverbrenners – unter Rückgriff auf Werte für den Gasverbrenner – ergeben sich im Bereich der Anschaffung für die Jahre 2018 bis 2020 im Vergleich zum Diesel im Mittel noch Mehrkosten in Höhe von 23,34 % für den Anwendungsbereich Lkw und Mehrkosten von durchschnittlich 13,00 % für den Anwendungsbereich Bus. Für Lkws konnte zudem aufgezeigt werden, dass zukünftig eine kostenseitige Annäherung des Gasantriebs an den Dieselantrieb erfolgt, sodass sich die Mehrkosten bis 2030 auf unter 10,00 % reduzieren können. Bei den Reparatur- und Instandhaltungskosten zeigen sich ähnliche Ergebnisse (Lkw: 2015 bis 2020 Ø 8,48 %, 2025 bis 2030 Reduzierung auf Ø 1,59 %; Bus: 2018 bis 2020 Ø 11,81 %). Die sich zukünftig ergebenden Einsparpotenziale aufgrund des günstigen Erdgaspreises sind jedoch nicht auf die Betrachtung des Wasserstoffverbrenners übertragbar.

Bei Betrachtung der TCO des Brennstoffzellenantriebs zeigen sich weniger homogene Ergebnisse als beim Gas- bzw. Wasserstoffverbrenner. Für den Anwendungsbereich Lkw liegen die Anschaffungskosten aktuell noch etwa doppelt bis dreimal so hoch wie beim Referenzantrieb Diesel, wobei sich diese Mehrkosten bis 2030 auf 25,15 % reduzieren können. Beim Blick auf die Anwendung Bus zeigt sich ein breites Spektrum an möglichen Mehrkosten gegenüber dem Dieselantrieb. Der Bereich Reparatur- und Instandhaltungskosten bringt bei Verwendung des Brennstoffzellenantriebs im Lkw bis 2030 bereits erhebliche Kosteneinsparpotenziale gegenüber Diesel mit sich. Diese Ergebnisse werden bei Betrachtung eines Brennstoffzellenbusses jedoch bis 2030 noch nicht erreicht. Weiterhin ist der aktuell noch hohe finanzielle Aufwand für den Austausch einzelner Komponenten des Brennstoffzellenantriebs nicht zu vernachlässigen. Mit Blick auf die Kraftstoffkosten können ebenfalls bereits 2030, unter optimistischen Annahmen, Kosten im Vergleich zum Dieseleinsatz eingespart werden. Von dieser Senkung des Wasserstoffpreises würde neben dem Brennstoffzellenantrieb auch der Wasserstoffverbrennerantrieb profitieren.

Die Ergebnisse der TCO-Auswertungen zum Gasverbrennerantrieb bestätigen dabei auch eine konkret auf den Wasserstoffverbrennerantrieb bezogene Aussage, der zufolge sich die Kosten perspektivisch den Kosten des Dieselantriebs annähern [34, S. 53].

Aus der TCO-Studien-Auswertung zum Brennstoffzellenantrieb lässt sich ableiten, dass sich die aktuell noch hohen Mehrkosten im Vergleich zur Referenz Diesel zukünftig reduzieren. Unter der Bedingung schnell sinkender Wasserstoffpreise können Brennstoffzellen-Lkws unter optimistischen Prognosen sogar bereits ab 2030 ähnliche TCO erreichen wie Diesel-Lkws [48, S. 38]

Es konnten insgesamt lediglich zwei Untersuchungen identifiziert werden, die eine direkte Gegenüberstellung von Wasserstoffverbrennerantrieb und Brennstoffzellenantrieb für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten vornehmen. Einer Studie zufolge schneidet der Wasserstoffverbrenner-Lkw aktuell geringfügig besser ab als der Brennstoffzellen-Lkw. Während beim Wasserstoffverbrenner-Lkw hinsichtlich der TCO von Mehrkosten in Höhe von 58,91 % gegenüber dem Diesel-Lkw auszugehen ist, belaufen sich diese Mehrkosten beim Brennstoffzellen-Lkw auf 65,62 %. Perspektivisch steigen die TCO des Diesel-Lkw, während die TCO von Wasserstoffverbrenner und Brennstoffzellenantrieb sinken, es verbleiben aber zukünftig dennoch Mehrkosten in Höhe von 4,61 % bzw. 12,20 % gegenüber Diesel. Bei Betrachtung der Anwendung Bus bestätigen sich diese Aussagen, jedoch mit geringfügig höheren Mehrkosten als beim Lkw [32, S. 36ff.]

Eine weitere Untersuchung betrachtet die TCO eines Lkw unter Nutzung des Diesel-, Wasserstoffverbrenner- und Brennstoffzellenantriebs für die Zukunft. Während 2025 sowohl der Wasserstoffverbrenner- als auch der Brennstoffzellen-Lkw zwar vergleichbare TCO, aber deutlich höhere TCO als der Diesel-Lkw aufweisen, erfolgt bereits 2030 eine Annäherung auf einem ähnlichen Niveau, sofern ein Wasserstoffpreis von etwa 6,00 €/kg erreicht wird. Für 2040 werden dann für beide wasserstoffbetriebene Fahrzeugvarianten bereits geringere TCO als beim Dieselmotell erwartet. Ebenso wird auch ein Vergleich für die Anwendung der drei Antriebskonzepte in einem 24-Tonnen-Bagger, als Beispiel einer Spezialanwendung, durchgeführt. Auch hier haben die Wasserstoffverbrenner- und die Brennstoffzellenanwendung vergleichbare TCO, die 2025 noch deutlich höher sind als bei der Dieselanwendung, sich jedoch 2030 auf ein gleiches Niveau begeben und bereits 2040 Kosteneinsparpotenziale gegenüber der Dieselanwendung aufweisen. Wenngleich der Wasserstoffverbrenner geringere Kosten für den Antriebsstrang aufweist, hat der Brennstoffzellenantrieb den höheren Wirkungsgrad, sodass dies als Grund für die vergleichbaren TCO-Werte angenommen werden kann [31, S. 10,13].

Für aussagekräftige Ergebnisse ist es jedoch zwingend notwendig, dass vor allem der Wasserstoffverbrennerantrieb hinsichtlich seiner Kosten in Studien differenziert untersucht wird.

4.3.5 Kritische Würdigung

Die Ergebnisse der einzelnen TCO-Studien sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da den Studien unterschiedliche Annahmen zugrunde liegen, die die Ergebnisse auch bei einheitlicher Darstellung als spezifische Kosten in €/km bzw. über ihre prozentuale Abweichung vom Referenzantrieb Diesel beeinflussen. Die identifizierten aktuellen (Mehr-)Kosten sowie die prognostizierten (Mehr-)Kosten können folglich lediglich eine Tendenz der Entwicklung darstellen. Neben unterschiedlichen Annahmen innerhalb der Studien schränkt auch die Tatsache, dass die Studien zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstanden sind, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie die Prognosegenauigkeit für die Jahre 2025 und 2030 weiter ein.

Die für die Zukunft prognostizierten Kosten unterliegen wiederum einer Vielzahl unsicherer Kosteneinflussfaktoren, deren zukünftige Entwicklung ebenso auf Basis von Annahmen abgeschätzt wird. Ein wesentliches Beispiel hierfür ist die zukünftige Preisentwicklung von Wasserstoff als Kraftstoff für Fahrzeuge. Die perspektivisch sinkenden TCO für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ergeben sich häufig vor allem durch den für die Zukunft angenommenen deutlich sinkenden Wasserstoffpreis, wie beispielsweise in [48, S. 38].

Eine weitere Einschränkung der Aussagekraft der Ergebnisse dieser Untersuchung ergibt sich aus der Verwendung des Gasverbrennungsmotors als Äquivalent zum Wasserstoffverbrennungsmotor. Wengleich die begründete Annahme eines ähnlichen Aufbaus sowie vergleichbarer Kosten beider Antriebskonzepte besteht, sind die Ergebnisse der Untersuchung des Gasverbrenners nur beschränkt auf den Wasserstoffverbrenner übertragbar. Insbesondere die Ergebnisse im Hinblick auf die Kraftstoffkosten sind für den Wasserstoffverbrenner nicht aussagekräftig. Zudem bedarf die verlässliche Abschätzung von Reparatur- und Instandhaltungskosten auch weiterer Erfahrungswerte aus dem tatsächlichen Einsatz in der Praxis. Um an dieser Stelle aussagekräftige und fundierte Ergebnisse hinsichtlich aktueller und zukünftiger Kosten eines Wasserstoffverbrenners ableiten zu können, sind wissenschaftliche Untersuchungen und Veröffentlichungen zum Wasserstoffverbrenner auch im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb notwendig.

Die Aussagekraft der Ergebnisse wird weiter eingeschränkt durch die ausschließlich statische Ermittlung und Darstellung der TCO. Dadurch wird der Umstand, dass Ein- und Auszahlungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in unterschiedlicher Höhe über den Lebenszyklus der Fahrzeuge hinweg anfallen, nicht adäquat berücksichtigt. Eine

derart differenzierte Erfassung des Zeitwertes von Zahlungsströmen kann eher auf Basis dynamischer Betrachtungen, etwa unter Nutzung der Kapitalwertmethode, erfolgen. Aufgrund der vielfältigen und mitunter nicht explizit aufgeführten Annahmen (z. B. zu Nutzungsdauern, Restwerten, Fahrzeugleistungen und Inflationsraten) und teilweise insgesamt zu gering differenzierter Kostenangaben innerhalb der analysierten Studien konnte eine Überführung der vorliegenden Daten in eine dynamische Betrachtung im Rahmen der hier durchgeführten Studie jedoch nicht zuverlässig und fundiert erfolgen.

4.4 SWOT-Analyse

Bei der SWOT-Analyse handelt es sich um ein Instrument der strategischen Planung, das der Positionierung gegenüber der Konkurrenz aus Unternehmenssicht dient. Betrachtet werden die Strengths (Stärken) und Weaknesses (Schwächen) als unternehmensinterne Perspektiven sowie die Opportunities (Chancen) und Threats (Risiken) als unternehmensexterne Einflussfaktoren [67, S. 516].

Im Folgenden wird eine SWOT-Analyse für das Produkt Wasserstoffmotor präsentiert, zunächst für den Wasserstoffverbrenner in Abgrenzung zu konventionellen Verbrennern, wie zum Beispiel dem Dieselerbrennungsmotor.

TABELLE 28 **SWOT-Analyse des Wasserstoffverbrenners im Vergleich zum Dieselerbrenner**

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Verringerung des Ausstoßes schädlicher Emissionen [34, S. 53] (Annahme: Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Noch in der (Weiter-)Entwicklung zur Erreichung einer Serienreife [34, S. 55] ➤ Herausforderung einer platzsparenden und kostengünstigen Wasserstoffspeicherung in den Fahrzeugen [36, S. 21]
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Erhebliche Kostenreduzierungspotenziale (in erster Linie für die Kosten der Nutzungsphase) in Abhängigkeit von der prognostizierten Wasserstoffpreisentwicklung [48, S. 36] (vgl. Kapitel 4.3.3) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Zukünftige Kostensenkungen bei Nutzung des Wasserstoffverbrenners resultieren auch aus der prognostizierten Wasserstoffpreisentwicklung [48, S. 36] (vgl. Kapitel 4.3.3) ➤ Negative Auswirkungen auf die Ökobilanz des Wasserstoffverbrenners, wenn kein grüner Wasserstoff verfügbar ist

Weiterhin wird auch eine SWOT-Analyse des Wasserstoffverbrenners im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb erstellt.

TABELLE 29 SWOT-Analyse des Wasserstoffverbrenners im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> — Für die Herstellung der Wasserverbrennungsmotors werden keine giftigen oder seltenen Materialien benötigt [35, S. 2], [68, S. 279] — Herstellungsprozess und Instandhaltungsvorgänge verbrennungsmotorischer Antriebe sind bekannt, auch notwendige Akteure und die nötige Infrastruktur sind vorhanden; es kann auf existierende Wertschöpfungsketten zurückgegriffen werden [35, S. 2], [68, S. 278f.] — Bestehendes Vertrauen der Kunden in Verbrennungsmotorenkonzept (Ergebnis der geführten Interviews) 	<ul style="list-style-type: none"> — Wasserstoffverbrennungsantrieb hat einen niedrigeren Wirkungsgrad als der Brennstoffzellenantrieb [31] sowie einen geringfügig höheren Kraftstoffverbrauch [32, S. 33, 36, 38] — Wasserstoffverbrennungsantrieb wird nicht als Zero-Emission (ZEV) eingestuft [20, S. 48]
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> — Nebenprodukt Wasserstoff der chemischen Industrie kann genutzt werden [34, S. 54], während der Brennstoffzellenantrieb möglichst reinen Wasserstoff benötigt [69, S. 5526] — Keine Anschaffung einer neuen Fahrzeugflotte notwendig, Umrüstung bestehender (konventioneller Verbrenner-)Flotte möglich [34, S. 53] — Vielfältige Einsatzmöglichkeiten, da Einsatz des Wasserstoffverbrenners identisch mit dem konventioneller Verbrennungsmotoren möglich ist [35, S. 9] — Nachgewiesene Haltbarkeit und Zuverlässigkeit verbrennungsmotorischer Antriebe [35, S. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> — Beschränkung auf ein Nischenprodukt mit geringen Absatzzahlen und daraus resultierenden geringen Kostendegressionseffekten

Die vorangegangene Analyse zeigt, dass der Wasserstoffverbrenner sowohl im Vergleich zum Dieserverbrenner als auch im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb jeweils Vor- und Nachteile aufweisen kann.

4.5 Analyse der Ressourceneffizienz

Ziel der folgenden Betrachtung soll es sein, einen Vergleich der Ressourceneffizienz des Wasserstoffverbrenners und des Brennstoffzellenantriebs vorzunehmen. Die Ressourceneffizienz kann einerseits umweltbezogen interpretiert werden, wobei die Emissionen und der Energiebedarf bei Produktionsprozessen bewertet werden. Andererseits gibt es die materialbezogene Betrachtung der Ressourceneffizienz, die auf einen möglichst geringen Bedarf an Rohstoffen bei Herstellungsprozessen abzielt [70, S. 68]. Eine Beurteilung der Ressourceneffizienz beider Antriebstechnologien erfolgt deshalb zunächst anhand der Darstellung ausgewählter ökologischer Wirkungen des Herstellungsprozesses. Anschließend soll näher auf für den Herstellungsprozess kritische Materialien und ebenso auf das Recycling dieser Rohstoffe eingegangen werden.

Die Ergebnisse einer österreichischen Studie vergleichen den Wasserstoffverbrennerantrieb mit dem Brennstoffzellenantrieb sowie Benzin-, Diesel- und CNG-Verbrennungsmotoren in Personenkraftwagen. Hinsichtlich der entstehenden Emissionen während der Fahrzeugherstellung werden zunächst die Treibhausgas-Emissionen (THG) betrachtet. Für die mit Verbrennermotoren ausgestatteten Fahrzeuge, einschließlich des Wasserstoffverbrenners, liegen diese vorgelagerten THG-Emissionen bei jeweils etwa 38 g pro Fahrzeugkilometer (g/Fkm), während sie beim Brennstoffzellenantrieb deutlich höher liegen, nämlich bei etwa 47 g/Fkm [71, S. 64ff.; 121].

Weiterhin entstehen bei der Fahrzeugherstellung NO_x -Emissionen. Für die Produktion des Wasserstoffverbrennerfahrzeugs werden, ähnlich wie bei der Produktion des Benzin-, Diesel- und CNG-Verbrenners, NO_x -Emissionen in Höhe von jeweils 0,08 g/Fkm abgeschätzt. Bei der Produktion des Brennstoffzellenfahrzeugs liegen diese Emissionen bei 0,12 g/Fkm [71, S. 69ff.; 121].

Ähnliches gilt für die Feinstaub-Emissionen während des Herstellungsprozesses der Fahrzeuge. Beim Wasserstoffverbrenner betragen sie etwa 0,042 g/Fkm (analog zum Diesel- und CNG-Verbrenner), während bei der Produktion des Brennstoffzellenfahrzeugs Feinstaub-Emissionen in Höhe von bis zu 0,059 g/Fkm entstehen [71, S. 73ff.; 121].

Als vierte ökologische Wirkung ist der Energieeinsatz für die Fahrzeugherstellung relevant. Das Brennstoffzellenfahrzeug weist mit 0,202 kWh/Fkm den höchsten Energieeinsatz auf, während er bei den Verbrennerfahrzeugen einschließlich des Wasserstoffverbrenners mit 0,186 kWh/Fkm geringfügig niedriger ausfällt [71, S. 78ff.; 121]. Als Grund für die jeweils höchsten Emissionswerte sowie den höchsten Energieeinsatz beim Brennstoffzellenfahrzeug ist der im Vergleich größte Materialaufwand für die Herstellung anzusehen [71, S. 64, 69, 74, 78].

Die Erkenntnis, dass der Herstellungsprozess von Verbrennerantrieben mit geringeren Emissionen verbunden ist als der Herstellungsprozess des Brennstoffzellenantriebs, belegen auch weitere Quellen ([72, S. 121]; [73]).

Einschränkend ist bei der Interpretation dieser Ergebnisse zu berücksichtigen, dass sich die aufgeführten vorgelagerten Emissionen bzw. der vorgelagerte Energieeinsatz ausschließlich auf die Fahrzeugherstellung beziehen. Weiterhin können je nach Antriebsart auch vorgelagerte Emissionen für die Energiebereitstellung (indirekte Emissionen, Well-to-Tank) sowie direkte Emissionen aus dem Fahrbetrieb (Tank-to-Wheel) anfallen. Die direkten Emissionen sind für Brennstoffzellenantriebe jedoch vernachlässigbar, da sie, analog zu rein batterieelektrischen Antrieben, keine direkten Emissionen aus dem Fahrbetrieb aufweisen [36, S. 36]. Ähnliche Aussagen hinsichtlich vernachlässigbarer direkter Emissionen existieren auch für den Wasserstoffverbrenner ([71, S. 67, 72, 76], [1, S. 19]), jedoch belegen andere Quellen auch geringfügige, auf die Wasserstoffverbrennung zurückführbare, NO_x -Emissionen (siehe Kapitel 2.3.5).

Besonders bei mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen können die indirekten Emissionen jedoch in Abhängigkeit vom Herstellungsprozess des Wasserstoffs stark variieren und erheblichen Einfluss auf die Höhe der Gesamtemissionen nehmen. Die Elektrolyse mit Strom aus fossilen Energiequellen ist mit den höchsten Emissionen verbunden, gefolgt vom Reforming mit Erdgas. Die geringsten Emissionen verursacht die Elektrolyse mit Strom aus regenerativen Energiequellen [36, S. 38]. Je nach Herstellungsprozess des Wasserstoffs kann der Brennstoffzellenantrieb hinsichtlich der insgesamt bei der Fahrzeugherstellung und -nutzung emittierten Emissionen dann sogar geringere Werte aufweisen als Verbrennerantriebe. Für die gesamten THG-Emissionen können für den Wasserstoffverbrenner Emissionswerte in Höhe von über 200 g/Fkm erreicht werden, während beim Brennstoffzellenantrieb THG-Emissionen lediglich in Höhe von über 160 g/Fkm entstehen.⁴¹ Den größten Einfluss auf diese gesamten THG-Emissionen haben die indirekten Emissionen aus der

41 Beispielhafte THG-Emissionen für die Wasserstofferzeugung aus Erdgasreformierung. Bei der Wasserstofferzeugung aus Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen können deutlich niedrigere Emissionswerte erreicht werden [71, S. 69].

Energiebereitstellung, die beim Wasserstoffverbrenner deutlich höher ausfallen als beim Brennstoffzellenantrieb [71, S. 69]. Die unterschiedlich hohen Emissionen aus der Energiebereitstellung des Wasserstoffs lassen sich mit den unterschiedlichen Wirkungsgraden und den damit verbundenen Energieverbräuchen beider Antriebe begründen [71, S. 65].

Vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der gesamten CO₂-Emissionen (Well-to-Wheel) mit insgesamt niedrigeren Emissionswerten für den Brennstoffzellenantrieb als für den Wasserstoffverbrennerantrieb zeigen auch Klell et al. [1, S. 19f.].

Ebenso bestätigen auch [40, S. 23] und [74, S. 108], dass hinsichtlich der Gesamtemissionen der Brennstoffzellenantrieb in Abhängigkeit von der Art der Stromerzeugung bei der Wasserstoffherstellung niedrigere Werte erreichen kann als verschiedene Verbrennerantriebe.

Die zuvor dargestellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf den Einsatz der verschiedenen Antriebe in Personenkraftwagen. Eine Untersuchung des Joint Research Centre zeigt unter anderem auch die THG-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge mit verschiedenen Antrieben auf. Einbezogen werden die indirekten Emissionen der Energiebereitstellung sowie die direkten Emissionen aus der Fahrzeugnutzung. Brennstoffzellenfahrzeuge weisen demnach aktuell noch höhere THG-Emissionen als Dieselfahrzeuge auf. Grund hierfür ist die Wasserstoffherstellung aus Elektrolyse mit Strom gemäß dem aktuellen EU-Strommix. Bereits ab 2025 können die Brennstoffzellenfahrzeuge infolge des steigenden Einsatzes erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung niedrigere THG-Emissionen als die Dieselfahrzeuge erreichen [75, S. 108].

Eine Untersuchung der ökologischen Wirkungen verschiedener Antriebe in Bussen belegt ebenso, dass die Fahrzeugherstellung eines mit Brennstoffzellenantrieb ausgestatteten Busses mit höheren CO₂-Emissionen verbunden ist als die Herstellung von Bussen mit verschiedenen Verbrennerantrieben. Ebenso bestätigen sich aktuell auch bei Betrachtung von Bussen die hohen CO₂-Emissionswerte aus der Energiebereitstellung bei Verwendung von Wasserstoff sowie das Vermeiden direkter Emissionen aus dem Fahrbetrieb [43, S. 32].

Neben den Emissionen sind, vor allem bei Betrachtung von Brennstoffzellenantrieben, auch weitere Umweltwirkungen relevant. Insbesondere hinsichtlich Toxizität und Verbrauch endlicher Ressourcen zeigt der Brennstoffzellenantrieb höhere Umweltwirkungen als andere Antriebstechnologien [76, S. 37]. Zu diesen kritischen Rohstoffen des Herstellungsprozesses von Brennstoffzellenantrieben zählen unter anderem Seltenerdmetalle wie Dysprosium, aber insbesondere auch Platin. Einen Überblick über kritische Rohstoffe für die Elektromobilität (einschließlich Brennstoffzellenantrieben) sowie für die Wasserstoffbereitstellung und -nutzung geben [76, S. 33f.] und [77, S. 34f.]. Für Platin wird zukünftig ein gegenläufiger Effekt hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs prognostiziert. Einerseits wird von einem steigenden Bedarf in Abhängigkeit von der zukünftigen Brennstoffzellenproduktion ausgegangen. Andererseits wird ein Nachfragerückgang bei der Verwendung in Autoabgaskatalysatoren, die beim steigenden Einsatz von Elektromobilität entfallen, erwartet [78, S. 668].

Die endliche Verfügbarkeit kritischer Materialien zur Produktion von Brennstoffzellen- und batterieelektrischen Antrieben erfordert ein Recycling der Rohstoffe. Während eine Kreislaufwirtschaft für seltene Erden wie Dysprosium nur in sehr geringem Umfang stattfindet, ist das Recycling von Kupfer oder auch Platin bereits weitestgehend aufgebaut [78, S. 674]. Die für einzelne kritische Rohstoffe aufgeführten Recyclingquoten bestätigen diese Aussagen [77, S. 108] und zeigen zugleich weiteren Entwicklungsbedarf bezüglich des Auf- und Ausbaus einer Kreislaufwirtschaft für kritische Rohstoffe im Bereich der Brennstoffzellenantriebe auf. Für (Diesel-)Verbrennerantriebe hingegen stehen auf Basis der seit Jahren etablierten Herstellungsprozesse gut entwickelte Recyclingverfahren zur Verfügung, die eine hohe Recyclingquote zulassen [79, S. 39f.].

5

Anwendungsanalyse zum Wasserstoffverbrennungsmotor

In diesem Kapitel werden unter Verwendung der vorangegangenen Erkenntnisse die Einsatzmöglichkeiten des Wasserstoffmotors analysiert und Vor- und Nachteile gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb beschrieben. Da es für den Wasserstoffmotor in der Literatur noch keine Beurteilung zu Anwendungen gibt, erfolgt die Analyse anhand der beschriebenen Eigenschaften aus den Kapiteln 3 und 4.

5.1 Können Wasserstoffmotoren und Brennstoffzellen koexistieren?

Jede Anwendung hat ihre spezifischen Anforderungen an den Antrieb eines Fahrzeugs. Da sich viele der Anforderungen bei den Anwendungen überschneiden, kann jedes Antriebssystem im Grunde auch die meisten Anwendungen bedienen. Jede Anwendung hat dabei eine bestimmte Priorisierung der Anforderungen, woraus sich für ein Antriebssystem mehr Vorteile ergeben als für andere. Und somit hat jedes Antriebssystem seine Berechtigung für mindestens eine Anwendung.

Der Wasserstoffmotor wie auch die Brennstoffzelle bedienen die Anforderung der umweltverträglichen, CO₂-neutralen Mobilität. Da dies die zentrale Forderung des aktuellen Umweltschutzes sowie von Politik und Gesellschaft ist, bieten beide Antriebe die Voraussetzungen für die nachhaltige Mobilität der kommenden Jahre. Auch hinsichtlich gesundheitsschädlicher Abgase sorgt der Wasserstoffmotor nicht für eine Verschlechterung der Luftqualität, da er nur sehr geringe Mengen an Stickoxiden emittiert. Somit spricht nichts gegen den Einsatz beider Antriebe, wobei sie bei vielen Anwendungen sicherlich in Konkurrenz zueinander stehen.

⁴² Quelle: <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/motive-modules>

⁴³ Quelle: <https://www.hydrogenics.com/hydrogen-products-solutions/fuel-cell-power-systems/mobility-power/heavy-duty>

⁴⁴ Quelle: <https://press.mantruckandbus.com/de/zero-emission-roadmap-vorgestellt>, abgerufen am 01.11.2020

Hinsichtlich eines Serienstarts sehen Experten der Brennstoffzellenhersteller erste Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb bis 2025 im Einsatz. Die Hersteller Ballard⁴² und Hydrogenics⁴³ haben bereits entsprechende Brennstoffzellensysteme auf dem Markt, die auch in den Lkws von Scania/Asko und VDL (vgl. Tabelle 8) zum Einsatz kommen. Auch MAN⁴⁴ kündigt ab 2023/2024 die ersten Flottenversuche mit beiden Antrieben an. Passend dazu plant die Robert Bosch GmbH den Einsatz des eigenen Brennstoffzellensystems in Nutzfahrzeugen ab 2023. Nach Aussagen des Experten des Unternehmens hat der Brennstoffzellenantrieb bereits eine Reife für den Flotteneinsatz erreicht, was beim Wasserstoffmotor frühestens 2025 der Fall sein wird [10]. Eine weitere Vorausschau ist auf Basis der vorhandenen Daten nicht möglich. Die Entwicklung hängt sehr stark von der gesetzgeberischen Reglementierung und der Förderung von Herstellern und Kunden ab. Nicht zu unterschätzende Faktoren für den Einsatz sind die Verfügbarkeit sowie der Preis von Wasserstoff und des Tanksystems, da sie den größten Einfluss auf die Kosten haben.

5.2 Einschätzung der mobilen / dynamischen Anwendungen

Im Bereich der mobilen Anwendungen werden die Antriebssysteme betrachtet, deren primäre Energiequelle Wasserstoff ist und deren Lastanforderung einen dynamischen Betrieb des Wasserstoffmotors oder des Brennstoffzellensystems erfordert. Gemeinsam haben alle mobilen Anwendungen, dass ihre Größe, ihr Gewicht und ihre Kosten möglichst niedrig sein sollen und die Effizienz hoch sein soll. Zusätzlich werden verschiedene weitere Anforderungen gestellt und die Gewichtung der Antriebseigenschaften variiert je Anwendung stark. Im Folgenden werden für die beiden Antriebssysteme Wasserstoffmotor und Brennstoffzellenantrieb in den vier Haupteigenschaften Größe und Gewicht, Wirkungsgrad und Kosten jeweils Tendenzen gezeigt, ohne auf die Gewichtung einzugehen. Für einige Anwendungen wird auch noch auf besondere Vorteile des jeweiligen Antriebs hingewiesen. Eine eindeutige Entscheidung, welcher Antrieb in welcher Anwendung besser ist, kann diese Studie nicht treffen, da dazu alle Anforderungen und ihre Gewichtung durch Hersteller und Kunden bekannt sein müssen.

5.2.1 Anwendung bei Personenkraftwagen

Im Pkw-Segment dominiert das batterieelektrische Fahrzeug bei den alternativen, CO₂-freien Antrieben. Bei Langstreckenwendungen für Pkws ziehen die meisten Hersteller den Brennstoffzellen-Hybridantrieb gegenüber einem Verbrenner vor. Im sehr preissensitiven Segment der Kleinst- und Kleinwagen kann der Wasserstoffmotor aufgrund der geringeren Herstellungskosten gegenüber Batterien und Brennstoffzellensystemen einen Vorteil erreichen. Das Wasserstofftanksystem ist dabei gesondert zu beachten, da dessen Kosten aktuell noch sehr hoch sind.

5.2.2 Anwendung bei Lastkraftwagen

Bei Lastkraftwagen sind der Nah-/Verteiler- und der Fernverkehr zu unterscheiden. Im städtischen Nah-/Verteilerverkehr und bei geringen täglichen Laufleistungen hat der batterieelektrische Antrieb deutliche Wirkungsgrad- und Kostenvorteile. Der Wasserstoffmotor inklusive des Tanksystems kann auf ähnliche oder geringere Kosten und Abmessungen kommen. Bei längeren täglich zurückgelegten Strecken und mittelschweren bis schweren Fahrzeugen kann der Brennstoffzellenantrieb Vorteile hinsichtlich der Reichweite durch den höheren Systemwirkungsgrad bei gleicher Größe aufweisen. Die höheren Anschaffungskosten stehen dem geringeren Verbrauch der Brennstoffzelle im Vergleich zum Wasserstoffmotor gegenüber. Bei schweren bis sehr schweren Lkws hat der Wasserstoffverbrennungsmotor durch die geringere Größe und Masse sowie bei den Kosten Vorteile. Sofern zusätzliche Anforderungen durch extrem hohe oder niedrige Umgebungstemperaturen bestehen, ist der Wasserstoffmotor zusätzlich im Vorteil.

5.2.3 Anwendung bei Bussen

Bei Stadtbussen ist das Brennstoffzellensystem im Vorteil aufgrund der deutlich höheren Systemeffizienz und der geringeren Abgas- und Geräuschemissionen, wie bereits im Projekt HyFLEET:CUTE nachgewiesen [3]. Da Stadtbusse auch in der Leistungskategorie 200 kW liegen, sind sowohl Größe als auch Gewicht des Antriebs mit dem Wasserstoffverbrenner vergleichbar. Der Fahrzyklus von Stadtbussen mit häufigem Anfahren und Bremsen ermöglicht dem Brennstoffzellenantrieb einen hohen Systemwirkungsgrad durch hohe Rekuperationsraten. Auch Reisebusse können von der größeren Reichweite durch höhere Effizienz, den niedrigen Geräuschemissionen und dem Hochvoltbordnetz (230-V-Lademöglichkeit für Geräte) profitieren.

5.2.4 Anwendung bei Baufahrzeugen und -maschinen

Baumaschinen und Baustellenfahrzeuge sind häufig in Umgebungen mit hoher Staub- und Schmutzbelastung in der Luft unterwegs. Hier hat der Wasserstoffmotor deutliche Vorteile gegenüber der Brennstoffzelle, da er toleranter und robuster gegenüber den Verunreinigungen in Luft und Kraftstoff ist. Zudem werden die Motoren sehr häufig im hohen und Volllastbereich betrieben, wie beispielsweise bei Baggern oder Planiertraupen, und durch die geringe Dynamik ist der Anteil der Rekuperation vergleichsweise niedrig, was den Systemwirkungsgrad des Brennstoffzellenantriebs auf das Niveau des Wasserstoffmotors drückt. Somit haben auch beide Antriebe einen vergleichbaren Wasserstoffverbrauch und im Leistungsbereich zwischen 100 kW und 200 kW eine ähnliche Größe und ein ähnliches Gewicht. Da bei Industriemotoren die Emissionsregulierung aktuell vergleichsweise gering ausfällt, ist eine Umrüstung der bekannten Motorentechnik auf Wasserstoff eine wirtschaftlichere Lösung.

5.2.5 Anwendung bei Agrarfahrzeugen

Landwirtschaftliche Fahrzeuge haben im Durchschnitt 100 kW bis 200 kW Motorleistung und sind im Arbeitseinsatz mit hohen Lastbereichen bzw. nur bei der An- und Abfahrt dynamisch und mit niedrigen Lasten unterwegs. Während des Einsatzes herrscht eine mittlere Temperatur- und Staubbelastung. Damit sind für die Fahrzeuge beide Antriebssysteme gleichwertig einsetzbar. Mit der weiteren Spezialisierung der Antriebe auf bestimmte Aufgaben können sich für jede Seite zusätzliche Vorteile ergeben, die im Einzelfall zu prüfen sind. Die Umrüstung der bestehenden Motorentechnik ist die wirtschaftlichere Lösung, da auch in diesem Bereich die Regulierung durch den Gesetzgeber vergleichsweise gering ist.

5.2.6 Anwendung bei Nischenprodukten

Kommunale Fahrzeuge wie Müllwagen, Kehrmaschinen oder Fahrzeuge für Landschaftsgärtner haben ähnliche Fahrprofile wie Stadtbusse und geringe Leistungen sowie hohe Anforderungen an die Emissionen, weshalb der Brennstoffzellenantrieb ähnlich wie beim Bus mehr Vorteile durch den höheren Systemwirkungsgrad und Null-Emissionen bietet. Zudem können elektrische Geräte an der Hochvoltbatterie direkt betrieben werden.

In sehr großen Fahrzeugen, wie zum Beispiel Muldenkippern oder Schwerlast-Zugmaschinen, mit Motorleistungen deutlich über 500 kW sind Wasserstoffmotoren aufgrund der geringeren Größe, der niedrigeren Kosten und der hohen Durchschnittslasten attraktiver. Zudem können bestehende Fertigungsanlagen und Motoren umgerüstet und weitergenutzt werden, was zusätzliche Kosten einspart. Das hohe Temperaturniveau des Verbrennungsmotors und die geringere Abwärme erleichtern die Kühlung der Aggregate bei den anwendungsbedingten niedrigen Geschwindigkeiten.

5.2.7 Anwendung bei Schiffen

Bei der Anwendung in Schiffen ist der Brennstoffzellenantrieb zu bevorzugen, da er durch den höheren Systemwirkungsgrad eine größere Reichweite und höheren Umweltschutz durch die geringeren Geräusch- und Abgasemissionen bietet. Zudem kann das Brennstoffzellensystem dezentral und modular beliebig oft im Schiff verbaut werden, womit sich trotz teils größeren Platzbedarfs der vorhandene Bauraum im Schiff optimal nutzen lässt. Das Hochvoltbordnetz kann die Maschinen und Geräte an Bord größerer Schiffe versorgen und es wird kein zusätzlicher Generator benötigt. Die geringeren Kosten durch Umrüstung bestehender Motoren und Nutzung bestehender Fertigungsanlagen sprechen wiederum für den Wasserstoffmotor.

5.3 Einschätzung der stationären / quasi-stationären Anwendungen

Stationäre und quasistationäre Anwendungen zeichnen sich durch einen Betrieb in überwiegend einem Lastpunkt oder in einem kleinen Lastbereich mit sehr geringen Lastanstiegen aus. Im Wesentlichen dienen sie der Energiebereitstellung und haben häufig einen Puffer zur Anwendung zwischengeschaltet. Für diese Anwendungen sind vor allem Betriebskosten und Wirkungsgrad sowie Lebensdauer ausschlaggebend. Größe und Gewicht sind nur im Falle eines Transports während oder zwischen den Einsätzen von Bedeutung. Im Folgenden werden für zwei Anwendungen die Tendenzen des jeweiligen Antriebssystems beschrieben, ohne auf eine Gewichtung der Anforderungen einzugehen.

5.3.1 Anwendung als Range-Extender in batterieelektrischen Fahrzeugen

Nach Tschöke [80] ist ein Range-Extender ein Energiewandler, der chemische in elektrische Energie wandelt und primär die Traktionsbatterie eines batterieelektrischen Fahrzeugs speist. Im Vergleich zum seriellen Hybridantrieb ist der primäre Energiespeicher bei einem Elektrofahrzeug mit Range-Extender die Traktionsbatterie, das zusätzliche Aggregat dient einzig der Erweiterung der Reichweite ohne Ladestation. Folgende Anforderungen werden an einen Range-Extender gestellt: geringer Bauraum und geringe Masse, niedrige Kosten bei hohem Wirkungsgrad sowie geringe Abgas- und Geräusch-/Vibrationsemissionen [80, S. 11]. Speziell bei den Geräusch- und Abgasemissionen ist zu vermeiden, die Klassifizierung als leises und emissionsfreies Elektrofahrzeug nicht auszuhebeln.

Der Wasserstoffmotor hat im Vergleich zum Brennstoffzellensystem Nachteile, da er aufgrund der zyklischen Verbrennung lauter ist und die Stickoxidemissionen nicht vollständig vermeidbar sind. Somit wäre bei einer strengen Auslegung ein Batterieelektrofahrzeug mit Range-Extender kein Zero Emission Vehicle (ZEV). Weiterhin hat das Brennstoffzellensystem einen höheren Wirkungsgrad und damit die größere Reichweite, da direkt elektrische Energie erzeugt wird und die Wandlung mechanischer in elektrische Energie entfällt. Nach Heron und Rinderknecht [81] erreichen Brennstoffzellen-Range-Extender einen Wirkungsgrad bis zu 60 % bei einer Leistungsdichte von 825 W/l und 650 W/kg, während Verbrennungsmotoren größer und schwerer sind mit einer deutlich geringeren Effizienz. Unter Annahme eines maximalen Wirkungsgrads des Wasserstoffmotors von 45 % [6] sowie von 90 % für die Wandlung mechanischer in elektrische Energie kann ein Range-Extender mit Wasserstoffmotor maximal 40 % der Kraftstoffenergie umsetzen.

Hinsichtlich der Herstellungskosten sehen [81] und [80] das Brennstoffzellensystem im Nachteil. Unter Berücksichtigung der Wasserstoffkomponenten und des zusätzlichen Aufwands für Isolation und Abgasnachbehandlung, um die Emissionsnachteile zu kompensieren, werden die Herstellungskosten des Wasserstoffmotors im Vergleich zum Ottomotor steigen. Bei Berücksichtigung des höheren Verbrauchs können sich die Gesamtkosten zwischen beiden Wasserstoffsystemen angleichen.

Range-Extender können sowohl im Pkw-Segment als auch bei den leichten Nutzfahrzeugen eingesetzt werden. Den Aufbau und den Vergleich zwischen Otto-, Diesel- und Brennstoffzellen-Range-Extendern für ein batterieelektrisches Nutzfahrzeug mit 12 t Gesamtgewicht zeigt [82].

5.3.2 Anwendung als stationärer Erzeuger einer Energieform

Als Stationärmotoren zur elektrischen Energieerzeugung eignen sich Wasserstoffmotoren nicht. Wie in Abschnitt 5.3.1 erläutert, haben Brennstoffzellensysteme einen höheren Wirkungsgrad bei ähnlichem Bauraum und ähnlichen Kosten.

Der Einsatz von Wasserstoffmotoren zur mechanischen Energieerzeugung, beispielsweise an Druckluft- oder Hydraulikaggregaten, hat den gleichen Wirkungsgrad wie ein Brennstoffzellensystem mit Elektromotor. Da bei diesen Aggregaten die Geräusch- und Abgasemissionen weniger relevant sind und der Wasserstoffmotor in der Anschaffung günstiger ist, überwiegen die wirtschaftlichen Vorteile gegenüber dem Brennstoffzellensystem.

5.3.3 Anwendung in Kraft-Wärme-Kopplung

Sowohl Brennstoffzellensysteme als auch Wasserstoffmotoren können in Blockheizkraftwerken genutzt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Systemen liegt im Verhältnis der Erzeugung von elektrischer zu Wärmeenergie. Der Verbrennungsmotor erzeugt mehr Wärme als elektrische Energie und ist damit für den Einsatz bei hohem Heizwärme- und Warmwasserbedarf, wie in großen Wohnblocks oder Schwimmbädern, vorteilhaft. Die Abgasemissionen liegen im stationären Betrieb mit wenigen Start-Stopp-Zyklen durch einen konstanten Magerbetrieb auf sehr niedrigem Niveau. Zudem ist die Nutzung von anderen gasförmigen Kraftstoffen möglich.

Eine Übersicht zu den Anwendungen für Wasserstoffmotoren und den Vergleich zu Brennstoffzellensystemen und -antrieben zeigt Tabelle 30.

TABELLE 30 Vergleich der Anwendungen von Wasserstoffmotor und Brennstoffzellenantrieben

Kriterium		Masse und Volumen (niedriger)	Systementwicklungs- grad (höher)	Kosten (niedriger)	Sonstige Eigenschaften	Gesamt
Anwendung	Leistungs- klasse					
Pkw gegenüber BEV	bis 50 kW	→	↓	↑	↓ Emissionen	→
	bis 200 kW	↑	↓	→	↓ Emissionen	↓
Lkw	bis 200 kW	↓	↓	→	↓ Emissionen	↓
	200 – 350 kW	→	↓	↑	↓ Emissionen	↓
	ab 350 kW	↑	→	↑	↓ Emissionen	↑
Schwerlast-FZ	ab 350 kW	↑	→	↑	–	↑
Omnibusse	bis 250 kW	↓	↓	→	↓ Emissionen ↓ Elektrisches Bordnetz	↓
Baumaschinen	–	→	→	↑	↑ Staub und Vibration	↑
Agrarfahrzeuge	bis 200 kW	→	→	↑	–	↑
Kommunale Fahrzeuge	bis 250 kW	→	↓	→	↓ Emissionen ↓ Elektrisches Bordnetz	↓
Schiffe	–	→/↑	↓	→/↑	↓ Umweltschutz	→
Range-Extender für BEV	–	↓	↓	↑	↓ Emissionen	↓
Antrieb zur Druck- erzeugung	–	→	→	↑	–	↑

Im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb ist der Wasserstoffmotor

↑ besser ↓ schlechter → gleich gut

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Metastudie wertet basierend auf Publikationen und Expertenaussagen die Potenziale für den Einsatz eines Wasserstoffverbrennungsmotors als alternativer Antrieb aus. In der Metastudie wird zum einen eine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik des Wasserstoffverbrennungsmotors gegeben und die aktuell offenen Forschungsfragen werden zusammengestellt. Zum anderen werden technische, wirtschaftliche und anwendungsbezogene Vergleiche mit der Brennstoffzellenantriebstechnologie gezogen sowie die Vor- und Nachteile beider Antriebssysteme gegenübergestellt.

Im Stand der Technik wird dargelegt, dass viele Grundlagen bereits erarbeitet sind und die technische Funktion nachgewiesen ist. Die chemischen und thermodynamischen Grundlagen für die Wasserstoffverbrennung sind allgemein bekannt, aber in Bezug auf die speziellen Bedingungen in einem Verbrennungsmotor noch nicht ausreichend erforscht. Für die Simulation des Verbrennungsprozesses wurden bereits erste Modelle veröffentlicht, kommerzielle Simulationsprogramme sind aber noch nicht vorhanden. In der technischen Umsetzung hat sich der saugrohrenblasende Motor als einfach und leicht umsetzbar mit Emissions- und Wirkungsgradvorteilen im mageren bis sehr mageren Betrieb herausgestellt. Nachteilig sind die geringe Leistungsdichte sowie die Neigung zu Rück- und Frühzündungen. Der direkteinblasende Motor kann diese Nachteile umgehen und erreicht eine deutlich höhere Leistungsdichte bei gleichzeitig geringen Emissionen. Die Direkteinblasung verursacht allerdings einen erheblichen Aufwand bei der Steuerung der Verbrennung und stellt wesentlich höhere Anforderungen an die Injektoren. Die Verfügbarkeit von Injektoren für die Direkteinblasung wird von Experten als großes Problem genannt. Bei der Zulassung von Fahrzeugen mit Wasserstoffmotoren werden diese in die Klassen mit

den niedrigsten Emissionen, in Kalifornien in die Kategorien SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) und TZEV (Transitional Zero-Emission Vehicle), eingeordnet, da sie hauptsächlich Wasserdampf und Stickoxide emittieren. Die Stickoxidemissionen können durch den Magerbetrieb und eine Abgasnachbehandlung auf ein sehr niedriges Niveau reduziert werden, vermeiden lassen sie sich aber nicht.

Im technischen Vergleich der Antriebssysteme mit dem Brennstoffzellen-Hybridantrieb haben sich Vorteile des Wasserstoffmotors bei Größe und Gewicht ab Leistungen von 350 kW, bei der Robustheit gegen Verschmutzung und im Thermomanagement herausgestellt. Das Brennstoffzellensystem ist bei Leistungen zwischen 100 kW und 250 kW kleiner und weist im Vergleich den höheren Systemwirkungsgrad und somit den geringeren Verbrauch auf. Auch hinsichtlich der Emissionen hat der Brennstoffzellen-Hybridantrieb den deutlich geringeren Umwelteinfluss. Ein Serieneinsatz des Brennstoffzellenantriebs kann bereits in den nächsten Jahren erfolgen, wohingegen der Wasserstoffmotor von Experten erst ab 2025 in einem Vor- oder Kleinserieneinsatz gesehen wird.

In der Literaturrecherche zur ökonomischen Analyse des Wasserstoffverbrenners zeigt sich die geringe Anzahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen hinsichtlich der Kosten dieses Antriebskonzepts. Während aktuell noch von Mehrkosten eines Wasserstoffverbrennungsmotors im Vergleich zu einem Dieselmotor ausgegangen werden muss, besteht für die Zukunft die Prognose sich angleichender Kosten für die Herstellung beider Motoren. Ähnliches gilt für die Betrachtung der TCO. Unter Rückgriff auf den Gasverbrennungsantrieb lassen sich für Fahrzeuganwendungen mit Wasserstoffverbrennungsantrieb zukünftige Kostenreduktionspotenziale identifizieren sowohl bei der Anschaffung als auch bei den Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen. Auf Basis der prognostizierten sinkenden Wasserstoffpreise ist ebenso ein Rückgang der Kraftstoffkosten wasserstoffbasierter Antriebe anzunehmen. Im konkreten Vergleich von Wasserstoffverbrenner- und Brennstoffzellenantrieb bewegen sich deren TCO auf einem ähnlichen Niveau. Zukünftig ist eine Annäherung der TCO beider Antriebskonzepte an das Niveau der TCO von Dieselantrieben bereits ab dem Jahr 2030 zu erwarten. Ein weiteres zentrales Ergebnis ist die Identifizierung der Notwendigkeit weiterer, differenzierter Untersuchungen zu den Kosten eines Wasserstoffverbrenners sowohl auf Ebene der Herstellung des Motors als auch auf Ebene der TCO von Fahrzeugen mit Wasserstoffverbrennungsantrieb. Zur weiteren Betrachtung des Wasserstoffverbrennungsantriebs erfolgte eine SWOT-Analyse zunächst im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren und weiterhin auch im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb. In beiden SWOT-Analysen konnten wesent-

liche Vor- und Nachteile des Wasserstoffverbrennungsantriebs identifiziert werden. Ebenso weist der Wasserstoffverbrennungsantrieb im Hinblick auf die Ressourceneffizienz sowohl Vor- als auch Nachteile gegenüber dem Brennstoffzellenantrieb auf.

Die Frage, ob eine Koexistenz beider wasserstoffbasierten Antriebe möglich ist, kann mit Ja beantwortet werden. Sowohl in der Automobilindustrie als auch im Industriemaschinenbereich wird von Experten in Zukunft ein Mix der Antriebe erwartet. Daraus folgend ergibt eine Analyse der Anwendungen, dass sich der Wasserstoffmotor vor allem in Bereichen mit hohen Leistungsanforderungen und geringem Bauraum sowie bei schwierigen und extremen Umweltbedingungen eignet. Explizit betrifft der große Leistungsbedarf schwere Transport- und Zugaufgaben. Die schwierigen Umweltbedingungen sind hauptsächlich im Baugewerbe mit staubiger und verschmutzter Luft zu finden und in Anwendungen wie Baggern, Planiermaschinen oder Frontladern sind Wasserstoffmotoren vorteilhaft. Ebenso ist der Wasserstoffmotor bei extremen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt oder über 40 °C ohne Einschränkungen einsetzbar.

Zusammenfassend ist der Wasserstoffmotor eine funktionale und umsetzbare Antriebstechnologie. Damit hat er das Potenzial zum alternativen Antrieb.

7 Anhang

Literaturverzeichnis

- [1] M. Klell, H. Eichlseder und A. Trattner, „Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung“, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [2] T. Hofherr, P. Hofmann, P. Grabner und H. Eichlseder, „Direkteinblasung von gasförmigen Kraftstoffen“, in: R. van Basshuysen (Hrsg.), „Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung“, 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [3] PE International GmbH, „HyFLEET:CUTE – Hydrogen Transports“, PE International GmbH, 2009 [online]. Available: https://www.eltis.org/sites/default/files/case-studies/documents/hfc_brochure_10_12_09_4.pdf [Zugriff am 30.10.2020].
- [4] W. Enke, M. Gruber, L. Hecht und B. Staar, „Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 06/2007, 2007.
- [5] D. Koch, S. C. Zeilinga, H. Rottengruber und A. Sousa, „Simulationsgestützte Entwicklung eines Wasserstoffmotors für einen emissionsfreien Verkehr“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 11/2017, 2017.
- [6] D. Koch, T. Ebert und A. Sousa, „Transformation vom Diesel zum H₂-Hoch-AGR-Magerkonzept“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 05/2020, 2020.

- [7] H. Rottengruber, U. Wiebicke, G. Woschni und K. Zeilinger, „Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission – Teil 3: Versuche und Berechnungen am Motor“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 61/2000, 2000.
- [8] C. Spuller, „Dieselbrennverfahren mit Wasserstoff für PKW-Anwendung“, Dissertation, Graz, 2011.
- [9] R. van Basshuysen und F. Schäfer (Hrsg.), „Handbuch Verbrennungsmotor – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven“, 8. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [10] Interview mit Herrn Noack, Director Sustainable Mobility Strategy Powertrain, Robert Bosch GmbH, 05.11.2020.
- [11] A. Sousa, „The Hydrogen Combustion Engine as the Most Effective CO₂-Reduction Technology Today“, Keyou GmbH, 21.11.2019 [online]. Available: https://www.kfz.tu-berlin.de/fileadmin/fg40/media/lehre/19-11-21_KEYOU_Hz-Engine-Today_TU-Berlin_AS.pdf [Zugriff am 03.11.2020].
- [12] H. Eichlseder, P. Grabner und K. Schaffer, „Internal Combustion Engine – An Alternative Energy Converter for Hydrogen“, TU Graz research, Nr. 23, 2020.
- [13] B. E. Gelfand, M. V. Silnikov, S. P. Medvedev und S. V. Khomik, „Thermo-Gas Dynamics of Hydrogen Combustion and Explosion“, Berlin: Springer-Verlag, 2012.
- [14] U. Gerke, „Numerical analysis of mixture formation and combustion in a hydrogen direct-injection internal combustion engine“, Dissertation, Zürich, 2007.
- [15] E. Sotiropoulou, S. Knepper, S. Deeken und F. Grewe, „Zero Emission – Die Evolution von Erdgas zu Wasserstoff mit Vorkammerzündung“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 06/2020, 2020.
- [16] P. Pechtl und F. Dorer, „Wasserstoff-Dieselmotor mit Direkteinspritzung, hoher Leistungsdichte und geringer Abgasemission – Teil 2: Untersuchung der Gemischbildung, des Zünd- und des Verbrennungsverhaltens“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 60/1999, 1999.

- [17] H. L. Yip, A. Srna, A. C. Y. Yuen, S. Kook, R. Taylor, G. H. Yeoh, P. Medwell und Q. N. Chan, „A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion“, Applied Science, Nr. 9(22):4842, 2019.
- [18] S. Verhelst und T. Wallner, „Hydrogen-fueled internal combustion engines“, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 35, Issue 6, 2009.
- [19] S. Verhelst, „Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines“, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 39, Issue 2, 2014.
- [20] M. Fouquet, „Niedrigstmissionskonzept für einen wasserstoffbetriebenen Verbrennungsmotor“, Dissertation, München, 2012.
- [21] Interview mit Herrn Dr. Töpfer, Koordinator Vorentwicklung, DEUTZ AG, 23.10.2020.
- [22] D. Koch, E. Eßner, S. Kureti und A. Sousa, „H₂-DeNO_x-Katalysator für H₂-Verbrennungsmotoren“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 06/2020, 2020.
- [23] „DieselNet“, ECOpoint Inc. [online]. Available: <https://dieselnet.com/standards/us/hd.php> und https://dieselnet.com/standards/us/ld_ca.php#leviii [Zugriff am 04.12.2020].
- [24] California Environmental Protection Agency – Air Resources Board, „CALIFORNIA EXHAUST EMISSION STANDARDS AND TEST PROCEDURES FOR 2018 AND SUBSEQUENT MODEL ZERO-EMISSION VEHICLES AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES, IN THE PASSENGER CAR, LIGHT-DUTY TRUCK AND MEDIUM-DUTY VEHICLE CLASSES“, USA, 2015.
- [25] F. Rodríguez und F. Posada, „FUTURE HEAVY-DUTY EMISSION STANDARDS“, International Council on Clean Transportation, Washington, DC, 2019.
- [26] T. Korn, „The new highly efficient hydrogen internal combustion engine as ideal powertrain for the heavy-duty sector“, in: J. Liebl, C. Beidl und W. Maus (Hrsg.), „Internationaler Motorenkongress 2019“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.

- [27] A. Schüers, A. Abel, H. Fickel, M. Preis und R. Artmann, „Der Zwölfzylinder-Wasserstoffmotor im BMW 750 hL“, MTZ Motorentechnische Zeitschrift, Nr. 02/2002, 2002.
- [28] J. Gomes Antunes, R. Mikalsen und A. Roskilly, „An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine“, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34, Issue 15, 2009.
- [29] Berliner Verkehrsbetriebe, „Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren“, Schlussbericht mit Förderkennzeichen 03BV219, 2015.
- [30] E. Rivard, M. Trudeau und K. Zaghbi, „Hydrogen Storage for Mobility: A Review“, Materials, 2019.
- [31] C. Rouaud, A. Trevisan und T. Downes, „Development of heavy-duty hydrogen powertrains for 2025+“, RICARDO TECHNOLOGY WEBINAR, 24.11.2020, 2020.
- [32] J. Meereis, T. Lutz-Kulawik, M. Rickert, A. Sitner, E. Dittberger und H. Meereis, „POTENZIALSTUDIE WASSERSTOFFWIRTSCHAFT“, IPP ESN POWER ENGINEERING GMBH, SKL ENGINEERING & CONTRACTING GMBH, Kiel, 2019.
- [33] Achleitner et al., „Formen und neue Konzepte“, in: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 131–246, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [34] A. Sousa und R. Läßle, „Eine weitere Alternative zum Dieselmotor? Wirtschaftlicher Nullemissionsbetrieb mit Wasserstoffmotor“, Der Nahverkehr, S. 53–55, 1+2, 2018.
- [35] T. Korn und G. Volpert, „The hybrid model of the new hydrogen combustion engine as the most efficient powertrain of tomorrow“, in: „Der Antrieb von morgen 2019“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [36] S. Kühnel, F. Hacker und W. Görz, „Oberleitungs-LKW im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr. Ein Technologie- und Wirtschaftlichkeitsvergleich“, Öko-Institut e.V., Berlin, 2018.

- [37] M. Moultak, N. Lutsey und D. Hall, „Transitioning to zero-emission heavy duty freight vehicles“, International Council on Clean Transportation, Washington, 2017.
- [38] M. Fries, M. Kerler, S. Rohr, S. Schickram, M. Sinning und M. Lienkamp, „An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017“, 2017.
- [39] H. Zhao, A. Burke und L. Zhu, „Analysis of Class 8 Hybrid-Electric Truck Technologies Using Diesel, LNG, Electricity, and Hydrogen, as the Fuel for Various Applications“, EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Barcelona, 2013.
- [40] M. Wietschel, „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für PKW und LKW“, Karlsruhe, 2019.
- [41] M. Heneka, D. Gerstein, W. Köppel und K. Kröger, „Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten (Busstudie)“, DVGW, Karlsruhe, 2019.
- [42] M. Mottschall, P. Kasten und F. Rodriguez, „Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective“, ICCT, Öko-Institut, Berlin, 2020.
- [43] R. Pütz, „Ökologischer und ökonomischer Vergleich der SWG-Busflotte in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung auf den Zeithorizonten ‚heute‘ und ‚mittelfristig‘“, Gießen, 2018.
- [44] D. Gerstein, M. Heneka und W. Köppel, „Einsatz von Gasbussen im ÖPNV. Ein Beitrag zum Klimaschutz und zur Luftreinhaltung“, DStGB, Berlin, 2019.
- [45] M. Heneka und W. Köppel, „Comparative evaluation of PtX processes for renewable fuel supply“, in: 19. Internationales Stuttgarter Symposium, Proceedings, https://doi.org/10.1007/978-3-658-25939-6_5, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019, S. 29–43.
- [46] T. Gnann, A. Kühn, P. Plötz und M. Wietschel, „How to decarbonise heavy road transport?“, ECEEE SUMMER STUDY PROCEEDINGS – CONSUMPTION, EFFICIENCY & LIMITS, S. 901–909, 2017.

- [47] J. Neuhausen, C. Foltz, P. Rose und F. Andre, „Making zero-emission trucking a reality. Truck Study 2020: Routes to decarbonizing commercial vehicles“, PWC, 2020.
- [48] Hydrogen Council, „Path to hydrogen competitiveness. A cost perspective“, Hydrogen Council, McKinsey & Company, E4tech, 2020.
- [49] Deloitte, „Fueling the Future of Mobility. Hydrogen and fuel cell solutions for transportation“, China, 2020.
- [50] M. Zeller, R. Luise, M. Sikka, N. Hartmann, H. Kim und T. Soylu, „Wasserstoffmobilität im ÖPNV der Stadt Offenburg und Umgebung – Konzeptentwicklung, technoökonomische Analyse und gesellschaftliche Akzeptanz ‚HzBus‘“, Forschungsbericht BWPLUS, Offenburg, Karlsruhe, 2019.
- [51] M. Hitscherich, „Polymerelektrolyt-Brennstoffzellensystem für ein autonomes Unterwasserfahrzeug“, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Fraunhofer ICT, Band 76, Hrsg.: Fraunhofer ICT, 2017.
- [52] C. Navas, „Development of Business Cases for Fuel Cells and Hydrogen Applications for Regions and Cities“, FCH/Roland Berger, Brüssel, 2017.
- [53] B. James, J. Huya-Kouadio, C. Houchins und D. DeSantis, „Mass Production Cost Estimation of Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2017 Update“, DoE – U.S. Department of Energy, Arlington, 2017.
- [54] VDI, VDE, „Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge. Bedeutung für die Elektromobilität“, Düsseldorf, 2019.
- [55] S. Bubeck, J. Tomaschek und U. Fahl, „Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany“, Transport Policy, S. 63–77, 50, 2016.
- [56] F. Hülsmann, M. Mottschall, F. Hacker und P. Kasten, „Konventionelle und alternative Fahrzeugtechnologien bei Pkw und schweren Nutzfahrzeugen – Potenziale zur Minderung des Energieverbrauchs bis 2050. Öko-Institut Working Paper 3/2014“, Öko-Institut, Freiburg, Darmstadt, Berlin, 2014.

- [57] B. Propfe, „Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen“, Dissertation, Stuttgart, 2016.
- [58] J. Wolff, „Geschalteter Reluktanzmotor – Drehmomentstarker Elektromotor mit kleinem Bauvolumen“, Universität Karlsruhe, Elektrotechnisches Institut, Karlsruhe.
- [59] A. Lange, W.-R. Canders, F. Laube und H. Mosebach, „Comparison of different drive systems for a 75 kW electrical vehicle drive“, International Conference on electrical machines – ICEM 2000, 2000.
- [60] W. Schuisky, „Elektromotoren: Ihre Eigenschaften und ihre Verwendung für Antriebe“, Wien: Springer, 1951.
- [61] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, „Elektromobilität – Grundlagen einer Zukunftstechnologie“, Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [62] N. Brachthäuser, „Elektromobilität – Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband“, C.D. Wälzholz GmbH & Co. KG, Hagen, 2012.
- [63] R. Cuenca, „Simple cost model for EV traction motors“, Argonne National Laboratory, Illinois, 1995.
- [64] J. Hagedorn, F. S.-L. Blanc und J. Fleischer, „Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz“, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [65] H. Buers, „Kenndaten von PV-Wechselrichtern“, Elektropraktiker, S. 890–896, 61/10, 2007.
- [66] G. Domingues-Olavarría, F. Pontus, A. Reinap, M. Andersson und M. Alaküla, „From Chip to Converter: A Complete Cost Model for Power Electronics Converters“, IEEE Transactions on Power Electronics, S. 8681–8692, DOI: 10.1109/TPEL.2017.2651407, Volume 32, No. 11, 2017.

- [67] D. Unrein, „Die SWOT-Analyse“, Wirtschaftswissenschaftliches Studium Wist, S. 516–519, September Heft 9, 2013.
- [68] R. Staiger und A. Tantau, „Geschäftsmodellkonzepte mit grünem Wasserstoff. Wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen für H₂ als nachhaltiger Energieträger“, Wiesbaden: Springer Gabler, 2020.
- [69] F. Hussain, F. S. Anuar, S. Rahman und S. A. Rafeq, „An overview of hydrogen as a vehicle fuel“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, S. 5511–5528, DOI: 10.1016/j.rser.2012.06.012 16, 2012.
- [70] G. Brauner, „Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung. Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [71] F. Pötscher, R. Winter, W. Pölz, G. Lichtblau, H. Schreiber und U. Kutschera, „Ökobilanz alternativer Antriebe – Elektrofahrzeuge im Vergleich“, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2014.
- [72] D. Kreyenberg, „Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität. Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen“, Dissertation, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [73] M. Pehnt und J. Nitsch, „Ökobilanzen und Markteintritt von Brennstoffzellen im mobilen Einsatz“, VDI-Konferenz „Innovative Fahrzeugantriebe“, Dresden 26./27.10.2000, Dresden, 2000.
- [74] G. Jungmeier, L. Canella, J. Pucker-Singer und M. Beermann, „Geschätzte Treibhausgasemissionen und Primärenergieverbrauch in der Lebenszyklusanalyse von Pkw-basierten Verkehrssystemen“, Joanneum Research, Zentrum für Klima, Energie und Gesellschaft, Graz, 2019.
- [75] M. Prussi, M. Yugo, L. De Prada, M. Padella und R. Edwards, „JEC Well-To-Wheels report v5. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context“, Publications Office of the European Union, DOI: 10.2760/100379, Luxemburg, 2020.

- [76] C. Agert et al., „Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Oldenburg, 2020.
- [77] B. Reuter, A. Hendrich, J. Hengstler, S. Kupferschmid und M. Schwenk, „Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien. Herausforderungen und Lösungsansätze“, e-mobil – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stuttgart, 2019.
- [78] M. Buchert und S. Dittrich, „Ressourceneffizienz und ressourcenpolitische Aspekte des Systems Elektromobilität“, in: „Recycling und Rohstoffe“ – Band 5, S. 665–678, Neuruppin: TK Verlag, 2012.
- [79] K. Göckeler, F. Hackler, M. Mottschall, R. Blanck, W. Görz, P. Kasten, T. Berneker und J. Heinzelmann, „Status quo und Perspektiven alternativer Antriebstechnologien für den schweren Straßengüterverkehr“, Öko-Institut, Berlin, 2020.
- [80] H. Tschöke, „Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs“, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [81] A. Heron und F. Rinderknecht, „Comparison of Range Extender Technologies for Battery Electric Vehicles“, in: Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, Monte Carlo, 2013.
- [82] D. Bergmann, S. Wedowski, J. Maiterth, C. Marten, S. Ghetti, M. Walters und E. Pietro Morra, „Range extender systems for electric drivetrains in medium-duty distribution vehicles“, in: Internationaler Motorenkongress, Wiesbaden, 2017.

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	Systemaufbau eines Wasserstoffmotors mit Komponenten der Robert Bosch GmbH © Bosch [10]	15
ABBILDUNG 2	Einteilung der Gemischbildungsverfahren [1, S. 205]	19
ABBILDUNG 3	Volllastpotenzial von Gemischbildungsverfahren [1]	20
ABBILDUNG 4	Betriebsstrategie des BMW Hydrogen 7 [4]	21
ABBILDUNG 5	NO _x -Emissionen bezogen auf das Luftverhältnis bei der Verbrennung eines homogenen Gemischs mit äußerer Gemischbildung [1]	25
ABBILDUNG 6	NO _x -Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge in Europa und den USA [25]	28
ABBILDUNG 7	Vergleich der Verlustleistungen und des Wirkungsgrads zwischen Otto-, Wasserstoff- und Dieselmotor [1]	29
ABBILDUNG 8	Vergleich der Verlustleistungen und des Wirkungsgrads zwischen Otto- und Wasserstoffmotor bei niedriger und mittlerer Last [18]	30
ABBILDUNG 9	Leistungskurve und Wirkungsgrad-/NO _x -Rohemissionskennfeld des Deutz/Keyou TCG 7.8 Hz [6]	32
ABBILDUNG 10	Internationale Verteilung der Patentveröffentlichungen zu Wasserstoffmotoren	37
ABBILDUNG 11	Patentveröffentlichungen nach Jahr ab 2000	38
ABBILDUNG 12	Patentveröffentlichungen nach Kategorie	39
ABBILDUNG 13	Schematischer Aufbau des Diesel- und Wasserstoffantriebs am Beispiel eines Nutzfahrzeugs	45
ABBILDUNG 14	Antriebswirkungsgrade von Wasserstoffmotor, Dieselmotor und Brennstoffzelle [31]	47

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1	Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen [1, S. 203]	12
TABELLE 2	Anforderungen an Hochdruckinjektoren für Wasserstoffdirekteinblasung	23
TABELLE 3	Kaliforniens LEV-III-Emissionsstandards für die Kategorie SULEV [23]	27
TABELLE 4	US EPA und Kaliforniens Emissionsstandards für schwere NFZ-Motoren [23]	28
TABELLE 5	Übersicht zu Leistung und Wirkungsgrad von Wasserstoffverbrennungsmotoren	33
TABELLE 6	Entwicklungsstand der Industrie nach Recherche und Expertenaussagen [10], [21]	34
TABELLE 7	Prototypen mit Straßenzulassung	35
TABELLE 8	Übersicht zu Brennstoffzellen-Lastkraftwagen	48
TABELLE 9	Größen- und Wirkungsgradvergleich bei 200 kW Antriebsleistung	49
TABELLE 10	Größen- und Wirkungsgradvergleich bei 350 kW Antriebsleistung	50
TABELLE 11	Vergleich der Eigenschaften von Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle [31]	52
TABELLE 12	Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrenner-Lkws 1	59
TABELLE 13	Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrenner-Lkws 2	60
TABELLE 14	Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Gasverbrennerbussen	60
TABELLE 15	Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrenner-Lkws 1	61
TABELLE 16	Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrenner-Lkws 2	62
TABELLE 17	Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Gasverbrennerbussen	62
TABELLE 18	Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Gasverbrenner-Lkws	63
TABELLE 19	Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Brennstoffzellen-Lkws	65

TABELLE 20	Spezifische Mehrkosten für die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen	65
TABELLE 21	Herstellkosten von Brennstoffzellensystemen	66
TABELLE 22	Herstellkosten von elektrischen Maschinen mit einer Leistung von 350 kW	67
TABELLE 23	Herstellkosten von Umrichtern mit einer Leistung von 350 kW	67
TABELLE 24	Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Brennstoffzellen-Lkws	68
TABELLE 25	Spezifische Mehrkosten für Reparatur und Instandhaltung bei Brennstoffzellenbussen	69
TABELLE 26	Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Brennstoffzellen-Lkws	70
TABELLE 27	Spezifische Mehrkosten für Kraftstoff bei Brennstoffzellenbussen	70
TABELLE 28	SWOT-Analyse des Wasserstoffverbrenners im Vergleich zum Dieselerbrenner	74
TABELLE 29	SWOT-Analyse des Wasserstoffverbrenners im Vergleich zum Brennstoffzellenantrieb	75
TABELLE 30	Vergleich der Anwendungen von Wasserstoffmotor und Brennstoffzellenantrieben	87

H₂

