

Systemvergleich zwischen Wasserstoff- verbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug

Eine technische und ökonomische Analyse
zweier Antriebskonzepte

Systemvergleich zwischen Wasserstoff- verbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug

Eine technische und ökonomische Analyse
zweier Antriebskonzepte

Herausgeber

e-mobil ^{BW} 
Landesagentur für neue Mobilitätslösungen
und Automotive Baden-Württemberg

Autoren



Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Management Summary	6
3	Motivation und Hintergrund der Studie	10
4	Vorgehen und Aufbau	14
5	Relevante Rahmenbedingungen für den Vergleich	18
5.1	Spezifikation eines schweren Nutzfahrzeugs	18
5.2	Das typische Fernverkehrsfahrzeug	20
5.3	Fahrprofile	20
5.4	Kundenanforderungen und Herstellerkriterien	22
5.5	Wirkungsgrade im Antriebsstrang	23
5.6	Motivation für Wasserstoff im Nutzfahrzeug	24
5.7	Wasserstoff als Kraftstoff	25
6	Die Alternativen: LKW mit Brennstoffzellen und Wasserstoffmotor	30
6.1	Die Brennstoffzelle als Antrieb für den Fernverkehr	30
6.1.1	Kurze geschichtliche Einführung zur Brennstoffzelle	30
6.1.2	Übersicht über unterschiedliche Brennstoffzellen-Technologien	30
6.1.3	Brennstoffzellen-System	32
6.1.4	Brennstoffzellen-Wirkungsgrade	33
6.1.5	Status heute als Antrieb	35
6.1.6	Brennstoffzellen für LKW	35
6.1.7	Ausblick auf zukünftige Systeme	36
6.1.8	Auslegung des Brennstoffzellenantriebs	36
6.2	Der Wasserstoffmotor	39
6.2.1	Wasserstoff im Verbrennungsmotor	39
6.2.2	Bisherige Wasserstoffmotor-Entwicklungen	39
6.2.3	Anforderungen an das schwere Nutzfahrzeug	39
6.2.4	Emissionsverhalten des Wasserstoffmotors	40
6.2.5	Ottomotorische Verbrennungskonzepte für das Nutzfahrzeug	44
6.2.6	Verbrennungskonzepte mit Selbst- und Dieselmotoren	45
6.2.7	Wasserstoffmotorkonzepte und deren Wirkungsgrad für die TCO-Betrachtung	47
6.2.8	Abgasnachbehandlung	48
6.2.9	Aktuelle Entwicklungen (Beispiele)	49
6.3	Wasserstoff im LKW	50
6.3.1	Einfluss der Wasserstoff-Tanksysteme	50
6.3.2	Benötigte Wasserstoff-Reinheit	53
7	Vergleich der beiden Antriebsformen für den schweren Fernverkehrs-LKW	56
7.1	Ökonomischer Vergleich anhand von TCO-Rechnungen	56
7.1.1	Grundlegende Fragestellung im Rahmen der TCO	56
7.1.2	Betrachtungszeit	56
7.1.3	Betrachtete Fahrzeugvarianten	57
7.1.4	Anschaffungskosten	57
7.1.5	Jährliche Betriebskosten	60
7.1.6	Ergebnisse der TCO-Rechnungen	65
7.1.6.1	TCO-Vergleich mit Bezugsjahr 2025 und einer Haltedauer von fünf Jahren	65
7.1.6.2	TCO-Vergleich mit Bezugsjahr 2030 und einer Haltedauer von fünf Jahren	67
7.1.6.3	TCO-Vergleich bei einer Haltedauer von zehn Jahren	69
7.1.6.4	TCO-Ergebnisse für einen konventionellen Dieselantrieb	70
7.1.6.5	Kurzzusammenfassung der TCO-Ergebnisse	72
7.2	Technischer Vergleich	72
7.2.1	Etablierte Technologie	72
7.2.2	Zuverlässigkeit	73
7.2.3	Lebensdauer	73
7.2.4	Emissionen	74
7.2.5	Kühlung	75
7.2.6	Auswirkungen auf das Fahrzeuggewicht und die zur Verfügung stehende Nutzlast	76
7.2.7	Mögliche Übererfüllung der minimalen Fahrzeuganforderungen (Fahrleistungen)	76
7.3	Schlussfolgerungen	77
8	Einsatz in anderen Anwendungen	80
9	Zusammenfassung	84
9.1	Fazit	84
9.2	Handlungsempfehlungen	87
	Literaturverzeichnis	90
	Abbildungsverzeichnis	94
	Tabellenverzeichnis	95
	Abkürzungsverzeichnis	96
	Anhang – Experteninterviews	97
	Auswahl der Interviewpartner	97
	Fragen an die Interviewpartner	97
	Ergebnisse der Interviews	98
	Technischer Reifegrad	98
	TCO-Betrachtung	98
	Erwartung zur Erfüllung der Gesetzgebung	98
	Auswirkungen auf Zuverlässigkeit, Lebensdauer oder Lärm	99
	Auswirkungen auf das Fahrzeug	99
	Wasserstoff-Infrastruktur	99

01

Vorwort

Nutzfahrzeuge emittieren etwa ein Drittel der Treibhausgase im innerdeutschen Verkehrssektor. Der größere Teil dieser Emissionen geht auf schwere Nutzfahrzeuge von 26 bis 40 Tonnen im Langstreckengüterverkehr zurück. Daher steckt in der Antriebstechnik schwerer Nutzfahrzeuge ein besonders hohes Potenzial, um einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehr ist die Elektrifizierung von Antrieben ein wichtiges Lösungselement, das mit batterieelektrischen Antrieben, Hybrid-Oberleitungs-LKW sowie Brennstoffzellenantrieben in Kombination mit einem Elektromotor erreicht werden kann. Alternativ besteht die technische Möglichkeit, den Wasserstoff in einem Wasserstoffhubkolbenmotor zu verbrennen. Beide Wasserstoffantriebe – Brennstoffzelle mit E-Motor und Hubkolbenmotor – sind Optionen für Fahrzeuge mit höheren Anforderungen an Leistung, Reichweite und Flexibilität. Für beide Varianten werden ein Tanksystem im Fahrzeug und eine Wasserstoffinfrastruktur benötigt.

Aktuell kann nicht abschließend geklärt werden, welche Technologie sich langfristig am Markt durchsetzen oder ob es eine Koexistenz der Antriebskonzepte geben wird. Dennoch will diese Studie eine Orientierung bezüglich der Vor- und Nachteile bieten. Dies ist gerade für Unternehmen mittlerer Größe von Bedeutung, die sich strategisch überlegen, in welche Zukunftstechnologien sie heute investieren.

In den neuen Energietechnologien der Mobilität lassen sich verschiedene Wachstumsfelder identifizieren. Die innovative Gestaltung ermöglicht Chancen sowohl für den Klimaschutz als auch für die Innovationskraft der Unternehmen. Eine Voraussetzung für den Erfolg neuer Antriebstechnologien ist die marktgerechte Verfügbarkeit regenerativer Energieformen wie z. B. grünen Stroms oder grünen Wasserstoffs. Nur mit neuen emissionsarmen Antrieben kann auch der Nutzfahrzeugsektor seinen wichtigen Beitrag für den Klimaschutz leisten.

Franz Loogen
Geschäftsführer, e-mobil BW GmbH



© Chesky_W/istockphoto

02 Management Summary

Der Europäische Green Deal und die zu erwartende Anhebung des Treibhausgasminderungsziels für Europa von –40 % auf –55 % bis 2030 (ggb. 1990) werden gerade im Verkehrssektor aller Voraussicht nach zu einer weiteren Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen an das Emissionsverhalten der Fahrzeuge führen und den Druck auf die Fahrzeughersteller zur Einführung alternativer Antriebe zusätzlich erhöhen.

Vor diesem Hintergrund vergleicht die vorliegende Studie explizit zwei wasserstoffbetriebene Antriebsarten für schwere Nutzfahrzeuge: Den Wasserstoffmotor, einen 6-Zylinder-Reihenmotor basierend auf dem Hubkolbenmotorprinzip (H₂-Motor), und die Wasserstoff-Brennstoffzelle (H₂-BZ) als Optionen für einen langfristig klimaneutralen Schwerlastverkehr. Für beide Alternativen wurden dabei mögliche technische Auslegungen identifiziert, die das Einsatzspektrum des Diesel-Fernverkehrsfahrzeugs abdecken. Der Vergleich berücksichtigt verschiedene Zeithorizonte: ab 2025 und über 2030 hinaus (2030+), um sowohl kurzfristige als auch längerfristige Entwicklungsrisiken und -potenziale abzubilden. Er basiert auf klar definierten Kriterien wie der technischen Realisierbarkeit, der möglichen Emissionsminderung, den Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) und dem Änderungsbedarf gegenüber bestehenden Fahrzeugkonzepten. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die H₂-BZ langfristig zur führenden (Wasserstoff-)Technologie im Güterverkehr entwickeln dürfte. Gleichzeitig erweist sich eine parallele Entwicklung von H₂-Motor und Brennstoffzellenantrieb im schweren Nutzfahrzeug als zielführend, insbesondere aufgrund der höheren Entwicklungsrisiken für die H₂-BZ auf dem Weg zur Industrialisierung.

Technische Realisierbarkeit bis 2025

H₂-Motor und H₂-BZ erscheinen in einer Zeitspanne bis 2025 realisierbar, weisen aber beide noch Entwicklungsrisiken auf. Beim H₂-Motor bestehen diese vorrangig in der derzeit noch limitierten Anzahl an Zulieferern für Kernkomponenten wie Einspritzsysteme. Bei der H₂-BZ liegen die

größten Herausforderungen in der Entwicklung einer adäquaten Kühlarchitektur und der raschen Realisierung von Kostensenkungen für die Brennstoffzellensysteme durch Skalierung, Industrialisierung der Fertigung und der Generierung entsprechender Stückzahlen.

Zuverlässigkeit der Fahrzeuge

Sowohl die H₂-BZ als auch der H₂-Motor sollen perspektivisch die Kundenanforderungen vollumfänglich erfüllen. Die H₂-BZ punktet durch ihre deutlich geringere mechanische Komplexität, muss aber noch in das Fahrzeug integriert werden. Die höhere Komplexität des H₂-Motors sollte durch die Verfügbarkeit der Komponenten und die Übertragbarkeit der Erkennungsmethodiken für Fehlermodi vom konventionellen Verbrennungsmotor kompensiert werden.

Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele und weitere Emissionsminderung

Beide Konzepte weisen ein sehr hohes CO₂-Reduktionspotenzial auf: Der H₂-Motor erreicht eine CO₂-Emissionsminderung von >98 %, die H₂-BZ ist vollständig emissionsfrei in Bezug auf aktuell definierte Schadstoffe in der Automobilindustrie. Auch bezüglich der Emission von Luftschadstoffen ist die H₂-BZ emissionsfrei, während im H₂-Motor durch den Verbrennungsprozess weiterhin Luftschadstoffe freigesetzt werden. Diese bleiben jedoch deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten oder können durch eine Abgasnachbehandlung auf das gesetzlich geforderte Niveau reduziert werden. Im Standbetrieb und bei niedrigen Geschwindigkeiten weist die H₂-BZ zusätzlich deutlich reduzierte Lärmemissionen im Vergleich zum Wasserstoffmotor auf, wobei dies eine untergeordnete Rolle für den Fernverkehr spielt.

Änderungsbedarf bezüglich bestehender Fahrzeug- und Fertigungskonzepte

Für den Fahrzeughersteller stehen auch die Verfügbarkeit der Technologie, der Entwicklungsaufwand und die Auswirkungen der neuen Technologie auf die aktuellen Abläufe im

Unternehmen im Fokus. Hier weist der H₂-Motor klare Vorteile auf, da mit Ausnahme des Tanksystems keine großen Veränderungen im Vergleich zu bisherigen Fahrzeugkonzepten erforderlich sind. Der Antriebsstrang bedarf keiner wesentlichen Veränderungen, die bestehenden Zulieferstrukturen der Fahrzeughersteller können weitestgehend aufrechterhalten werden und es ist kein vollständig neues Know-how erforderlich. Die höheren Anforderungen der H₂-BZ an die Fahrzeugkühlung sowie die Integration des elektrischen Antriebsstrangs weisen einen deutlich größeren Änderungsbedarf bestehender Fahrzeugkonzepte auf.

Total Cost of Ownership (TCO)

Der TCO-Vergleich der beiden Wasserstoffkonzepte macht leichte Vorteile für die H₂-BZ deutlich, zeigt insgesamt jedoch nur geringe Unterschiede zwischen beiden Technologien. Hervorzuheben ist, dass H₂-BZ-Antriebe besonders kurzfristig eine große Kostenschwankungsbreite haben, aufgrund der Unsicherheit hinsichtlich des Industrialisierungsgrads. Dadurch kann der H₂-Motor im Zeitraum bis 2030 vorteilhafter im Vergleich zur H₂-BZ sein. Im Zeitraum 2030+ weisen die H₂-BZ-Varianten in allen Fällen leichte Vorteile gegenüber den H₂-Motor-Varianten auf. Mit längeren Fahrzeughaltedauern (zehn statt fünf Jahre) verschiebt sich das Verhältnis aufgrund der geringeren Wartungskosten zugunsten der H₂-BZ. Im Vergleich zum Dieselmotor sind beide Wasserstoff-Konzepte kurzfristig in der TCO-Betrachtung nur bei einem Dieselpreis von mindestens 1,50 EUR pro Liter, den geringstmöglichen Anschaffungskosten der Wasserstoff-Konzepte sowie sehr niedrigen Wasserstoffkosten wettbewerbsfähig. Mittelfristig können sich ab 2030 durch die avisierten Kostendegressionen bei den Wasserstoffantrieben TCO-Vorteile gegenüber dem Dieselantrieb einstellen. Dies erfordert jedoch flankierende Rahmenbedingungen.

Maßnahmen zur Unterstützung des Markthochlaufs

Die Studienergebnisse zeigen, dass insbesondere mit Blick auf einen Beitrag zur CO₂-Emissionsminderung im Jahr

2030 die Entwicklung beider Technologien zielführend erscheint. Beide Antriebsalternativen sind daher gleichermaßen zu fördern. Zentral für die kurzfristige Wettbewerbsfähigkeit sind dabei beispielsweise eine Befreiung von der Mautverpflichtung oder eine CO₂-Bepreisung. Auf Seiten der Fahrzeugbetreiber könnten zudem Förderinstrumente wie Zuschüsse zu den Anschaffungskosten die Investitionsentscheidung positiv beeinflussen, nicht zuletzt, weil der Einstieg in eine wasserstoffbasierte Logistik ggf. die Abkehr von etablierten Verhaltensweisen und typischen Nutzungsprofilen erfordert.

Hinzu kommt der erforderliche dynamische Aufbau einer flächendeckenden Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff sowie die Verfügbarkeit von kostengünstigem, klimaneutralem Wasserstoff. Dies sind Grundvoraussetzungen für Investitionsentscheidungen zugunsten von Wasserstofftechnologien auf Seiten der Flottenbetreiber. In diesem Kontext ist ebenfalls wichtig, dass sich mindestens mittelfristig auch in Zweitmärkten Wasserstoffinfrastrukturen etablieren, damit erfolgreiche Weiterverkäufe von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieben in diese Märkte erfolgen können. Gezielte Forschungs- und Entwicklungsförderung sollte zeitnah erfolgen und somit die Zeitspanne zur Markteinführung verkürzen helfen. Sie sollte die offenen Fragen bezüglich der Kühlarchitektur für die H₂-BZ, deren Skalierung und die Industrialisierung der Fertigung ebenso adressieren wie die Herausforderungen für die Serieneinführung des Wasserstoffmotors, unter anderem auch für die Realisierung einer hocheffizienten Wasserstoff-Hochdruck-Direkteinspritzung und die Verfügbarkeit und technische Umsetzung von H₂-Hochdruckverdichtern oder H₂-Kryogenpumpen für den mobilen Einsatz.

03

Motivation und Hintergrund der Studie

03

Motivation und Hintergrund der Studie

Die derzeit gültige Richtlinie EU 2019/1242 zur CO₂-Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge in der Europäischen Union schreibt eine Reduktion der CO₂-Emissionen von neuzugelassenen Fahrzeugen von 15 % für das Jahr 2025 und 30 % für das Jahr 2030 vor [EU 2019/1242]. Als Systemgrenze wird hier der „Tank zu Rad“-Ansatz (Tank to Wheel, TTW) verfolgt. Im Kontext der Diskussion um eine Verschärfung der Klimaziele auf europäischer Ebene ist für das Jahr 2022 eine Revision der Gesetzgebung unter Berücksichtigung des erzielten Fortschritts geplant sowie eine Verschärfung der Zielsetzung für das Jahr 2030 zu erwarten.

Für die CO₂-Emissionsminderung im schweren Nutzfahrzeug stehen dabei im Sinne der Gesetzgebung vier wesentliche Hebel zur Verfügung:

- (a) die Verringerung der notwendigen Antriebskraft durch Verbesserungen hinsichtlich der Aerodynamik des Fahrzeugs und eine Verringerung des Rollwiderstandes durch Leichtlaufreifen,
- (b) die Verbesserung des Wirkungsgrades des bestehenden Antriebssystems,
- (c) der Einsatz von Kraftstoffen mit geringerem oder keinem Kohlenstoffanteil,
- (d) der Wechsel des Antriebssystems zu CO₂-ärmeren oder emissionsfreien Formen.

Dem Effizienzpotenzial evolutionärer Optimierungsmaßnahmen wie der Verbesserung der Aerodynamik, der Verminderung des Rollwiderstands der Reifen und weiterer Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der bestehenden Antriebssysteme sind jedoch Grenzen gesetzt.

Aus diesem Grund stehen gerade alternative Antriebssysteme im Fokus, da sie weitergehende CO₂-Minderungen versprechen. Im Bereich des Einsatzes von LKW für leichtere Anwendungen und Anwendungen mit kürzeren Reichweiten mit der Möglichkeit, „zwischenzuladen“, ohne bisher übliche Betriebsabläufe zu sehr zu verändern, setzt sich unter den momentanen Rahmenbedingungen der batterieelektrische Antrieb als CO₂-freier Antrieb durch. Das ist auch dem bereits hohen Technologiereifegrad der batterieelektrischen Antriebe geschuldet, die von der zunehmenden Technologiediffusion im PKW-Segment profitieren.

Für Fahrzeuge mit höheren Leistungsanforderungen und längeren Reichweiten stehen wasserstoffbasierte Antriebssysteme im Mittelpunkt des Interesses. Dies ist auf die höhere sowohl gravimetrische als auch volumetrische Energiedichte des Wasserstoffs im Vergleich zu aktuellen Batterietechnologien und die hiermit verbundenen Gewichtsvorteile des Wasserstoffantriebs zurückzuführen.

Wasserstoff als chemischer Energieträger wird mit Blick auf die Anforderung der Klimaneutralität des Energiesystems bis zum Jahr 2050 und der damit verbundenen Notwendig-

keit, auch einen klimaneutralen Verkehrssektor zu realisieren, in vielen Studien als Grundpfeiler der Energiewende gesehen. In einer großen Zahl von Studien, die in den Jahren 2019 und 2020 veröffentlicht wurden, werden die Vor- und Nachteile einer Wasserstoff-Wirtschaft ausführlich diskutiert. Eine gute Übersicht hierüber gibt [LBST 2020].

Als Lösung der Treibhausgasemissionsproblematik für den Schwerlastverkehr bietet Wasserstoff zwei Anwendungsfelder. Wasserstoff kann sowohl im konventionellen Antriebsstrang als Treibstoff für Verbrennungskraftmaschinen (H₂-Motor) als auch für das Betreiben einer Brennstoffzelle (H₂-BZ) in Kombination mit einem elektrischen Antriebsstrang eingesetzt werden.

Da bisher nur in unzureichendem Maße vergleichende Analysen der Vor- und Nachteile beider Technologieansätze für den Einsatz im Schwerlastverkehr vorliegen, widmet sich diese Studie dem Vergleich der beiden wasserstoffbasierten Technologieansätze für schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr. Das Ziel ist eine objektive Bewertung dieser beiden Antriebe, um die Vor- und Nachteile für den genannten Anwendungsfall zu beurteilen. Die Objektivität wird ermöglicht durch die einheitliche Definition der Anwendung, die Auslegung, welche die typischen Fahrleistungen (Geschwindigkeit, Steigfähigkeit, Beschleunigung und dergleichen) eines heutigen konventionellen dieselbetriebenen LKW erfüllt, das gemeinsame zugrundeliegende Fahrprofil und desselben Bezugszeitpunktes der Betrachtung. Des Weiteren ana-

lysiert die Studie wichtige Aspekte, die über die Anwendung im Fernverkehr hinausgehen. So wird untersucht, wie relevant die Vor- und Nachteile im Falle eines Wechsels der Anwendung, zum Beispiel leichtere Nutzfahrzeugapplikationen, schwere Nutzfahrzeuge mit geringerem Autobahnanteil und ähnliche Fälle, sind. Daraus lassen sich wichtige Schlüsse für die Markteinführung der Antriebsalternativen ziehen. Die vorliegende Studie soll einen Beitrag zur aktuellen Technologiediskussion leisten und klären, ob eine Koexistenz beider Technologien ökonomisch sinnvoll oder ggf. auch aufgrund anderer Gründe anzustreben ist oder ob die Fokussierung der Entwicklungsaktivitäten auf eine der beiden Technologien zielführender ist. Die Implikationen einer Beantwortung dieser Frage sind weitreichend und sollen dazu beitragen, klare Handlungsempfehlungen in Bezug auf Wasserstoff als Teil der Mobilität der Zukunft entwickeln zu können.

04

Vorgehen und Aufbau

04

Vorgehen und Aufbau

1. Basis	2. Konzepte	3. Vergleiche	4. Stärken
Ziel Definition Rahmenbedingungen (Fahrzeuge, Anforderungen) und Einordnung konventioneller Antriebe	Ziel Ausarbeiten möglicher Zielkonzepte für H ₂ -Motor und H ₂ -BZ	Ziel Technischer und ökonomischer Vergleich der H ₂ -Motor- und H ₂ -BZ-Konzepte	Ziel Bestimmung der bevorzugten Fahr- und Lastprofile je Antriebskonzept sowie (damit einhergehend) Fahrzeugkategorien (andere Fahrzeugkategorien)
Beispielhafte Themen 1. Fahrzeugkonfigurationen 2. Typische(s) Fahrprofil(e) 3. Kundenanforderungen an das Fahrzeug 4. Wirkungsgrade verschiedener Antriebskonfigurationen heute und morgen (inkl. Hybridisierung) 5. Gesetzliche Rahmenbedingungen (Post-Euro-VI, CO ₂ -Gesetzgebung, Einfahrverbote)	Beispielhafte Themen 1. Darstellen möglicher Konzepte mit Vor- und Nachteilen (gemäß Kundenanforderungen, Verfügbarkeit) 2. Berücksichtigung von zusätzlichen Systemen (Hybridisierung ...) 3. Bewertung von möglichen Konzepten (getrennt für H ₂ -Motor und H ₂ -BZ-Konzepte) zum Identifizieren von Zielkonzepten 4. Roadmaps	Beispielhafte Themen 1. Technologieverfügbarkeit (TRL) 2. Einfluss auf Fahrzeug (Bauraum, Komponenten, Kühlung, Lärm) 3. Leistungszielwerte 4. Wirkungsgrade (Antrieb) 5. Speicherbedarfsunterschiede (aufgrund Verbrauch) 6. Gesetzgebung 7. TCO (über Zeit, CAPEX und OPEX)	Beispielhafte Themen 1. Trade-off Fahr- und Lastprofil und Antriebstechnologie 2. Diskussion von anderen Fahrzeugkategorien und deren „Passform“ für eine der beiden Antriebskategorien 3. Bestimmung eines Wasserstoffbedarfs unter Berücksichtigung verschiedener Penetrationen

Quelle: AVL

Abbildung 1: Schrittweises Vorgehen und Aufbau der Studie

Um einen objektiven Vergleich der beiden Antriebsformen – Brennstoffzellenantriebe (H₂-BZ) und wasserstoffverbrennungsmotorische Antriebe (H₂-Motor) – für den schweren LKW im Fernverkehr zu ermöglichen, wurde ein strukturiertes Vorgehen in vier Schritten gewählt (siehe hierzu als Überblick auch Abbildung 1):

- 1) Der erste Schritt definiert und beschreibt die Rahmenbedingungen für die zu untersuchenden Antriebsformen anhand des aktuellen Anforderungsprofils an schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr, das durch heutige typische Fahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb erfüllt bzw. definiert und vorgegeben wird.
- 2) Im zweiten Schritt werden die Antriebsformen so definiert, dass sie die im ersten Schritt festgelegten Fahrzeuganforderungen erfüllen. Darüber hinaus werden die Technologieentwicklungsschritte auf der Zeitachse ana-

lysiert und hieraus die zeitlichen Verfügbarkeiten abgeleitet.

- 3) Im dritten Schritt erfolgt der eigentliche Vergleich der beiden Antriebsformen mit Bezug auf schwere Nutzfahrzeuge in Fernverkehrsanwendungen. Der Vergleich berücksichtigt sowohl ökonomische als auch technische Aspekte.
- 4) Im vierten und letzten Schritt werden die Ergebnisse des dritten Schrittes auf andere Fahrzeugklassen im Nutzfahrzeugsegment sowie andere Anwendungen (beispielsweise höhere/geringere Laufleistung, größerer/kleinerer Anteil an Autobahnfahrten) übertragen.

Der vorliegende Bericht ist entsprechend diesen vier Schritten aufgebaut und schließt mit Handlungsempfehlungen sowie einem Fazit ab. Zur Begriffserklärung sind untenstehend die beiden grundsätzlichen Antriebsstränge schematisch gegenübergestellt.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch einen Brennstoffzellen-Antriebsstrang – im Folgenden auch nur Brennstoffzelle genannt – mit weiteren zugehörigen Elementen wie eine Hochvolt-Traktionsbatterie und eine E-Achse als Antriebselement.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Wasserstoffmotor (H₂-Motor-Antriebsstrang) mit den hier benötigten Elementen wie Getriebe und konventioneller Hinterachse, um die Leistung des Motors auf die Straße zu übertragen.

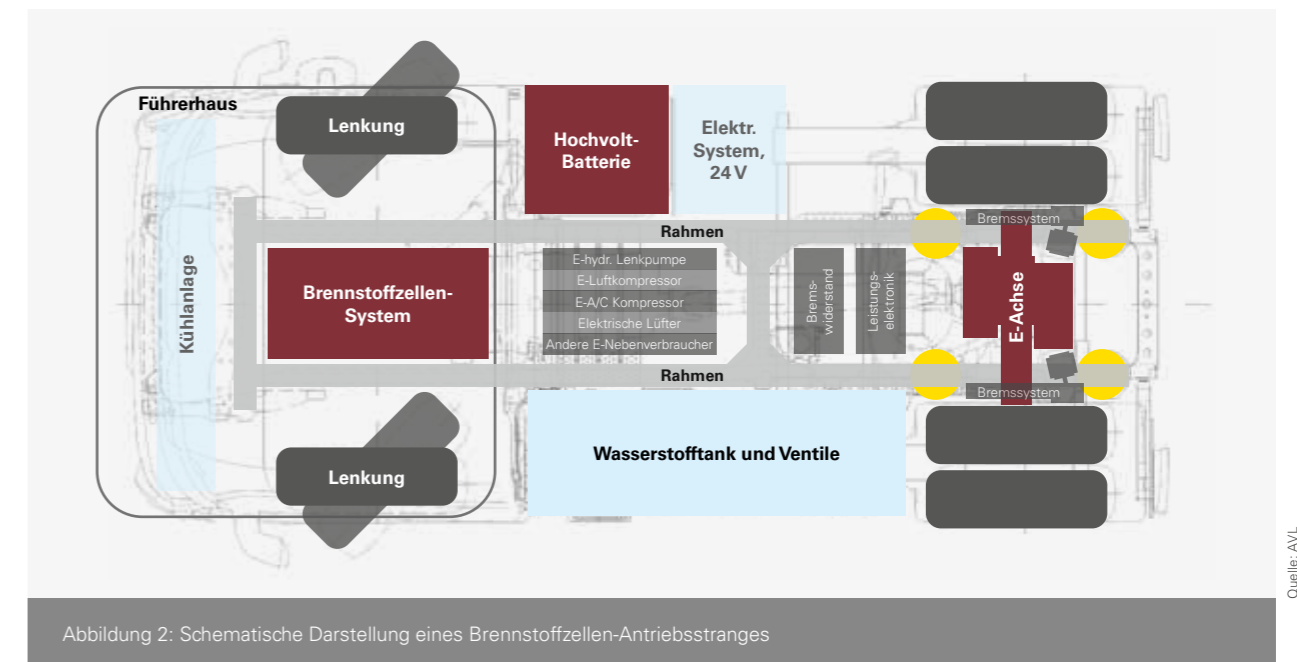
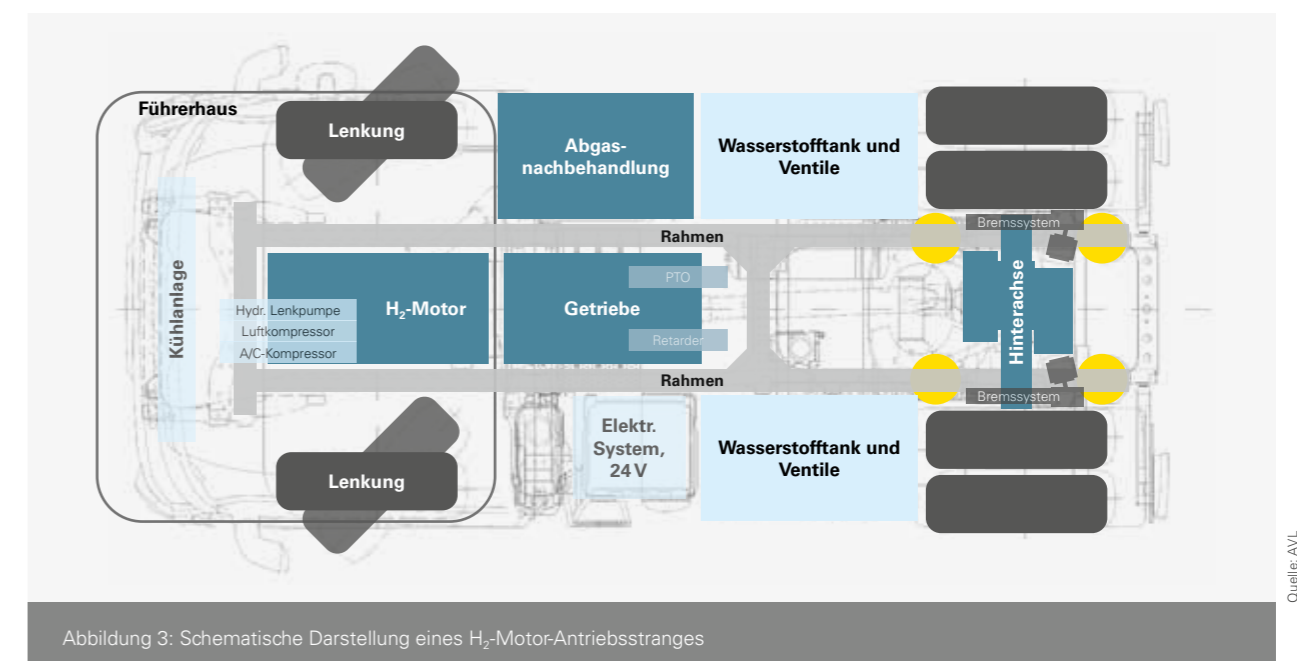


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges

Quelle: AVL

Abbildung 3: Schematische Darstellung eines H₂-Motor-Antriebsstranges

Quelle: AVL



05

Relevante Rahmenbedingungen
für den Vergleich

05

Relevante Rahmenbedingungen für den Vergleich

Im folgenden Kapitel werden die relevanten Rahmenbedingungen für den Vergleich der verschiedenen Antriebssysteme dargestellt. Es geht hierbei zunächst um eine Beschreibung des aktuellen Referenzfahrzeugs, das Bestimmen der für den Vergleich zu verwendenden Fahrprofile, die Spezifizierung der Kundenanforderungen an das Fahrzeug, aktuelle und zukünftige Wirkungsgrade sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen mit Fokus auf Partikelemissionen. Im Hinblick auf die aktuellen CO₂-Grenzwerte können beide Wasserstoffvarianten einen großen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Betrieb erzielen.

Der in der vorliegenden Studie angestrebte Vergleich der beiden wasserstoffbetriebenen Antriebsarten nimmt den Einsatz im schweren Nutzfahrzeug für den Fernverkehr, speziell in einem 40-Tonnen-Sattelzug, in den Fokus. Dieses Fahrzeug ist nach [EU 2017/2400] in der Fahrzeugklasse N (Güterbeförderung) der Fahrzeuggruppe 5 zugeordnet. Es handelt sich um eine Zugmaschine (engl. Tractor) mit der Achskonfiguration 4x2 und einer technisch zulässigen Gesamtmasse im beladenen Zustand von mehr als 16 Tonnen.

5.1 Spezifikation eines schweren Nutzfahrzeugs

Kundenseitige Einsatzszenarien für die Fahrzeuge sowie die damit verbundenen Transportaufgaben und resultierende stark variierende Anforderungen verlangen im Nutzfahrzeugmarkt eine hohe Zahl an Fahrzeugvarianten. Zur Erfassung der Zusammensetzung der Fahrzeugflotte in Europa wurden Zulassungsstatistiken der Statistik Austria für das Jahr 2018 sowie Daten des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) herangezogen. Die Auswertungen zeigen, dass insbesondere drei Untergruppen – Verteilverkehr mit >16 Tonnen und 4x2-Achskonfiguration, Fernverkehr mit >16 Tonnen und 4x2-Achskonfiguration sowie Verteilverkehr aller Gewichtsklassen mit 6x2-Achskonfiguration – von besonderer Bedeutung sind. Diese Konfigurationen decken sich mit der aktuellen

europäischen CO₂-Gesetzgebung, die den genannten drei Fahrzeuguntergruppen die Gruppenbezeichnungen 4-RD, 5-LH und 9-RD zuwies. Die Nutzfahrzeuguntergruppen sind gemäß der CO₂-Gesetzgebung definiert [ICCT, 2018], siehe Abbildung 4.

Wie Abbildung 4 entnommen werden kann, wurden alle Nutzfahrzeuge in unterschiedliche Klassen eingeteilt. Die Einteilung basiert auf der Achskonfiguration, dem grundsätzlichen Aufbau sowie dem höchstzulässigen Fahrzeuggewicht. Diese Segmentierung definiert in weiterer Folge auch das (Haupt-)Nutzungsprofil, das sich wiederum aus einzelnen Fahrzyklen mit standardisierten Nutzlasten zusammensetzt. Hierdurch kann eine Vergleichbarkeit der einzelnen Anwendungen erreicht werden. Die jeweiligen Nutzungsprofile sind in der rechten Spalte von Abbildung 4 definiert. Dabei repräsentieren die Kürzel wie beispielsweise RD oder LH jeweils den Fahrzyklus. Die Angaben in Klammern definieren die anzuwendende Nutzlast für die Verbrauchsrechnung im Rahmen der Richtlinie EU 2019/1242.

Neben den Zulassungsstatistiken wurde eine Publikation von ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobiles) für die Bestimmung eines repräsentativen Fahrzeugs herangezogen. Die Studie [ACEA 2020] kam zu dem Schluss, dass Fahrzeuge der Gruppe 5-LH für 68,2 % der CO₂-Emissionen aller analysierten Fahrzeuggruppen verantwortlich sind. Im Zuge dessen wurden auch die Verkaufsvolumina der verschiedenen Untergruppen veröffentlicht, die im dritten und vierten Quartal 2019 erzielt wurden. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuguntergruppen 4, 5, 9 und 10 die ersten von der EU reglementierten Fahrzeuguntergruppen sind, für die die CO₂-Gesetzgebung seit 1. Juli 2019 gilt und somit Daten vorliegen.

Wie in Tabelle 1 ersichtlich ist, stellt die Untergruppe 5-LH den weit überwiegenden Anteil der verkauften Fahrzeuge [ACEA 2020] und kann als repräsentativ für die Betrachtungen

Achskonfiguration	Fahrgestellkonfiguration	Technisch zulässige Gesamtmasse im beladenen Zustand [Tonnen]	Fahrzeuggruppe	Verwendungsprofil und Nutzlasten, die in VECTO verwendet werden
4x2	Sololastkraftwagen	> 3,5–< 7,5	0	In der Gesetzgebung (aktuell) nicht berücksichtigt
	Sololastkraftwagen (oder Zugmaschine)	7,5–10	1	RD (50%), UD (50%)
	Sololastkraftwagen (oder Zugmaschine)	>10–12	2	LH (75%), RD (50%), UD (50%)
	Sololastkraftwagen (oder Zugmaschine)	>12–16	3	RD (50%), UD (50%)
	Sololastkraftwagen Zugmaschine	> 16 > 16	4 5	LH (14,0 t), RD (4,4 t), MU (4,4 t) LH (19,3 t), RD (12,9 t)
4x4	Sololastkraftwagen	7,5–16	6	In der Gesetzgebung (aktuell) nicht berücksichtigt
	Sololastkraftwagen	> 16	7	
	Zugmaschine	> 16	8	
6x2	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	9	LH (19,3 t), RD (7,1 t), MU (7,1 t)
	Zugmaschine	Alle Gewichte	10	LH (19,3 t), RD (12,9 t)
6x4	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	11	LH (19,3 t), RD (7,1 t), MU (7,1 t), C (7,1 t)
	Zugmaschine	Alle Gewichte	12	LH (19,3 t), RD (12,9 t), C (12,9 t)
6x6	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	13	In der Gesetzgebung (aktuell) nicht berücksichtigt
	Zugmaschine	Alle Gewichte	14	
8x2	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	15	
8x4	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	16	C (7,1 t)
8x6/8x8	Sololastkraftwagen	Alle Gewichte	17	In der Gesetzgebung (aktuell) nicht berücksichtigt

RD = Regional Delivery (Verteilverkehr), LH = Long Haul (Fernverkehr), UD = Urban Delivery (städtischer Lieferverkehr), MU = Municipal Utility (städtische Müllabfuhr), C = Construction (Baugewerbe)

Abbildung 4: Fahrzeuguntergruppen gemäß der CO₂-Gesetzgebung





	Fahrzeuggruppe	Q3–Q4 2019, Anteil an den verkauften Fahrzeugen	Konfiguration
	4-UD	0,4 %	R 4x2
 4	4-RD	7,9 %	R 4x2
	4-LH	1,9 %	R 4x2
 5	5-RD	0,8 %	T 4x2
	5-LH	62,8 %	T 4x2
 9	9-RD	7,2 %	R 6x2
	9-LH	9,2 %	R 6x2
 10	10-RD	0,1 %	T 6x2
	10-LH	9,7 %	T 6x2

Tabelle 1: Verkaufszahlen gemäß ACEA-Erhebung

in dieser Studie herangezogen werden. Hieraus leitet sich ab, den Fokus der Studie auf die 40-Tonner-Fernverkehrs-klasse zu legen.

Abgeleitet davon ergibt sich der größte Hebel zur Verringerung von CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr über Optimierungen in der Fahrzeuguntergruppe 5-LH.

5.2 Das typische Fernverkehrsfahrzeug

Tabelle 2 stellt exemplarisch ein typisches 5-LH-Fahrzeug mit Diesel-Antriebsstrang dar. Die wesentlichen Parameter dieses Fahrzeugs werden genutzt, um in weiterer Folge die Antriebsstränge für die alternativen Antriebe zu definieren.

Tabelle 3 mit den wichtigsten Vertretern der europäischen Fernverkehrsfahrzeuge unterstreicht die gewählte Konfigu-

ration in Bezug auf Leistung, Motorgröße, Getriebekonfiguration und Eigengewicht des Fahrzeugs. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf eine vollständige Darstellung aller möglichen Varianten verzichtet, wobei die aufgezeigten Daten den jeweiligen Herstellerwebseiten entnommen wurden.

5.3 Fahrprofile

Mit der Wahl des repräsentativen Fahrzeugs ergibt sich ein vorgegebenes Fahrprofil, wenn man der CO₂-Gesetzgebung [EU 2017/2400] folgt. Bei diesen Fahrprofilen handelt es sich um eine Kombination aus Verteilerverkehr und Fernverkehr, wobei der Fernverkehrsanteil rund 90 % und der Anteil des Verteilerverkehrs rund 10 % beträgt (jeweils gerechnet auf die Fahrleistung). Die wesentlichen Unterschiede dieser beiden Fahrprofile liegen in der geforderten Dynamik und den

	Einheit	5-LH
Hubraum	l	12,9
Motorleistung	kW	330
Getriebe	---	12-Gang-AMT
Achsübersetzung	---	2,41
Eigengewicht	kg	7.192
Achskonfiguration	---	4x2
Widerstandsfläche als Produkt aus Luftwiderstandsbeiwert und Stirnfläche	m ²	5,3
Reifen (nicht angetrieben)	---	315/70 R22,5
Reifen (angetrieben)	---	315/70 R22,5
Lüfter	---	Riemengetrieben; elektronisch geregelte Viskokupplung
Lenkhilfepumpe	---	Fixe Verdrängung mit elektronischer Regelung
Pneumatisches System	---	Mittlere Verdrängung; zweistufig + ESS + AMS

Tabelle 2: Technische Daten eines typischen Fernverkehr-LKWs

Quelle: AVL

Hersteller und Modell	Motorgröße [Hubraum in Litern]	Motorleistungsbereich [in kW]	Typische Getriebe-konfiguration	Eigengewicht der Sattelzugmaschine [in kg]
Daimler Actros	12,9	330 bis 390	12-Gang-AMT	7.192
Scania R Serie	13	272 bis 397	8- oder 12-Gang-AMT	7.250
DAF XF	12,9	315 bis 390	12-Gang-AMT	7.300
MAN TGX	12,4	316 bis 375	12-Gang-AMT	7.080
Volvo FH	12,8	309 bis 397	12-Gang-AMT	7.410
Iveco S-Way	12,9	375 bis 420	12-Gang-AMT	Nicht verfügbar

Tabelle 3: Übersicht europäischer Fernverkehrsfahrzeuge

Quelle: AVL

maximalen Fahrzeuggeschwindigkeiten. Der Verteilerzyklus ist in gewissen Abschnitten wesentlich dynamischer, d.h. vom Stillstand erfolgt eine Beschleunigung auf eine definierte Geschwindigkeit mit anschließender Verzögerung. Im Fernverkehrsprofil hingegen wird das Fahrzeug sehr konstant bei einer hohen maximalen Geschwindigkeit betrieben.

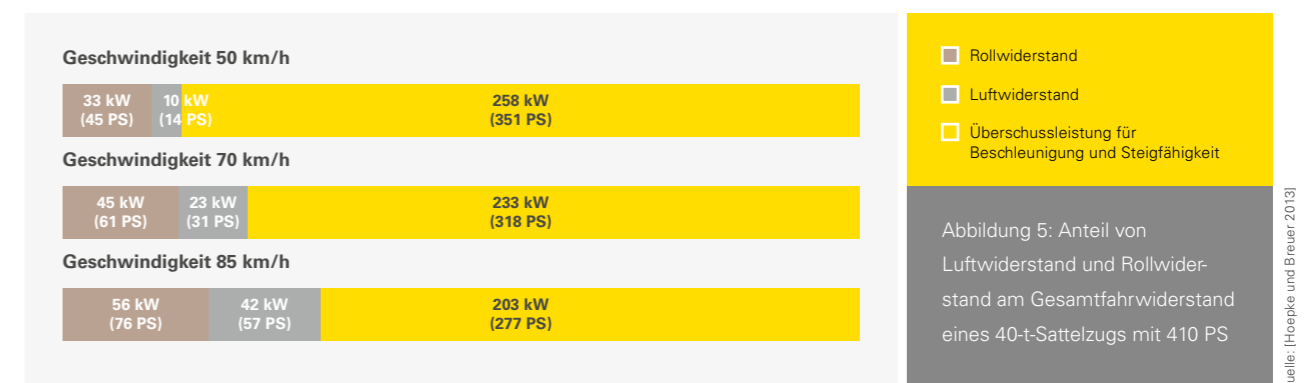
In der CO₂-Gesetzgebung werden diese Fahrprofile genutzt, um jedes einzelne Fahrzeug eines OEMs mit Hilfe des Simulationswerkzeuges VECTO (Vehicle Energy Calculation Tool) zu zertifizieren. Die Ergebnisse aus dieser Simulation werden dann der Europäischen Union rückgemeldet, die basierend auf diesen Daten den CO₂-Flottenausstoß des jeweiligen OEMs berechnet.

Da das von der EU zur Verfügung gestellte Simulationswerkzeug VECTO keine Kraftstoffverbrauchssimulation von Wasserstoffmotor und elektrischen Antrieben auf Basis von Brennstoffzellen ermöglicht, wurde der Energieverbrauch für diese Antriebsstränge im Rahmen einer Simulationsstudie ermittelt. Die auf diese Weise erhobenen Energieverbräuche stellen neben anderen Randbedingungen (siehe Kapitel 8) die Basis für die TCO-Betrachtung dar. Für die Simulation wurden die zuvor genannten Fahrprofile zugrunde gelegt.

Durch diese gewählten Definitionen ist sichergestellt, dass die den Ergebnissen zugrundeliegenden Annahmen repräsentativ sind, da bereits im Vorfeld des Einsatzes des VECTO-Werkzeuges auf europäischer Ebene entsprechende Diskussionen und Abstimmungen stattfanden. Des Weiteren ermöglicht dies eine Vergleichbarkeit mit anderen Simulationsergebnissen, die sich auf denselben Bezugsrahmen stützen, bzw. mit in Zukunft zu veröffentlichenden Werten der Fahrzeughersteller, die gemäß EU-Verordnung [EU 2018/956] ihre Emissionen veröffentlichen müssen.

Neben den Fahrprofilen wurde die jährliche Fahrleistung von 116.000 km vom VECTO-Werkzeug übernommen und ebenfalls für die TCO-Berechnung genutzt.

Die Antriebsstrangauslegung im LKW muss unter Berücksichtigung des Einsatzsegmentes erfolgen. Für das im Rahmen dieser Studie ausgewählte Fernverkehrsfahrzeug ist es wichtig, dass dieses bei typischen Autobahn-Geschwindigkeiten im Bereich von 85–89 km/h wirtschaftlich betrieben werden kann. Die Basisanforderung an den Antriebsstrang ist allerdings, das Fahrzeug gegen den Fahrwiderstand zu bewegen. Der Fahrwiderstand setzt sich zusammen aus einem Anteil, der erforderlich ist, um Steigung zu überwinden, dem Rollwiderstand und dem Luftwiderstand. Die Fahrwiderstände für einen voll beladenen 40-Tonnen-LKW (gesetzlich möglich sind 42 Tonnen) liegt bei ca. 100 kW bei 85 km/h auf ebener Straße, vgl. Abbildung 5. Damit steht der Rest der installierten Leistung für die Überwindung von Steigungsabschnitten und zur Beschleunigung des Fahrzeuges zur Verfügung. Hinsichtlich Steigungen ist einer der herausforderndsten Autobahn-Streckenabschnitte für den Fernverkehr die Brennerautobahn. Diese weist auf dem Hoheitsgebiet von Österreich eine maximale Steigung von 6 % auf [ÖAMTC 2021]. Um diese Steigung mit einem voll beladenen Fernverkehrs-LKW mit 80 km/h zu bewältigen, läge der Fahrwiderstand bei ca. 600 kW. Abgeleitet von aktuellen Diesel-Fernverkehrsfahrzeugen zeigt sich, dass ein Großteil der Fahrzeuge mit Motorleistungen von 300–400 kW ausgestattet ist (vgl. Tabelle 3). Damit der LKW im fließenden (Fern-)Verkehr mit den anderen Fahrzeugen mithalten kann, ist auch für elektrifizierte Antriebsstränge eine kontinuierliche Leistung in diesem Bereich sinnvoll. Auf extremen Steigungsabschnitten wie zum Beispiel der Brennerautobahn wird sich folglich die Geschwindigkeit aller Fernverkehrsfahrzeuge (auch der Fahrzeuge mit Dieselmotor) reduzieren.



Quelle: Hoepfle und Breuer 2013

Um im Zuge dieser Studie vergleichbare Antriebsstrangleistungen zu gewährleisten, wurde für die alternativen Antriebsstränge eine Dauerleistung von 330 kW definiert.

Zukünftig werden auch prädiktive Assistenzsysteme vermehrt ihren Platz im Nutzfahrzeug finden. In der aktuell durchgeführten Simulation wurden jedoch keine Energieverbrauchsvorteile durch prädiktive Assistenzsysteme berücksichtigt. Wollte man diese im Rahmen der Simulation der Energieverbräuche berücksichtigen, könnte dies auf Basis der in der EU-Richtlinie 2017/2400 [EU 2017/2400] enthaltenen Vorgaben erfolgen. Sie definiert für die unterschiedlichen prädiktiven Systeme, wie zum Beispiel Start/Stop, Eco Roll ohne Start/Stop, Eco Roll mit Start/Stop, Predictive Cruise Control und die verschiedensten Kombinationen aus den genannten Systemen, Reduktionswerte für den Kraftstoffverbrauch. Diese reichen für ein Fahrzeug der Klasse 5-LH von 0 bis -0,8 % beim Fernverkehrszyklus und von -0,1 % bis -1,4 % beim Verteilverkehrszyklus [VECTO 3.3.9.2175].

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass in beiden zu untersuchenden Antriebsvarianten prädiktive Systeme gleichermaßen Reduktionseffekte für den Energieverbrauch erzielen.

5.4 Kundenanforderungen und Herstellerkriterien

Aufgrund des Einsatzzweckes der zu untersuchenden schweren Nutzfahrzeuge im Fernverkehr und der damit verbundenen Laufleistung stehen höchste Zuverlässigkeit und Effizienz im Vordergrund. Dies resultiert aus der notwendigen Liefertreue innerhalb stark globalisierter Lieferketten und dem hohen Anteil von Betriebskosten an den Gesamtkosten.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Bedeutung verschiedener Kriterien für eine europäische Fernverkehrsanwendung aus Sicht eines LKW-Kunden. Je länger der Balken, desto höher ist die Bedeutung des entsprechenden Kriteriums für den Kunden.

Neben den Kundenanforderungen sind auch Kriterien zu berücksichtigen, die für Fahrzeughersteller relevant sind. Hier sind beispielsweise Technologieverfügbarkeit, mögliche Auswirkungen durch die Einführung der neuen Technologie auf die aktuellen Abläufe im Unternehmen oder auch die mögliche Verwendung der Technologien für andere Fahrzeuge und andere Zielmärkte zu nennen.

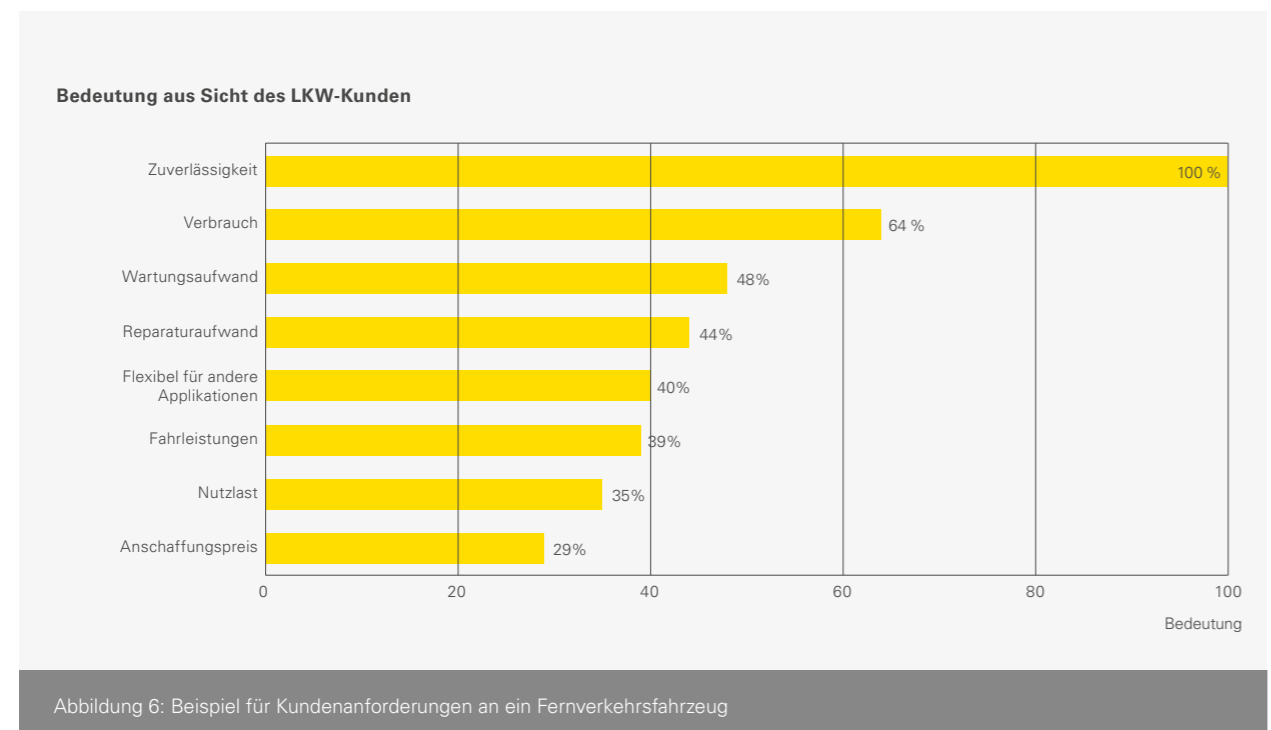


Abbildung 6: Beispiel für Kundenanforderungen an ein Fernverkehrsfahrzeug

Als Vorbereitung für den Vergleich der Antriebssysteme, siehe Kapitel 8, wurden folgende Kriterien definiert.

1. TCO-Analyse, die unter anderem die Anschaffungskosten, den Energie- bzw. Kraftstoffverbrauch, die Wartungs- und Servicekosten und die Kosten für Fahrer beinhaltet
2. Möglichkeit, die Technologien, mit denen Hersteller vertraut sind, zu übernehmen (Technologieverfügbarkeit)
3. Zuverlässigkeit
4. Lebensdauer
5. Emissionen
6. Änderungsbedarf bezüglich eines bestehenden Fahrzeugs
7. Auswirkungen auf das Fahrzeuggewicht und die zur Verfügung stehende Nutzlast
8. Mögliche Übererfüllung heutiger Fahrzeuganforderungen (Fahrleistungen)

Diese Kriterien bilden die Basis für die in dieser Studie durchgeführte Betrachtung der beiden zu vergleichenden Antriebsarten.

5.5 Wirkungsgrade im Antriebsstrang

Im weiteren Verlauf der Studie wird verstärkt auf die Wirkungsgrade der einzelnen Antriebsvarianten eingegangen.

Abbildung 7 zeigt exemplarisch für den Antriebsstrang „Brennstoffzelle Modelljahr 2025“ und „H₂-Motor Modelljahr 2025“ die Aufteilung der umgewandelten Energie in den einzelnen Elementen des Antriebsstranges. Diese Aufteilung basiert auf den Ergebnissen einer Systemsimulation, die zur Ermittlung der Energieverbräuche für die unterschiedlichen Antriebsstrangvarianten durchgeführt wurde.

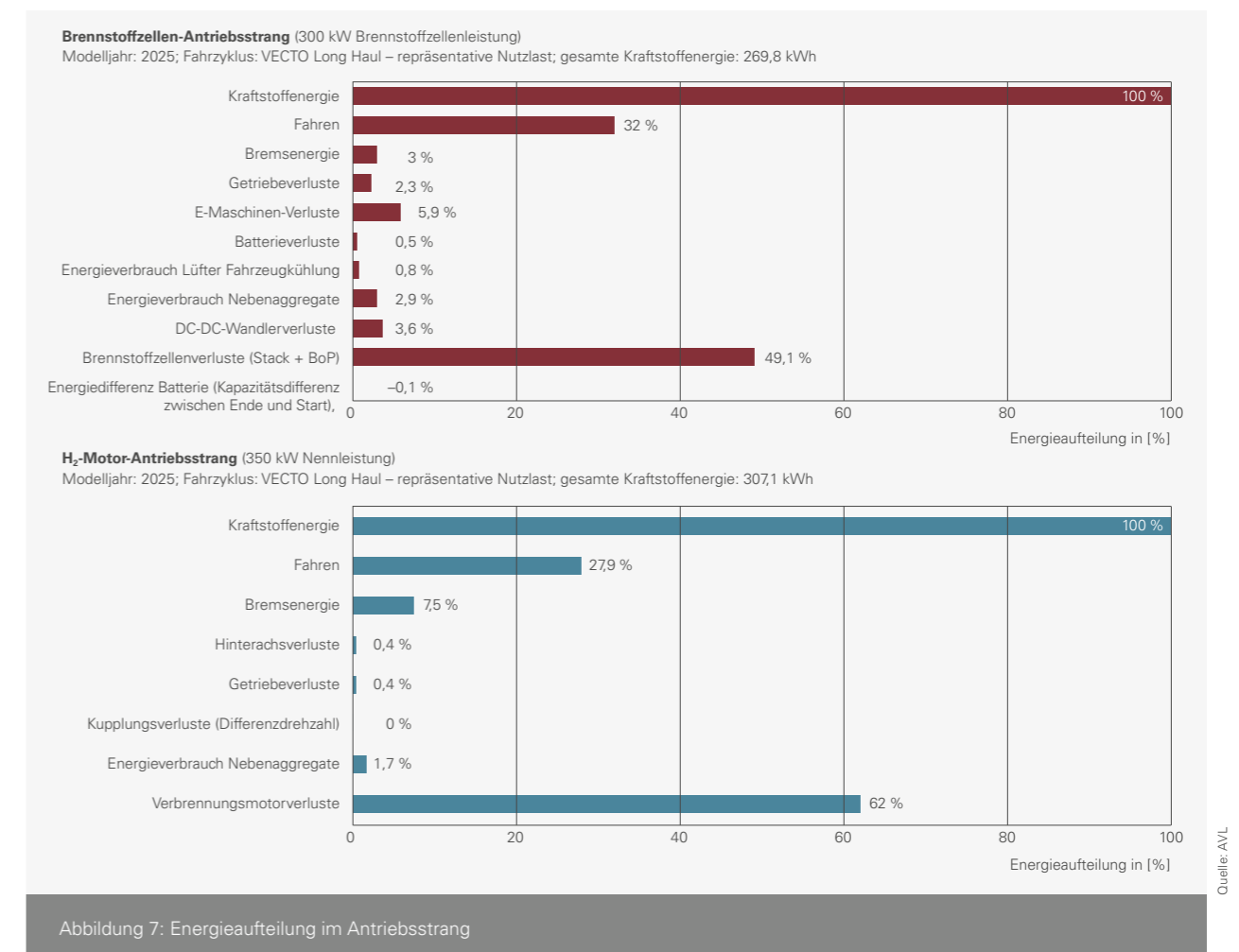


Abbildung 7: Energieaufteilung im Antriebsstrang

Fahrzyklus	Energieverbrauch H ₂ -BZ-Antriebsstrang, 300 kW Modelljahr 2025 [kWh]	Energieverbrauch H ₂ -Motor-Antriebsstrang Modelljahr 2025 [kWh]
VECTO Fernverkehr, geringe Nutzlast	184,7	221,5
VECTO Fernverkehr, repräsentative Nutzlast	269,8	307,1
VECTO Verteilerverkehr, geringe Nutzlast	173,6	251,5
VECTO Verteilerverkehr, repräsentative Nutzlast	233,0	326,9
Gewichteter Energieverbrauch für ein Fahrzeug der Kategorie 5-LH (Berechnungsformel siehe 7.1.5)	241,4	283,7

Quelle: AVL

Tabelle 4: Übersicht der Energieverbräuche exemplarisch für das Modelljahr 2025 auf unterschiedlichen Fahrzyklen

Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass die dargestellte Energieaufteilung nur einen von vier Fahrzyklen wiedergibt, die notwendig sind, um den gesamten Energieverbrauch gemäß VECTO-Berechnung (siehe 7.1.5) zu ermitteln. Stellvertretend für die Gesamtheit der durchgeführten Simulationen sind in Tabelle 4 für den H₂-BZ-Antriebsstrang mit 300 kW im Modelljahr 2025 und für den H₂-Motor-Antriebsstrang im Modelljahr 2025 die Simulationsergebnisse auf allen vier Fahrzyklen angegeben. Die letzte Zeile in Tabelle 4 repräsentiert den gemäß VECTO-Berechnungsvorgabe gewichteten und zusammenaddierten Energieverbrauch für ein Fahrzeug der 5-LH-Klasse (vgl. Abbildung 31) und bildet somit die Basis für die Energieverbräuche, die in die TCO-Berechnung Eingang finden.

Aus Abbildung 7 können zudem alle in der Systemsimulation berücksichtigten Elemente des jeweiligen Antriebsstranges ermittelt werden. Der Hauptgrund für den höheren Verbrauch des H₂-Motors Modelljahr 2025 im Vergleich zur Brennstoffzelle Modelljahr 2025 ist im schlechteren Wirkungsgrad des ottomotorisch arbeitenden H₂-Motors zu finden. Die Verbrennungsverluste betragen 62 %, wohingegen die Brennstoffzellenverluste nur ca. 50 % betragen. Die Nutzung von Rekuperationsenergie beim Brennstoffzellen-Antriebsstrang führt zu einer weiteren Reduktion der notwendigen Energie und äußert sich im Teilaspekt „Bremsenergie“.

Die Ergebnisse für das Modelljahr 2030 wurden im Zuge dieser Studie nicht im Detail über eine Systemsimulation abgebildet. Für die Brennstoffzelle wurde basierend auf den Werten für das Modelljahr 2025 eine Wirkungsgradverbesserung von 3 % für den gesamten Betriebsbereich angenommen. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von 63 % im Bestpunkt bei der Brennstoffzelle.

Beim H₂-Motor wurde angenommen, dass er im Modelljahr 2030 um 1,2 % geringere Wirkungsgrade als der Dieselmotor aus dem Modelljahr 2025 erreicht. Hier wird der Vergleich zum Dieselmotor ausgewiesen, da der H₂-Motor des Modelljahres 2030 mit einem Dieselmotorverfahren arbeitet. Somit kann mit einem H₂-Motor Modelljahr 2030 ein Wirkungsgrad von 46,5 % im Bestpunkt erreicht werden. Weitere Details zum Wirkungsgrad des H₂-Motors und zu den unterschiedlichen Verbrennungskonzepten sind in Kapitel 6.2.7 zu finden.

5.6 Motivation für Wasserstoff im Nutzfahrzeug

Trotz signifikanter Effizienzsteigerungen im Antriebsstrang und am Fahrzeug haben sich die Gesamt-CO₂-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen seit den 1990er-Jahren um rund 25 % erhöht. Dieser Anstieg ist auf die Zunahme des Straßengüterverkehrs zurückzuführen. Basierend auf Daten aus dem Jahr 2016 sind schwere Nutzfahrzeuge somit für 27 % der CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs verantwortlich und für beinahe 5 % der Treibhausgasemissionen in der EU [EUP2 2020].

In der Konsequenz hat die Europäische Union ein verpflichtendes CO₂-Reduktionsziel von 15 % bis 2025 sowie 30 % bis 2030 im schweren Nutzfahrzeug in [EU 2019/1242] festgelegt. Die technischen Wege zur Zielerreichung sind dabei nicht zwingend vorgeschrieben. Allerdings werden Technologien, die zum Vergleichsjahr 2019 eine besonders hohe CO₂-Reduktion aufweisen, mit sogenannten „Super Credits“ belohnt.

Das ICCT (International Council on Clean Transportation) beschreibt in [ICCT 2019] ausführlich die Begünstigung von

Fahrzeugen, die mindestens 50 % weniger CO₂-Emissionen im Vergleich zur 2019-Referenz emittieren. Nullemissionsfahrzeuge (Zero Emission Vehicles, ZEV), die mit 0 g CO₂/km zertifiziert werden, zählen bei der Anrechnung auf den Flottengrenzwert doppelt. Allerdings müssen die CO₂-Emissionen nicht zwingend null sein, um die Vorteile des Wasserstoffantriebs in der Flotte zu nutzen.

Hinsichtlich der Schadstoffemissionen gilt für das Nutzfahrzeug seit 2013 die Euro-VI-Abgasnorm. Diese wurde nach ihrer Einführung einige Male verschärft. Aktuell gibt es erste Veröffentlichungen zu einer nachfolgenden Norm, die möglicherweise im Zeitraum von 2025 bis 2027 in Kraft treten wird [ACEA_2 2020]. Die derzeit diskutierten Szenarien fokussieren sehr stark auf eine weitere Verringerung der Stickoxidgrenzwerte und zielen auf eine weitere Reduktion der Emissionen im Realbetrieb ab.

5.7 Wasserstoff als Kraftstoff

Wasserstoff kommt weltweit als Roh- und Hilfsstoff zum Einsatz. Laut [IEA 2019] wurden im Jahr 2018 weltweit ca. 70 Mio. Tonnen reiner Wasserstoff genutzt: Etwa 65 % davon in der chemischen Industrie für die Synthese von Ammoniak und Methanol sowie für die Herstellung von Polymeren und Harzen. Mit ca. 25 % ist der zweitgrößte Abnehmer die Mineralölindustrie, die Wasserstoff in ihren Raffinerien für das Hydro-Cracking und das Hydro-Treating einsetzt. Die verbleibenden etwa 10 % der Wasserstoffnachfrage kommen aus anderen Industriezweigen. Die Stahlproduktion beispielsweise nutzt Wasserstoff zum Tempern und Härten sowie als Schutz- und Formiergas. Weitere Einsatzbereiche finden sich in der Halbleiterindustrie, in der Lebensmittelproduktion, bei der Hydrierung von Fetten, in der Glasproduktion und bei der Generatorkühlung. Trotz des weitverbreiteten Einsatzes von Wasserstoff gibt es bislang keine internationalen Handelsstrukturen für Wasserstoff, denn dieser wird in der Regel lokal am Ort des Bedarfs aus den jeweiligen Energieträgern erzeugt. Vereinzelt existieren Pipelinesysteme, um mehrere Abnehmer zu versorgen. Die Belieferung einzelner Kunden erfolgt darüber hinaus per Trailer.

Da Wasserstoff (bis auf wenige Ausnahmen) auf der Erde nicht in reiner Form zur Verfügung steht, muss er aus geeigneten Primärenergiequellen hergestellt werden. Derzeit erfolgen ca. 96 % der Herstellung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern. Dabei stammen ca. 48 % aus der Reformierung von Erdgas, 30 % stammen aus Mineralöl und etwa

18 % werden aus Kohle gewonnen. Die verbleibenden 4 % der Wasserstoffproduktion erfolgen im Rahmen der Chlor-Alkali-Elektrolyse. Bei diesem Verfahren entsteht Wasserstoff als Nebenprodukt. Damit Wasserstoff die avisierte Schlüsselrolle für das klimaneutrale Energiesystem der Zukunft übernehmen kann, muss zunächst die Herstellung von Wasserstoff selbst klimaneutral werden.

Bei der Produktion von Wasserstoff aus Erdgas entstehen ca. 109 kg CO₂/kg H₂. Eine Abscheidung des CO₂ aus dem Abgas ist möglich und der Einsatz von neuen Speicher- und/oder Nutzungstechnologien (Carbon Capture, Utilization and Storage) kann einen positiven Beitrag leisten, ermöglicht aber letztlich keine CO₂-neutrale Herstellung von Wasserstoff. CO₂-freier oder grüner Wasserstoff kann über Wasser-Elektrolyse hergestellt werden, sofern der Strom für die Elektrolyse aus erneuerbaren Energien stammt. Mit dem EU-Strommix im Jahr 2018 beträgt der CO₂-Fußabdruck von Elektrolyse-Wasserstoff ca. 14 kg CO₂/kg H₂, mit dem Strommix weltweit ca. 26 kg CO₂/kg H₂ [EU 2020].

Die Kosten für die Bereitstellung von Wasserstoff hängen wesentlich von der Primärenergiequelle und der resultierenden Herstellungstechnologie ab. Zudem gibt es starke regionale Unterschiede. Laut [IEA 2019] liegen die Herstellungskosten von Wasserstoff aus Erdgas je nach Region mit oder ohne CCS zwischen ca. 1 und 2,50 USD/kg.

Die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff aus Elektrolyse liegen nach [IRENA 2020] derzeit im Mittel bei ca. 5 USD/kg (ca. 2,50 bis 6 USD/kg). Zukünftig können aber Kosten von ca. 1 USD/kg und weniger erreicht werden, wenn eine entsprechende Skalierung, Industrialisierung und entsprechende Stückzahlen für die Elektrolysetechnologie erreicht werden.

Die Herstellungskosten für grünen Wasserstoff hängen dabei im Wesentlichen von den Investitionskosten für den Elektrolyseur, den jährlichen Betriebsstunden und den Stromgestehungskosten des eingesetzten Stroms ab. Da erneuerbarer Strom aus Photovoltaik und Windenergie an Land inzwischen vielfach der günstigste Strom ist, wird grüner Wasserstoff aus sonnen- und windreichen Regionen zukünftig dauerhaft günstig hergestellt werden können.

Zukünftig werden auch der Transport zum Endverbraucher, der für den Transport und die weitere Nutzung erforderliche Aggregatzustand (Druckgas oder kryogen/verflüssigt) und die potenziellen Transportverluste die Kosten von Wasserstoff

maßgeblich mit beeinflussen. Wasserstoff kann ebenso als Ammoniak, Methanol oder anderweitig chemisch gebunden transportiert werden. Beispiele für den Transport von chemisch gebundenem Wasserstoff in organischen Substanzen werden als LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) zusammengefasst. Ein solcherart chemisch gebundener Wasserstoff bedingt vor der weiteren Verwendung naturgemäß eine Rückgewinnung und Reinigung des Wasserstoffs. Welche Transportoption sich zukünftig durchsetzen wird, ist aktuell noch offen.

Der Tankstellenpreis für ein Kilogramm Wasserstoff ist derzeit konstant an allen Wasserstofftankstellen in Deutschland gleich. Er beträgt ohne MwSt. 9,26 EUR (9,50 EUR brutto) [H2.live, 2020]. Berücksichtigt man den Energieinhalt (9,7 kWh/Liter für Diesel und 33 kWh/kg für Wasserstoff), liegen die Kosten für Diesel bei 12,7 EUR-Cent/kWh und für Wasserstoff bei 28,8 EUR-Cent/kWh. Damit ist der Preis für Wasserstoff bei gleichem (chemischem) Energieinhalt etwa doppelt (genau 2,27-mal) so hoch wie für Diesel.

Im Vergleich zu den derzeit etablierten Kraftstoffen Diesel und Erdgas hat Wasserstoff schlechtere Eigenschaften hin-

sichtlich der Speicherdichte. Trotz der hohen gravimetrischen Energiedichte liegt die volumetrische Energiedichte niedriger als bei allen anderen bekannten Kraftstoffen.

Abbildung 8 zeigt die Problematik der geringen volumetrischen Energiedichte des Wasserstoffs im Hinblick auf die Reichweite. Diesem Diagramm liegt eine vereinfachte Reichweitenberechnung zugrunde, die keinen Restdruck im Tank vorsieht. Die Abbildung zeigt deutlich die Attraktivität von Diesel als Kraftstoff: höchste Reichweite bei gegebener Tankgröße. (Flüssig-)Gasanwendungen haben im Vergleich dazu schon deutlich eingeschränkte Reichweiten. Wasserstoffalternativen sind die Schlusslichter in diesem Vergleich. Diese Nachteile bedingen größere Tankvolumina sowie eine höhere Tankfrequenz.

Die in dieser Studie durchgeführte TCO-Betrachtung berücksichtigt für die zu vergleichenden wasserstoffbasierten Technologien einen 700-bar-Speicher, da diese Speichertechnologie derzeit den bestmöglichen Kompromiss aus Reichweite (Speicherdichte), technischem Reifegrad und verfügbarer Tankstelleninfrastruktur darstellt. Der Einfluss weiterer Tankssysteme wird in Kapitel 6.3.1 ausführlicher dargestellt.

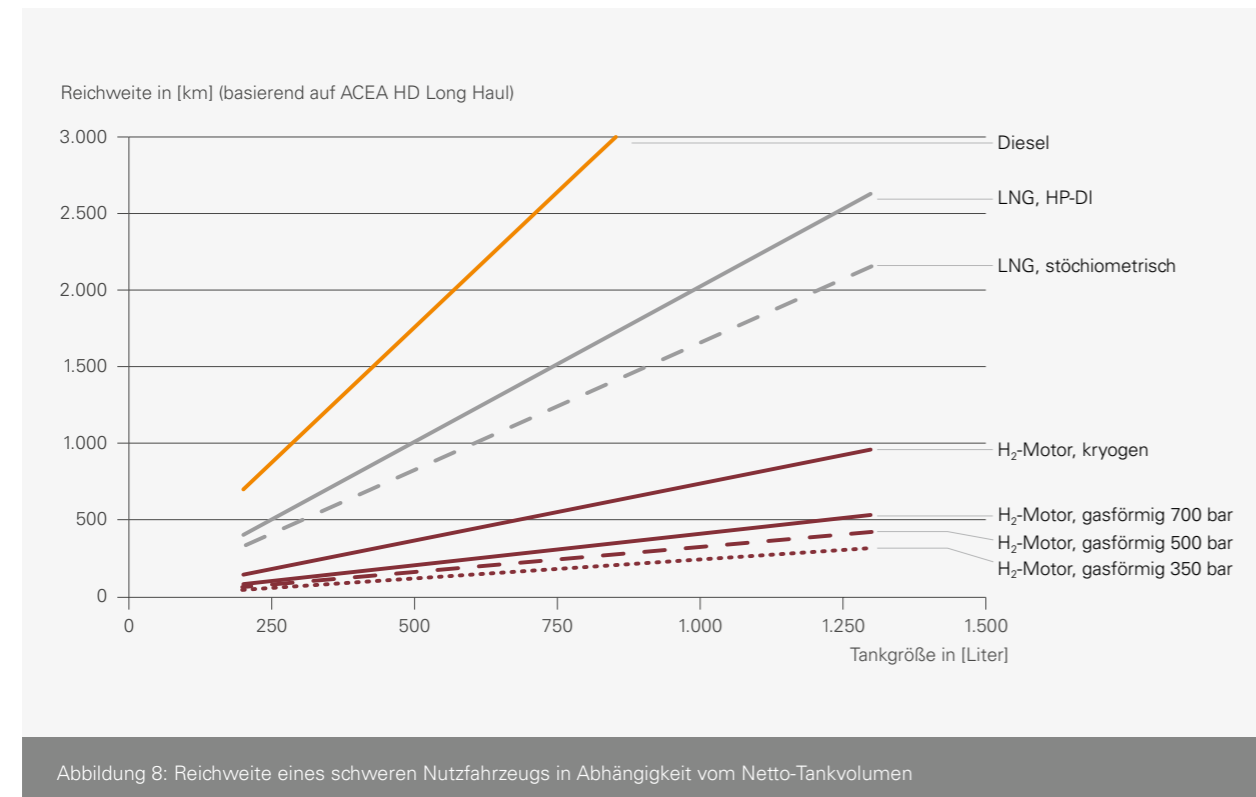
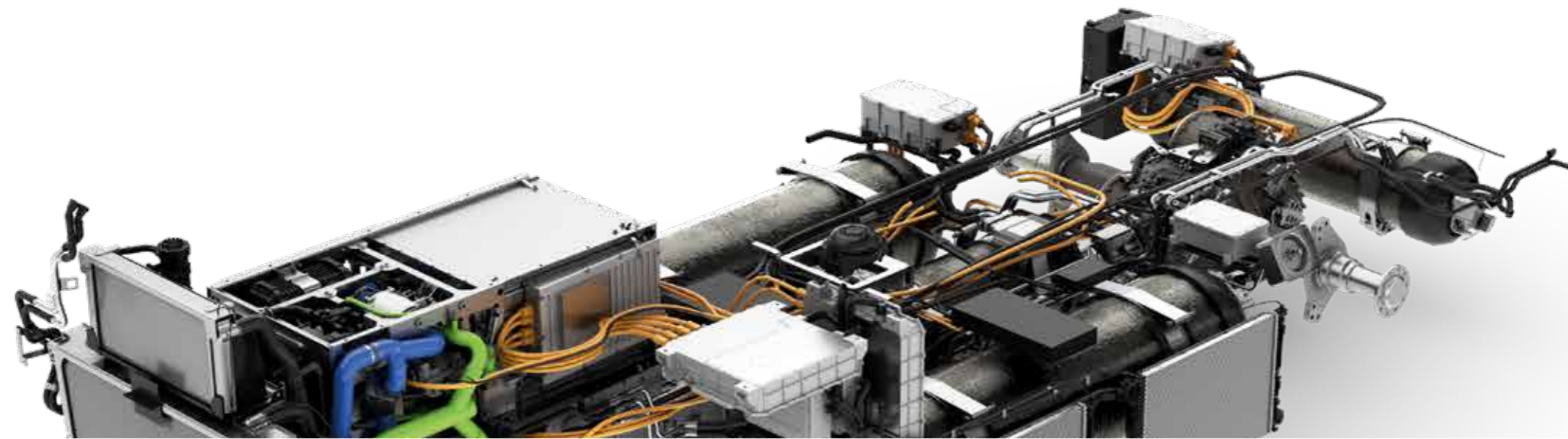


Abbildung 8: Reichweite eines schweren Nutzfahrzeugs in Abhängigkeit vom Netto-Tankvolumen





06

**Die Alternativen:
LKW mit Brennstoffzellen und
Wasserstoffmotor**

06

Die Alternativen:
LKW mit Brennstoffzellen und
Wasserstoffmotor

In diesem Kapitel werden die beiden zu vergleichenden wasserstoffbetriebenen Antriebe näher erläutert. Dies umfasst neben einer kurzen Einführung auch Themen wie aktueller Entwicklungsstand, Erläuterungen zu den verschiedenen möglichen Konzepten inklusive deren Vor- und Nachteile sowie einen Ausblick auf zukünftig zu erwartende Entwicklungen.

6.1 Die Brennstoffzelle als Antrieb für den Fernverkehr

6.1.1 Kurze geschichtliche Einführung zur Brennstoffzelle

Die Grundlagen der Brennstoffzellen-Technologie legte Christian Friedrich Schönbein im Jahr 1838 durch die Entdeckung der galvanischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff. Als elektrochemisches System ermöglicht die Brennstoffzelle (BZ) die direkte Umwandlung chemischer Energie (zum Beispiel gespeichert in Wasserstoff) in elektrischen Strom. Begründet durch die Thermodynamik der Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion kann zwar nicht die gesamte im Wasserstoff vorhandene chemische Energie (33 kWh/kg bezogen auf den unteren Heizwert) in elektrischen Strom umgewandelt werden; dennoch hat dieser Umwandlungsprozess einen Wirkungsgrad-Vorteil im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine (VKM).

Bedingt durch Hemmungen der elektrochemischen Reaktion in der BZ müssen vom theoretischen Wirkungsgrad (jenseits von 94 % bezogen auf den unteren Heizwert bzw. 83 % bezogen auf den oberen Heizwert von Wasserstoff) in der Praxis erhebliche Abstriche gemacht werden (siehe Abschnitt 6.1.4 Systemwirkungsgrad unten). Dennoch ist der praktische Energieverbrauch niedriger als bei Diesel- oder Ottomotoren.

6.1.2 Übersicht über unterschiedliche Brennstoffzellen-Technologien

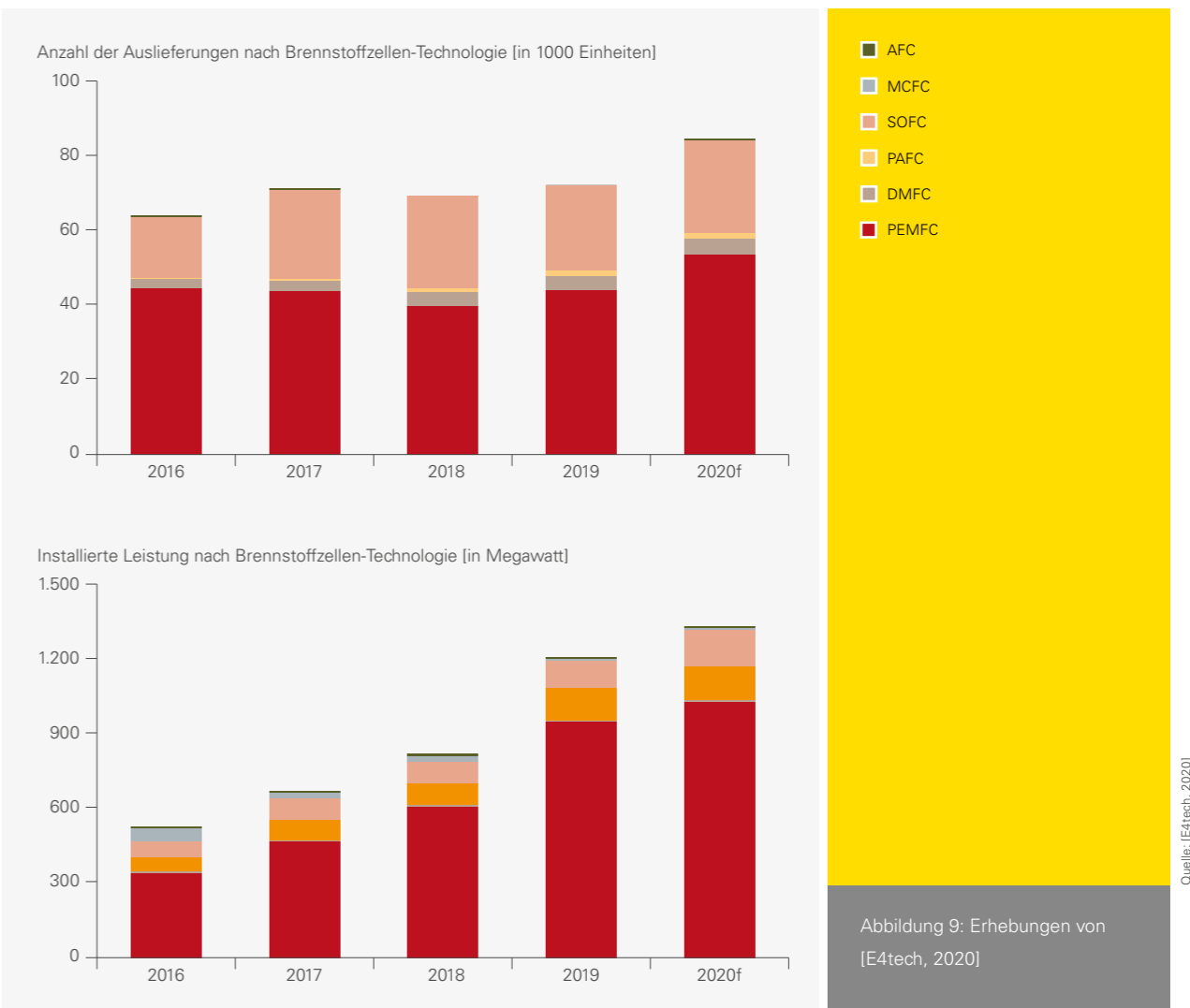
Wie bei jedem anderen galvanischen System wird auch in der BZ die chemische Reaktion von Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zu Wasser (H_2O) in die Teilprozesse der anodischen Oxidation (von H_2) und der kathodischen Reduktion (von O_2) aufgeteilt. Nur so lässt sich ein Teil der im H_2 gespeicherten chemischen Energie direkt in elektrische Energie umwandeln. Damit diese elektrochemische Reaktionsführung der Wasserstoffoxidation überhaupt ablaufen kann, ist ein Ladungsausgleich erforderlich, der durch einen Ionen-transport im sogenannten Elektrolyten erfolgt. Da dieser Elektrolyt ein zentraler Bestandteil der BZ ist, werden die unterschiedlichen BZ-Technologien durch die Eigenschaften des jeweiligen Elektrolyten unterschieden.

Man unterscheidet zwischen den folgenden BZ-Technologien:

- AFC (Alcaline fuel cell): alkalische BZ
- MCFC (Molten carbonate fuel cell): Schmelzcarbonat-BZ
- SOFC (Solid oxide fuel cell): Festoxid-BZ
- PAFC (Phosphoric acid fuel cell): phosphorsaure BZ
- DMFC (Direct methanol fuel cell): Direktmethanol-BZ
- PEMFC (Polymer electrolyte membrane fuel cell): Polymerelektrolytmembran-BZ

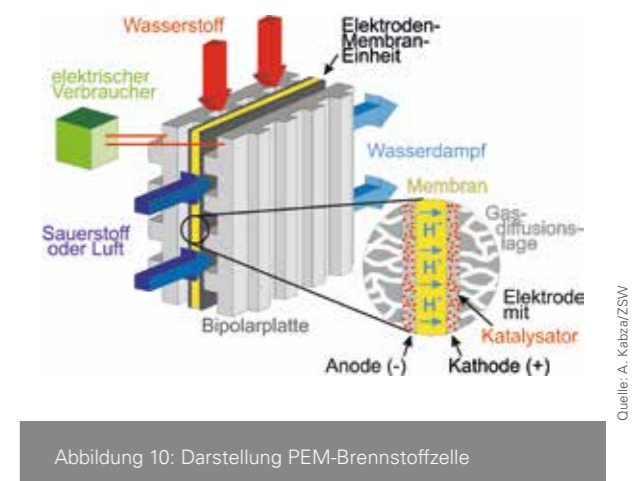
Im (jährlich erscheinenden) Fuel Cell Industry Review [E4tech, 2019] werden die sechs BZ-Technologien in Bezug auf weltweite Stückzahlen und installierte Gesamtleistung dargestellt (vergleiche hierzu Abbildung 9). Demnach dominiert die PEM-Technologie sowohl bei den Stückzahlen als auch bei der installierten Gesamtleistung.

In der vorliegenden Studie wird für den technologischen Vergleich mit dem H_2 -Motor ausschließlich die PEM-Technologie herangezogen. Bei dieser unterscheidet man weiter zwischen Niedertemperatur- und Hochtemperatur-Brennstoffzelle (NT-PEM bzw. HT-PEM). Im Folgenden wird jedoch ausschließlich



die NT-PEM-BZ betrachtet, da diese BZ-Technologie die bei weitem höchste Leistungsdichte von mehr als 4 kW/Liter (bezogen auf den BZ-Stapel) erreicht und die Dynamikanforderungen in automobilbezogenen Anwendungen am besten abgebildet werden können.

Bei der NT-PEM-Technologie (im Folgenden nur noch mit H_2 -BZ bezeichnet) besteht der Elektrolyt aus einer protonenleitfähigen Polymerelektrolytmembran. Darauf aufgebracht sind die beiden Elektroden, bestehend aus edelmetallbeladenem Ruß (Kohlenstoff). Die so entstandene Elektroden-Membran-Einheit ist zwischen zwei Gasdiffusionslagen (grafitisiertes Papier, Stoff oder Filz) eingelegt. Diese Komponenten einer einzelnen Zelle werden wiederum zwischen zwei grafitischen oder metallischen Bipolarplatten eingelegt (Abbildung 10).



Für Fahrzeuganwendungen werden so je nach Anwendungsfeld bis zu 500 Wiederholeinheiten (Einzelzellen) zum sogenannten BZ-Stapel aufeinandergestapelt. Dadurch erhält man sinnvoll nutzbare Stapelspannungen von 250 bis ca. 425 Volt bei einem elektrischen Strom im Bereich von ca. 600 Ampere. Ein BZ-Stapel dieser Größe kann damit eine maximale elektrische Leistung von 150 kW erreichen. Heutige BZ-Stapel für Fahrzeuganwendungen haben eine aktive Fläche von 240 bis 300 cm². Zukünftige BZ-Stapel für HD-Anwendungen könnten eine deutlich größere aktive Fläche haben, dementsprechend wird auch der elektrische Strom aus dem Stapel deutlich über 800 Ampere erreichen.

6.1.3 Brennstoffzellen-System

Brennstoffzellen allgemein sind im Unterschied zu einer Batterie nach außen offene Systeme, die im Betrieb mit den entsprechenden Medien Wasserstoff (H₂) und Luft (bzw. O₂) versorgt werden müssen. Hierdurch werden BZ-Systeme wesentlich komplexer als reine batterieelektrische Systeme. Die räumliche Trennung zwischen Speicher (H₂-Tank, liefert Energie in kWh) und Wandler (BZ-System, liefert Leistung in kW) schafft aber den Freiheitsgrad, das für die jeweilige Anwendung erforderliche Verhältnis zwischen Leistung (kW) und Energie (kWh) optimal auszuliegen.

Der BZ-Stapel ist im BZ-System umgeben von peripheren Nebenaggregaten, den sogenannten BoP-Komponenten (Balance of Plant). Diese BoP-Komponenten können in drei Subsysteme unterteilt werden: Anoden-Subsystem, Kathoden-Subsystem und thermisches Subsystem.

Das Anoden-Subsystem ist für die Wasserstoff-Bereitstellung für den BZ-Stapel verantwortlich und beginnt an der Schnittstelle zum H₂-Tanksystem. Das Zwischendruckniveau für den (gasförmigen) Wasserstoff beträgt hier ca. 12 bis 15 bar. Die homogene Verteilung von Wasserstoff im BZ-Stapel hat einen entscheidenden Einfluss auf die BZ-Lebensdauer. Daher wird durch den Anoden-Kreislauf eine ständige Wasserstoffströmung durch Rezyklierung aufrechterhalten. Diese ist vergleichbar mit der „Abgasrückführung“, basiert hier jedoch auf dem Kraftstoff Wasserstoff. Diese Anoden-Rezyklierung kann aktiv oder passiv erfolgen. Aktiv über eine Anodenrezirkulationspumpe oder ein -gebläse (Anode Recirculation Blower, ARB), passiv über eine Strahldüse nach dem Venturi-Prinzip. Die passive Rezyklierung benötigt einen ausreichend hohen Vordruck von 12 bis 15 bar, dafür wird aber keine elektrische Leistung benötigt.

Ein ARB ist eine aktiv betriebene Komponente im Anoden-Pfad und benötigt entsprechende elektrische Leistung, die dafür aber unabhängig vom Vordruck ist.

Das Kathoden-Subsystem ist für die Luftversorgung des BZ-Stapels zuständig. Die beiden wesentlichen Komponenten sind der Luftverdichter (mit oder ohne Expander) und der Gas-Gas-Befeuchter. Der Gas-Gas-Befeuchter führt dem trockenen, heißen Zuluftstrom aus dem Verdichter Wasser und Wärme von der vollbefeuchteten Abluft aus dem BZ-Stapel zu und sorgt damit für eine partielle Produktwasser-rückführung in den BZ-Stapel. Der Gas-Gas-Befeuchter hat einen großen Einfluss auf das Wassermanagement im BZ-Stapel und im BZ-System insgesamt. Diese Komponente ermöglicht den Betrieb bei höheren Temperaturen im Vergleich zu BZ-Systemen ohne Gas-Gas-Befeuchter.

Das thermische Subsystem ist für die Wärmeauskopplung aus dem BZ-Stapel zuständig. Wesentliche Komponenten sind eine elektrisch betriebene Kühlwasserpumpe, ein Luft-Wasser-Wärmetauscher (z. B. Fahrzeugkühlsystem) sowie eine Kationenaustausch-Patrone. Da das Kühlwasser in direktem elektrischem Kontakt zum BZ-Stapel steht, ist eine geringe elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers zwingend erforderlich. Der Kationenaustauscher sorgt für die gleichbleibend geringe Leitfähigkeit trotz möglichem Ioneneintrag von BoP-Komponenten.

Neben dem BZ-Stapel selbst haben alle BoP-Komponenten einen Einfluss auf Kosten, Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines BZ-Systems. Alle BoP-Komponenten müssen daher denselben Produktentwicklungszyklus wie der BZ-Stapel selbst durchlaufen.

Der elektrische Verbrauch der BoP-Komponenten hat einen entscheidenden Einfluss auf den BZ-Systemwirkungsgrad. Maßgeblich entscheidend ist hier der Luftverdichter. Die Verdichtung von Gasen allgemein ist durch die zu leistende Volumenänderungsarbeit per se ineffizienter als bei Flüssigkeiten. Durch den begrenzten Wirkungsgrad des Verdichters ist die elektrische Leistungsaufnahme im Vergleich zu den anderen BoP-Komponenten am höchsten (zumindest bei höherer Netto-Systemleistung). Weiterhin relevant ist aber auch die Leistungsaufnahme der Kühlwasserpumpe und des ARB.

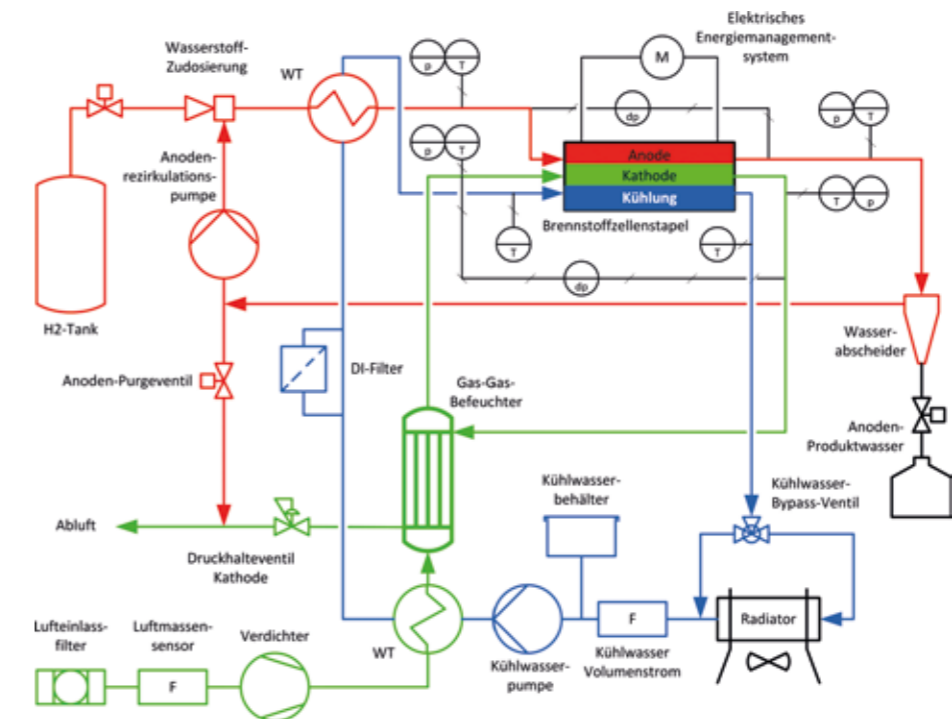


Abbildung 11: Übersicht eines Brennstoffzellensystems (BZ-Stapel und BoP-Komponenten)

6.1.4 Brennstoffzellen-Wirkungsgrade

Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie in der Brennstoffzelle unterliegt nicht den Beschränkungen der Otto- oder Diesel-Kreisprozesse. Daher besteht prinzipiell ein Wirkungsgradvorteil einer Brennstoffzelle gegenüber einem Wasserstoffmotor.

Die Systemwirkungsgrad-Kennlinie (bezogen auf den unteren Heizwert) eines BZ-Systems ist das Verhältnis zwischen elektrischer Netto-Systemleistung und umgesetzter chemischer Energie (H₂-Verbrauch), aufgetragen über der Netto-Systemleistung. Die Netto-Systemleistung ist die elektrische Stapel-Leistung (brutto) abzüglich der elektrischen Leistungsaufnahme aller Nebenaggregatsverbraucher (Pumpen, Verdichter, Ventile etc.).

Daher liegt der Systemwirkungsgrad erwartungsgemäß entsprechend unterhalb der elektrischen Wirkungsgrad-Kennlinie des BZ-Stapels (mittlere Zellspannung geteilt durch 1,253 V, das Spannungsäquivalent des unteren Heizwertes von H₂). Die Systemwirkungsgrad-Kennlinie wird im Wesentlichen durch drei Punkte definiert: Leerlauf (Idle), maxi-

maler Wirkungsgrad und Wirkungsgrad bei Nennlast. Im sogenannten Idle-Punkt (Leerlauf) ist das BZ-System in Betrieb, die Netto-Systemleistung ist jedoch null. Vergleichbar ist dieser Zustand mit einem stehenden Fahrzeug bei eingeschaltetem Motor. In diesem Idle-Punkt ist der Wirkungsgrad null.

Der Punkt des maximalen Wirkungsgrades liegt bei einem BZ-System im unteren Leistungsbereich. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu der Wirkungsgrad-Kennlinie einer VKM, bei der der höchste Wirkungsgrad bei höherer Leistung erreicht wird.

Der dritte Punkt ist der Wirkungsgrad bei Nennlast und liegt, wie der Name schon sagt, beim Punkt maximaler Netto-Systemleistung. Die Lage der zwei Punkte (maximaler Wirkungsgrad und Punkt maximaler Leistung) wird durch die Systemauslegung vorgegeben. Wenn es gelingt, die elektrischen Verbräuche der Nebenaggregate zu minimieren, steigt entsprechend der Netto-Systemwirkungsgrad. Der Punkt des maximalen Wirkungsgrades kann durch eine Überdimensionierung des Stapels vom Punkt niedriger Systemleistung nach rechts in Richtung mittlerer Systemleistung verschoben werden.

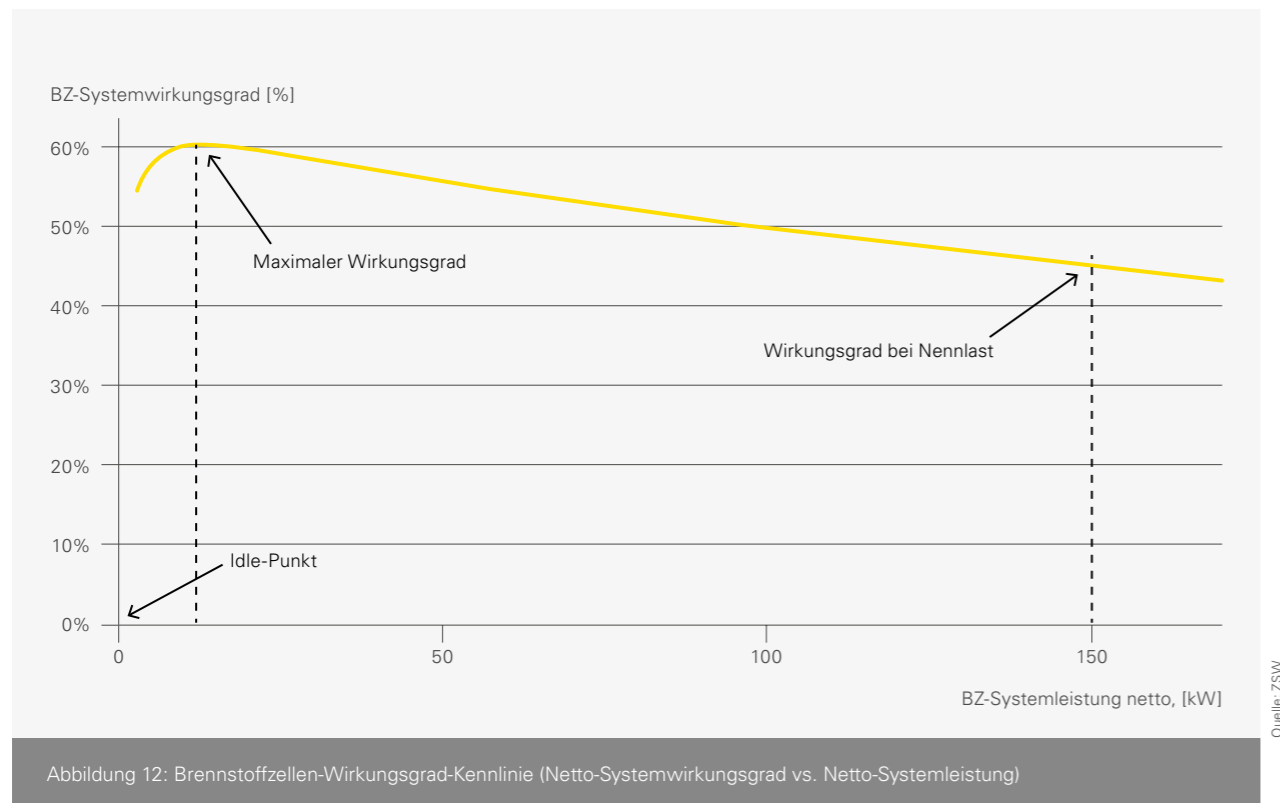


Abbildung 12: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad-Kennlinie (Netto-Systemwirkungsgrad vs. Netto-Systemleistung)

Die Wirkungsgrad-Kennlinie ist keine stationäre Kennlinie, sondern hängt von den System- und Stapel-Betriebsbedingungen ab. Diese Betriebsbedingungen sind im Wesentlichen Stapeltemperatur und Systemdruck (Kathoden-Prozessluft), hängen aber untergeordnet von vielen weiteren Parametern ab. Da die elektrochemische Reaktion in der BZ ähnlich wie bei der Batterie gewissen unvermeidbaren Alterungsmechanismen unterliegt, verschiebt sich die Wirkungsgrad-Kennlinie mit zunehmender Anzahl an Betriebsstunden (bedingt durch eine irreversible Spannungsdegradation des BZ-Stapels) nach unten. Man muss daher zwischen der Kennlinie zu Beginn und am Ende der Nutzungsdauer unterscheiden. Man spricht am Beginn von Beginning of Life (BOL) und am Ende von End of Life (EOL). Wichtig ist hierbei die EOL-Definition. EOL bedeutet nämlich nicht das Ende der Lebensdauer, sondern vielmehr das Ende der Nutzungs- oder Betriebsdauer in der jeweiligen Anwendung. EOL ist je nach Definition mit einem akzeptierten 10%igen Leistungsverlust gegeben. Ein BZ-Stapel ist bei EOL in der mobilen Anwendung noch immer voll funktionsfähig und kann eventuell danach in weiteren Anwendungen wie stationären Systemen sein sogenanntes Second Life bewerkstelligen. Da sich die irreversible Span-

nungsdegradation bei Nennlast stärker bemerkbar macht als bei Teillast, wird über die Lebensdauer der Nennlast-Wirkungsgrad stärker abnehmen (bis zu 10%) als der Teillast-Wirkungsgrad.

In einem auf den Punkt maximaler Leistung (= Nennleistung) ausgelegten System liegt der maximale Systemwirkungsgrad bei ca. 10 bis 15% der Maximalleistung. Wenn die Nennleistung in einem überdimensionierten System dagegen deutlich unterhalb der Maximalleistung liegt, verschiebt sich der maximale Wirkungsgrad zu höherer Leistung. Auf diese Weise kann der H₂-Verbrauch eines Fahrzeugs entsprechend dem zugrundeliegenden erwarteten Anwendungsfall oder Referenz-Fahrzyklus optimal ausgelegt werden. Durch eine geeignete Stapeldimensionierung kann man sich (neben einem höheren BOL-Wirkungsgrad) auch die teilweise Kompensation der unvermeidbaren Alterung der BZ „erkaufen“. Dies bedeutet, dass der Stapel und damit auch das System zu BOL überdimensioniert ist, am Ende (EOL) dann aber noch die spezifizierte Leistung bringen kann. Die Systemleistung ist dann durch die Fähigkeit zur Luftbereitstellung begrenzt. Im Gegensatz zu einer VKM wird aber der Kraftstoffverbrauch einer H₂-BZ über die Betriebszeit steigen.

Der maximale Netto-Systemwirkungsgrad liegt bereits heute nachweislich bei über 60%. Durch Optimierung der elektrischen Verbräuche der Nebenaggregate (Luftverdichter, Kühlwasserpumpe, Anodenrezirkulationsgebläse etc.) kann der Systemwirkungsgrad einer H₂-BZ weiter verbessert werden. Durch optimale Systemauslegung, Betriebsführung und Hybridisierungsstrategie (Kombination mit der immer vorhandenen Batterie) besteht weiteres Verbesserungspotenzial.

Für die elektrische Leistung eines BZ-Stapels von wesentlicher Bedeutung ist der dem Stapel zugeführte Druck der Prozessluft (Kathodenluft). Jeder PEM-BZ-Stapel bringt bei höherem Druck auf der Kathodenseite eine höhere Leistung. Allerdings muss diese Druckluft in einem System mit einem entsprechend vorhandenen (elektrisch betriebenen) Verdichter bereitgestellt werden. Die Verdichtung von Gasen ist im Unterschied zur Verdichtung von Flüssigkeiten (z. B. Diesel) sehr energieaufwändig, da bei der Verdichtung ein Volumenarbeit geleistet wird. Die elektrische Leistungsaufnahme des Verdichters muss daher in einem optimalen Verhältnis zur damit verbundenen Steigerung der elektrischen Leistung des BZ-Stapels stehen.

Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen H₂-BZ (explizit NT-PEM-Technologie) und einer VKM (unabhängig vom Kraftstoff) ist das niedrigere Temperaturniveau der H₂-BZ. Die bei der elektrochemischen Reaktion neben dem erzeugten elektrischen Strom anfallende Wärme muss vollständig an die Umgebung abgeführt werden, um ein gleichbleibendes Temperaturniveau des BZ-Systems (und hier insbesondere des BZ-Stapels) beizubehalten. Die Menge an abzuführender Wärme ist vereinfacht betrachtet der „Rest“ der chemischen Energie im H₂, der nicht in elektrische Energie umgewandelt wird. Während bei der VKM viel Wärme über die hohe Enthalpie der Abgase und durch Abstrahlung am Motorblock abgegeben wird, muss bei der H₂-BZ (bedingt durch die geringere Enthalpie in der Abluft) der Großteil der Wärme über den Fahrzeugkühler abgeführt werden. Vor allem bei hohen Systemleistungen ist daher ein erheblicher Mehraufwand für die Wärmeauskopplung aus dem System zu betreiben. Bestehende Kühlsysteme für VKM stoßen bei BZ-Systemen an Ihre Leistungsgrenzen und müssen daher komplett neu ausgelegt bzw. um zusätzliche Kühlsysteme erweitert werden.

6.1.5 Status heute als Antrieb

Derzeit gibt es als kommerziell verfügbare wasserstoffbetriebene BZ-Straßenfahrzeuge in Deutschland lediglich den Toyota Mirai II zum Preis von 63.900 EUR und den Hyundai NEXO zum Preis von 77.008,40 EUR [h2.live, 2020]. Der Mercedes-Benz GLC F-CELL war lediglich als Full-Service-Mietmodell für ca. 800 EUR pro Monat verfügbar, wobei das PKW-Fahrzeugprogramm bei Daimler nicht weitergeführt wird.

Im Bereich der wasserstoffbetriebenen BZ-Nutzfahrzeuge gibt es in Deutschland noch wenig kommerziell verfügbare Fahrzeuge. Ein Beispiel für ein kommerziell verfügbares Nutzfahrzeug ist das BZ-betriebene Fahrgestell der Firma Faun, verfügbar für Müllwagen und Kehrmaschinen. Weltweit sind BZ-LKW unter anderem von Hyundai und Toyota verfügbar, Prototypen von Nikola und anderen Herstellern werden erwartet.

Die PEM-BZ ist weiterhin als wasserstoffbasierter Antrieb in Gabelstaplern, Zügen und vereinzelt in Schiffen vertreten. Derzeit sind weltweit mehr als 30.000 Gabelstapler im Einsatz, etwa von Plug Power, Hyster-Yale, Horizon Material Handling LLC etc. BZ-Züge, allen voran Prototypen des Alstom Coradia iLint, sind in mehreren europäischen Ländern sehr erfolgreich im Testbetrieb gewesen. Weitere BZ-Züge sind in UK, USA, Kanada, Korea und China in der Erprobung. Die deutsche Bahn kündigte den Probebetrieb mit Wasserstoffzügen von Siemens für 2024 an.

Einen guten Überblick über den aktuellen Stand vermittelt der jährlich im Dezember veröffentlichte Bericht [E4tech, 2019].

6.1.6 Brennstoffzellen für LKW

Für den Einsatz in LKW eignen sich prinzipiell dieselben oder ähnliche BZ-Systemarchitekturen, wie sie derzeit in diversen PKW-Anwendungen im Einsatz sind oder waren, d. h. PEM-Technologie mit entsprechend angepasster System-Nettoleistung, hybridisiert mit der jeweils geeigneten Batterietechnologie (Li-Ionen als Stand der Technik). PKW-Systeme haben eine maximale Dauerleistung aus dem BZ-System von 90 bis 100 kW (z. B. NEXO 95 kW), eine maximale Dauerleistung am Motor von über 100 kW (NEXO 120 kW/395 Nm, Mirai II 134 kW/300 Nm) und eine maximale Peak-Leistung aus der Batterie von 20 bis 40 kW (z. B. NEXO 40 kW). Der Wirkungsgrad-Peak bei PKW-Systemen sollte laut DOE-Zielen [DOE 2020]

für 2020 bei 65 % und 25 % Teillast liegen, nach „ULTIMATE TARGETS“ [DOE 2020] sogar bei 70 %. Tatsächlich liegt der Peak-Wirkungsgrad bei der ersten Mirai-Generation (Version 2017) bereits bei 63,7 % bei ca. 8 bis 10 kW, also bei relativ niedriger Leistung, entsprechend ca. 10 % der Nennleistung [ANL 2018]. Beim NEXO dagegen ist der Peak-Wirkungsgrad nach unserer Einschätzung etwas niedriger als beim Mirai, dafür aber näher an der geforderten Teillast von 25 %.

Die für eine LKW-Anwendung erforderliche Leistung kann mit den derzeit verfügbaren Leistungsdichten auf Stapel- und Systemebene problemlos dargestellt werden. Der wesentliche Unterschied zwischen BZ-Systemen in PKW und LKW besteht darin, dass im PKW die Maximalgeschwindigkeit durch die maximale kontinuierliche Leistungsabgabe des BZ-Systems definiert wird. Beim LKW wird die maximale kontinuierliche Leistungsabgabe des BZ-Systems durch die maximale (dauerhafte) Steigfähigkeit vorgegeben, da die Maximalgeschwindigkeit auf ca. 85 km/h begrenzt ist. Sowohl bei PKW also auch bei LKW begrenzt der für das Thermomanagement zur Verfügung stehende Einbaureaum die maximale BZ-Systemleistung.

Kurzzeitige Leistungsspitzen wie zum Beispiel für die Beschleunigung oder kurze Steigungen werden problemlos durch die vorhandene Batterie abgedeckt. Im PKW gibt es Systeme mit geringer Batteriekapazität, wie z. B. im Toyota Mirai und Hyundai NEXO mit ca. 1,6 kWh. Diese Batteriekapazitäten ermöglichen einerseits die Bremsenergieerückgewinnung und unterstützen andererseits die kurzzeitige Spitzenleistung für Beschleunigungen oder kurze Anstiege. Einzig der Mercedes-Benz GLC F-CELL mit einer 13,8-kWh-Batterie ist ein Plug-in-Hybrid, der aus der Batterie heraus etwa 50 km weit betrieben werden kann. Durch höhere Batteriekapazitäten kann die Dynamik in der Betriebsführung des BZ-Systems im Vergleich zu Hybridisierungsstrategien mit niedrigen Batteriekapazitäten deutlich reduziert werden.

Die elektrische Leistungsanforderung an das BZ-System im Verbund mit Batterieleistung und -kapazität wird durch die Antriebsstrangauslegung des LKW vorgegeben und orientiert sich an den Fahrleistungen typischer Fernverkehr-LKW (siehe Kapitel 5.2 und 5.3).

Einer der großen Vorteile der BZ/Batterie-Hybridisierung liegt in der hohen Flexibilität der Systemauslegung. Im Idealfall kann ein System für spezielle Lastprofile und Maximalanforderungen optimal ausgelegt werden. Insbesondere durch die geeignete Dimensionierung des BZ-Stapels im BZ-

System kann die BZ-Systemwirkungsgrad-Kennlinie für die jeweilige Anwendung optimal ausgelegt werden.

6.1.7 Ausblick auf zukünftige Systeme

Die Technologie der BZ hat sich in den letzten Jahrzehnten deutlich weiterentwickelt, vor allem im Bereich der PEM-BZ. Dies zeigt sich vor allem in der deutlichen Zunahme der Stapel-Leistungsdichte, der hohen Robustheit und der stark verbesserten Lebensdauer (geringere Spannungsdegradation im Betrieb). Weltweit wird intensiv an der Weiterentwicklung der Materialien in der BZ sowie an der Optimierung der Systemkomponenten gearbeitet. Studien (z. B. [JRC, 2020]) zeigen, dass in den kommenden Jahren eine weitere Verbesserung der Systemwirkungsgrade zu erwarten ist.

6.1.8 Auslegung des Brennstoffzellenantriebs

Die Auslegung des Antriebsstrangs mit H₂-BZ und Batterie kann in unterschiedlichen Varianten erfolgen. Je nach Anforderung in Bezug auf maximale Leistung des Antriebsstrangs und maximale Reichweite ergeben sich unterschiedliche Anforderungen für H₂-BZ und Batterie.

Vereinfacht ausgedrückt kann die H₂-BZ eine Dauerleistung (in kW) bereitstellen. Die im Tank bevorratete Wasserstoffmenge definiert dabei die Dauer, während der die Dauerleistung bereitgestellt werden kann. Die Batterie hingegen liefert zusätzlich zur H₂-BZ die Spitzenleistung und kann durch Rekuperation (Bremsenergieerückgewinnung) geladen werden. Die Kapazität der Batterie definiert, wie lange die Batterie diese Spitzenleistung darstellen kann.

Tabelle 5 zeigt bestehende H₂-BZ-Projekte mit schweren Nutzfahrzeugen (mit bekannter BZ-Leistung und Batteriekapazität) nach [FCH 2020], [DAI 2020], [HYUNDAI 2021] und eigenen Recherchen.

Projekt	LKW-Typ/zGG [t]	Leistung BZ [kW]	Bat.-Kapazität [kWh]	Tankdruck [bar]/ H ₂ -Menge [kg]
H ₂ Share	Rigid 6x2/27	60	82	350 bar/30 kg
Waterstofregio 2.0	Tractor 4x2/44	88	72	350 bar/30 kg
ASKO	Rigid 6x2/27	90	56	350/33
Hyundai	Rigid 4x2/36	190	73,2	350/32
Esoro	Rigid 4x2/34	100	120	350/34,5
AZETEC	Tractor 6x4/63,5	210	n/a	350/100
ZANZEFF	Tractor 6x4/n/a	n/a	12	700/60
GTI	Tractor 6x4/n/a	60	n/a	350/19
Anheuser Busch	Tractor 6x4/40	240	250	700/81
Daimler	Tractor 4x2/40	2x 150	70	LH ₂ /80
Hyundai Xcient	Tractor 4x2/36	2x 95	73,2	350/34,5
Toyota Class 8	Tractor 6x2/36,3	2x 114	12	700/60
Nikola Motors	Tractor 6x2/n/a	300	320	700/n/a

Tabelle 5: Übersicht laufender H₂-BZ-Projekte mit schweren Nutzfahrzeugen

Quelle: [FCH 2020], [DAI 2020], [HYUNDAI 2021] und AVL Recherche

Weitere wasserstoffbetriebene LKW sind angekündigt, allerdings ohne technische Details.

Überlegungen zur Antriebsstrangauslegung

Ein voll beladener 40-Tonnen-LKW (zGG 42 t) benötigt auf ebener Strecke bei 80 km/h etwa 100 kW Antriebsleistung bei einem Energiebedarf von ca. 125 kWh/100 km. Bei einer Steigung von z. B. 4 % (Brenner-Pass) und 70 km/h beträgt die Antriebsleistung 400 kW.

Damit ein H₂-BZ-LKW auf ebener Strecke dauerhaft 80 km/h schnell fahren kann, muss das H₂-BZ-System mit mindestens 100 kW ausgelegt werden. Die Leistung der H₂-BZ für Antriebsstrang-Variante I wird daher mit 150 kW ausgelegt. Damit der Brenner-Pass befahren werden kann, muss die Batterie mindestens 30 min die Spitzenleistung von 250 kW liefern können, erfordert also eine Kapazität von mindestens 125 kWh. Die Batteriekapazität für Variante I wird daher mit 140 kWh angenommen.

Die Antriebsstrang-Variante II soll im Vergleich zu Variante I ein deutlich überdimensioniertes H₂-BZ-System erhalten, hier also 300 kW. Damit der Brenner-Pass befahren werden kann, muss die Batterie lediglich 100 kW für 30 min Spitzenlast beisteuern können, also mindestens 50 kWh Kapazität aufweisen. Daher wird die Batterie für Variante II mit 70 kWh angenommen.

Damit ergeben sich die zwei Antriebsstrang-Varianten für die Betrachtung in dieser Studie wie folgt:

- Variante I (Range-Extender-Konzept):
 - BZ: 150 kW, 80 kg H₂
 - Bat.: ± 400 kW, 140 kWh
 - Motor: ± 330 kW cont., ± 530 kW Peak (30 sec)
- Variante II („überdimensioniertes“ BZ-System):
 - BZ: 300 kW, 80 kg H₂
 - Bat.: ± 400 kW, 70 kWh
 - Motor: ± 330 kW cont., ± 530 kW Peak (30 sec)

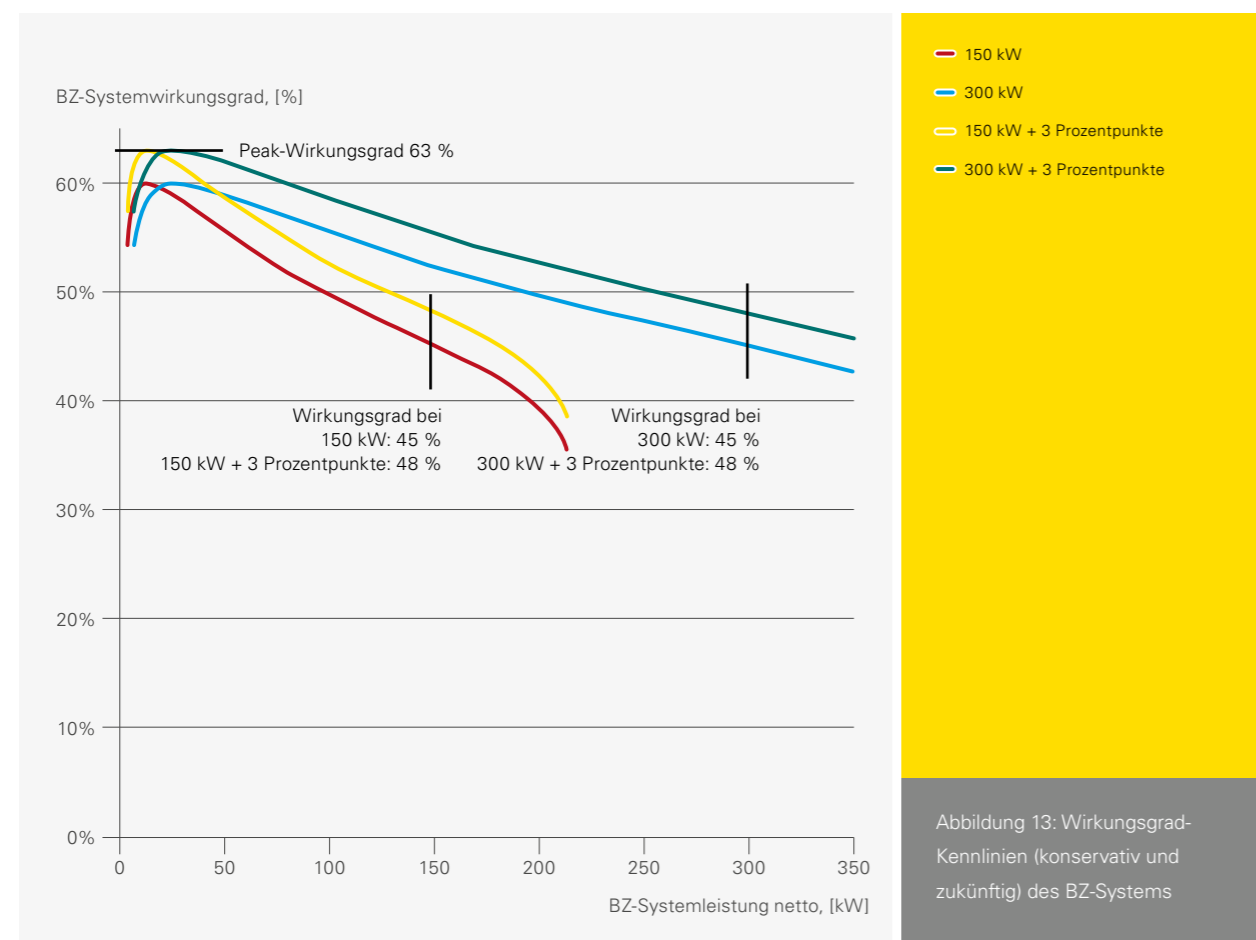
Für die in dieser Studie durchgeführte Antriebsstrang-Simulation wurden Wirkungsgradkennlinien für das BZ-System (bezogen auf den unteren Heizwert von Wasserstoff) aus einem Matlab-Simulink-Fahrzeugmodell abgeleitet und mit den verfügbaren Kennlinien realer Systeme verglichen (Abbildung 13). Neben den beiden Varianten (150 und 300 kW) wurden zusätzlich jeweils zwei Wirkungsgrad-Kennlinien simuliert, eine konservative und eine zukünftig mögliche.

Der allgemeine Verlauf der Systemwirkungsgrad-Kennlinie eines BZ-Systems wird in Kapitel 6.1.4 beschrieben. Beim direkten Vergleich zwischen einem 150- und einem 300-kW-System ist erkennbar, dass bei einer gleichen Nettoleistung der Wirkungsgrad des 300-kW-Systems über dem des 150-kW-Systems liegt. Dies liegt daran, dass bei gleicher

Nettoleistung des Systems die Bruttoleistung des BZ-Stapels bei unterschiedlichem elektrischem Strom und damit unterschiedlicher Stapelspannung erreicht wird. Bei gleicher Nettoleistung ist beim 150-kW-System der elektrische Strom des Stapels höher und die Stapelspannung damit geringer als beim 300-kW-System. Daher liegt die Wirkungsgrad-Kennlinie des 300-kW-Systems jenseits des Wirkungsgrad-Peaks oberhalb der Kennlinie des 150-kW-Systems.

Im maximalen Leistungspunkt (150 bzw. 300 kW) wird jeweils ein elektrischer Netto-Systemwirkungsgrad von konservativ 45 % und zukünftig möglich 48 % (+ 3 Prozentpunkte) angenommen. Durch eine höhere Anzahl von Wiederholeinheiten (Zellen) oder größerer Aktivfläche im BZ-Stapel selbst kann der Wirkungsgrad im Punkt maximaler elektrischer Leistung in Zukunft noch weiter optimiert werden. Für die Simulation wurde von einem maximalen elektrischen Wirkungsgrad von konservativ 60 % und zukünftig 63 % (+ 3 Prozentpunkte) ausgegangen.

Diese beiden Wirkungsgradkennlinien (konservativ und zukünftig) des BZ-Systems werden im Wirkungsgrad-Peak bereits heute vom Toyota Mirai (Version von 2017) übertroffen; hier werden im Peak 63,7 % erreicht [ANL 2018]. In [JRC, 2014] wird auch von einem Peak-Wirkungsgrad nahe 65 % ausgegangen. Es ist daher anzunehmen, dass zukünftig Peak-Wirkungsgrade von 65 % erreicht werden können. Einen maßgeblichen Einfluss hierauf hat der Luftverdichter; er ist erstens der Nebenaggregatsverbraucher mit der höchsten Leistungsaufnahme und zweitens besteht das Potenzial zur Wirkungsgradverbesserung bei der Luftverdichtung durch optimal ausgelegte elektrische Turbolader, eventuell in Kombination mit einem entsprechenden Turbo-Expander.



6.2 Der Wasserstoffmotor

6.2.1 Wasserstoff im Verbrennungsmotor

Tabelle 6 gibt einen Überblick verschiedener Kraftstoffeigenschaften, die für den Verbrennungsmotor relevant sind. Wasserstoff und dessen Eigenschaften für den Betrieb von Verbrennungsmotoren wurden in der Literatur ausführlich beschrieben [EICHLSEDER, KLELL 2010]; die Erkenntnisse können für die Anwendung im Nutzfahrzeug wie folgt zusammengefasst werden:

- Die innere Gemischbildung (Direkteinblasung) ermöglicht hohen Gemischheizwert und somit hohes Potenzial für die Leistungsdichte.
- Wasserstoff bietet sehr weite Zündgrenzen, was gute Teillasteffizienz ermöglicht, Wasserstoff in der Handhabung aber auch gefährlich macht (Kapitel 6.2.6).
- Die Zündenergie ist deutlich niedriger als bei anderen Ottokraftstoffen, was Wasserstoff sehr empfindlich gegenüber ungewollter Vorentflammung macht.
- Die Selbstzündungstemperatur ist auf vergleichbarem Niveau wie bei Methan/Erdgas. Somit ist ein Dieselprozess auch nur ähnlich aufwendig darstellbar.

6.2.2 Bisherige Wasserstoffmotor-Entwicklungen

Die besonderen Eigenschaften von Wasserstoff als Kraftstoff haben bereits früh in der Geschichte des Hubkolbenmotors zu Anwendungsversuchen geführt. In den 1930er-Jahren wurden vom deutschen Ingenieur Rudolf Arnold Erren erste Untersuchungen zur Direkteinblasung durchgeführt. Der gasförmige Kraftstoff wurde bei diesen Motoren

kurz nach Einlassschluss bei noch relativ geringen Drücken über ein Drosselventil in den Brennraum eingebracht [WESTERKAMP 1939]. Ab den 1960er-Jahren beschäftigten sich – nicht zuletzt aufgrund der raumfahrtgetriebenen Aktivitäten – vor allem Forschungsgruppen in den USA, Japan und Deutschland intensiv mit diesem Thema. Es wurden verschiedene Konzepte analysiert und Prototypenfahrzeuge aufgebaut. PKW- und Nutzfahrzeughersteller wie BMW [ENKE 2007], Ford [NATKIN 2007], Mazda [MAZDA 2020] und MAN [GREENCAR 2021] haben in den 1990er- und frühen 2000er-Jahren Fahrzeuge mit Wasserstoffmotoren entwickelt. BMW setzte 2006 mit dem Hydrogen 7 ein Wasserstofffahrzeug um, das den kompletten Entwicklungsprozess eines Serienfahrzeugs durchlaufen hatte. Eine Serieneinführung des Wasserstoffmotors hat es jedoch bis heute nicht gegeben. In den vergangenen Jahren wurden im Bereich Wasserstoffantrieb fast ausschließlich Brennstoffzellen entwickelt. Der Wasserstoffmotor zeigt jedoch konkrete Vorteile für den Einsatz in gewissen Applikationen, etwa dem schweren Nutzfahrzeug. Wenn die technische Entwicklung bei der Wasserstoff-Verbrennungstechnologie weiter voranschreitet, kann der Wasserstoffmotor eine sinnvolle Ergänzung zum Brennstoffzellenantrieb darstellen [ARNBERGER 2021].

6.2.3 Anforderungen an das schwere Nutzfahrzeug

Die ACEA [ACEA 2021] beschreibt, dass derzeit 98 % aller schweren Nutzfahrzeuge in der EU mit Diesel betrieben werden. Aus der Sicht von Fahrzeugherstellern bietet der Wasserstoffmotor im Vergleich zur Brennstoffzelle einige Vorteile, wie die Übernahme von Basismotor-Komponenten

Eigenschaften	Einheit	Diesel (EU B7)	CH ₄	H ₂
Dichte (1bar)	kg/m ³	0,835	0,716	0,09
Unterer Heizwert	MJ/kg	42,6	50	120
Stöchiometrischer Luftbedarf	kg/kg	14,5	17,2	34,3
Gemischheizwert (äußere Gemischbildung)	MJ/m ³	–	3,4	3,2
Gemischheizwert (innere Gemischbildung)	MJ/m ³	3,8	3,8	4,5
Mindestzündenergie	mJ	0,24	0,29	0,017
Zündgrenzen des Luftverhältnis (Lambda)	–	1,35–0,48	0,6–2,0	0,13–10
Selbstzündungstemperatur	°C	≈ 225	595	585
ROZ/Methanzahl (Maß für die Klopfestigkeit)	–	–	130/100	–/0

Tabelle 6: Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Diesel und Methan

Quelle: AVL

und Antriebsstrang, auch bestehende Architekturen des Kühlsystems können übernommen werden. Um diese Vorteile tatsächlich nutzen zu können, müsste ein Wasserstoffmotor die gleiche Leistungs- und Drehmomentcharakteristik wie ein Dieselmotor bereitstellen. Die benötigten Leistungen, um rund 80 % aller vom Dieselmotor derzeit angetriebenen Applikationen bedienen zu können, sind in Kapitel 5.2 zusammengefasst.

6.2.4 Emissionsverhalten des Wasserstoffmotors

In diesem Kapitel wird auf das Rohemissionsverhalten des Wasserstoffmotors eingegangen. Wie bei allen modernen Fahrzeugantrieben mit Verbrennungsmotor ist die richtige Kombination aus Motor und Abgasnachbehandlung wichtig. Abgasnachbehandlungskonzepte für den Wasserstoffmotor werden im Kapitel 6.2.8 genauer beschrieben.

Stickoxidemissionen

In Abbildung 14 ist der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Stickoxidrohmissionen und dem Luftverhältnis (λ) dargestellt. Abhängig von der Gemischbildung bzw. -zusammensetzung, der Last, des Aufladegrades sowie der Verbrennungslage ergeben sich unterschiedliche Verläufe. Bei einem Luftverhältnis > 1 spricht man von magerem Betrieb, d. h. es steht mehr Luft zur Verfügung, als für eine stöchiometrische Umsetzung des Kraftstoffs nötig wäre. Die Maximalwerte sind im dargestellten Fall recht ähnlich und liegen im Bereich zwischen $\lambda = 1,2$ und $1,3$, jedoch ergeben sich v. a. im mageren Bereich nennenswerte Differenzen. Für einen praktisch stickoxidfreien Magerbetrieb gelten also etwas unterschiedliche Grenzen. Hauptgründe für die Abweichung in den Verläufen sind zum einen der unterschiedliche Homogenisierungsgrad zwischen äußerer und früher innerer Gemischbildung und zum anderen das unterschiedliche Temperaturniveau [GRABNER, 2009].

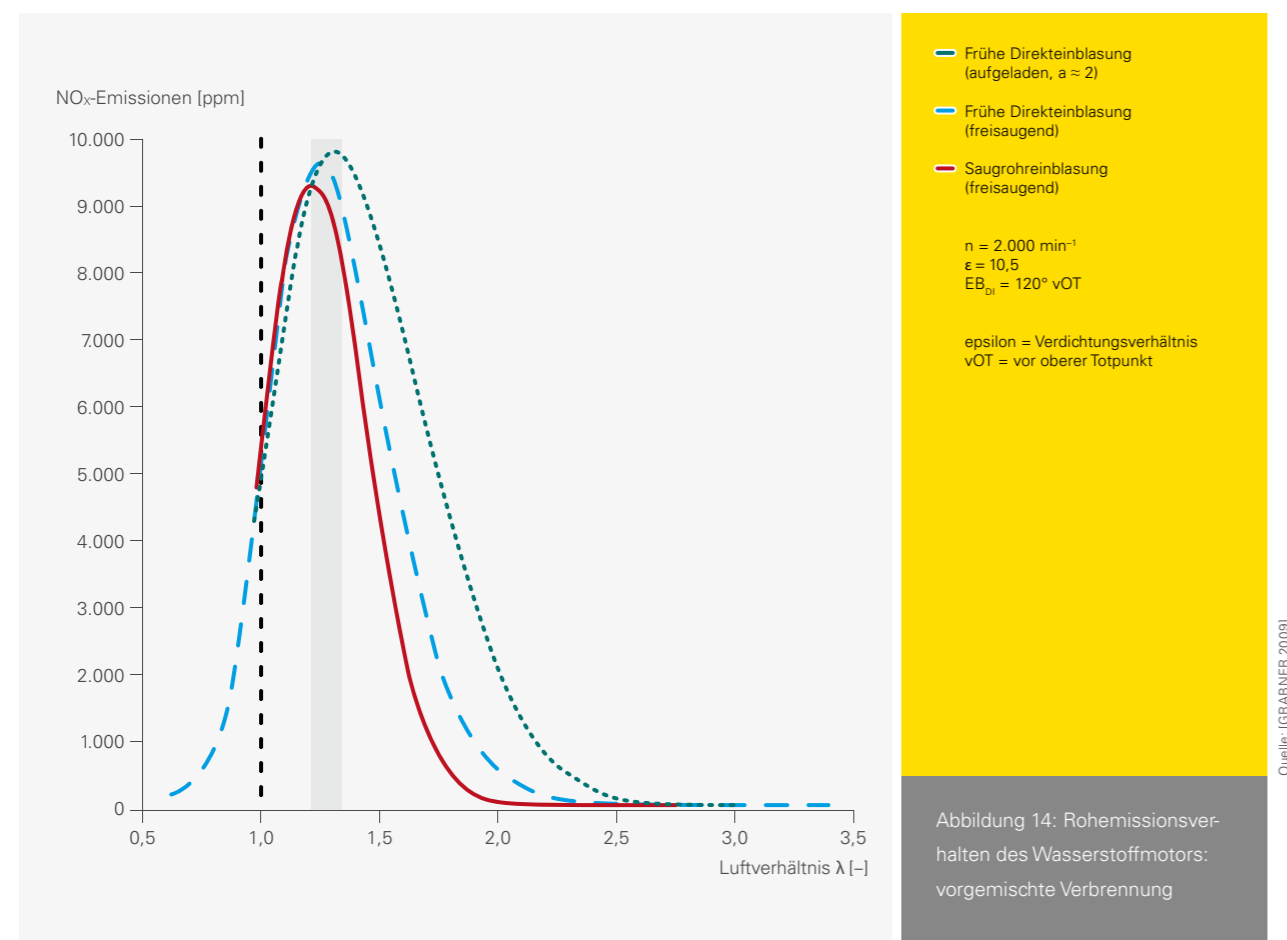


Abbildung 14: Rohemissionsverhalten des Wasserstoffmotors: vorgemischte Verbrennung

Abbildung 15 zeigt das Stickoxidrohmissionsverhalten bei direkter Einbringung des Wasserstoffs in den Brennraum (Direkteinblasung). Konkret ist ein früher sowie ein später Einblasebeginn abgebildet. Bei sehr später Einblaselage kommt es zu einer ausgeprägten Ladungsschichtung im Brennraum, was dazu führt, dass die Stickoxidkonzentrationen im gesamten λ -Bereich auf ähnlichem Niveau zu liegen kommen (rote Linie) [GRABNER, 2009]. Die starken NO_x -Emissionen bei niedrigem Luftverhältnis können somit unterbunden werden.

Die in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellten Verläufe zeigen, dass das Stickoxidrohmissionsverhalten stark vom gewähltem Motorkonzept abhängt, was die richtige Kombination aus Motor und Abgasnachbehandlung unterstreicht.

Bosch veröffentlichte Ergebnisse eines Wasserstoffmotors, dessen Stickoxidrohmissionen in Abbildung 16 zu sehen sind. Konkret sind die spezifischen NO_x -Rohmissionen in Abhängigkeit von Motordrehzahl (n) und effektivem Mitteldruck (BMEP) dargestellt. Der effektive Mitteldruck entspricht einem spezifischen Drehmoment, an der Ordinate ist das Diagramm durch die Vollastkurve begrenzt. Dieser Wasserstoffmotor, als fremdgezündeter Magermotor mit Direkteinblasung ausgelegt, zielt zwar auf die Applikation im leichten Nutzfahrzeug und im PKW ab, ist in Bezug auf Drehmoment, thermodynamische Auslegung und Kalibrierung jedoch recht gut mit einem ottomotorischen Magerkonzept für das schwere Nutzfahrzeug vergleichbar [PAUER 2020]. Die NO_x -Rohmissionen, die durch Iso-Linien in Abbildung 16 dargestellt sind und zur Vollastbegrenzung hin, aufgrund des sinkenden Luftverhältnisses steigen, können durch entsprechend ausgelegte SCR-Abgasnachbehandlung auf das gesetzlich geforderte Niveau und darunter reduziert werden.

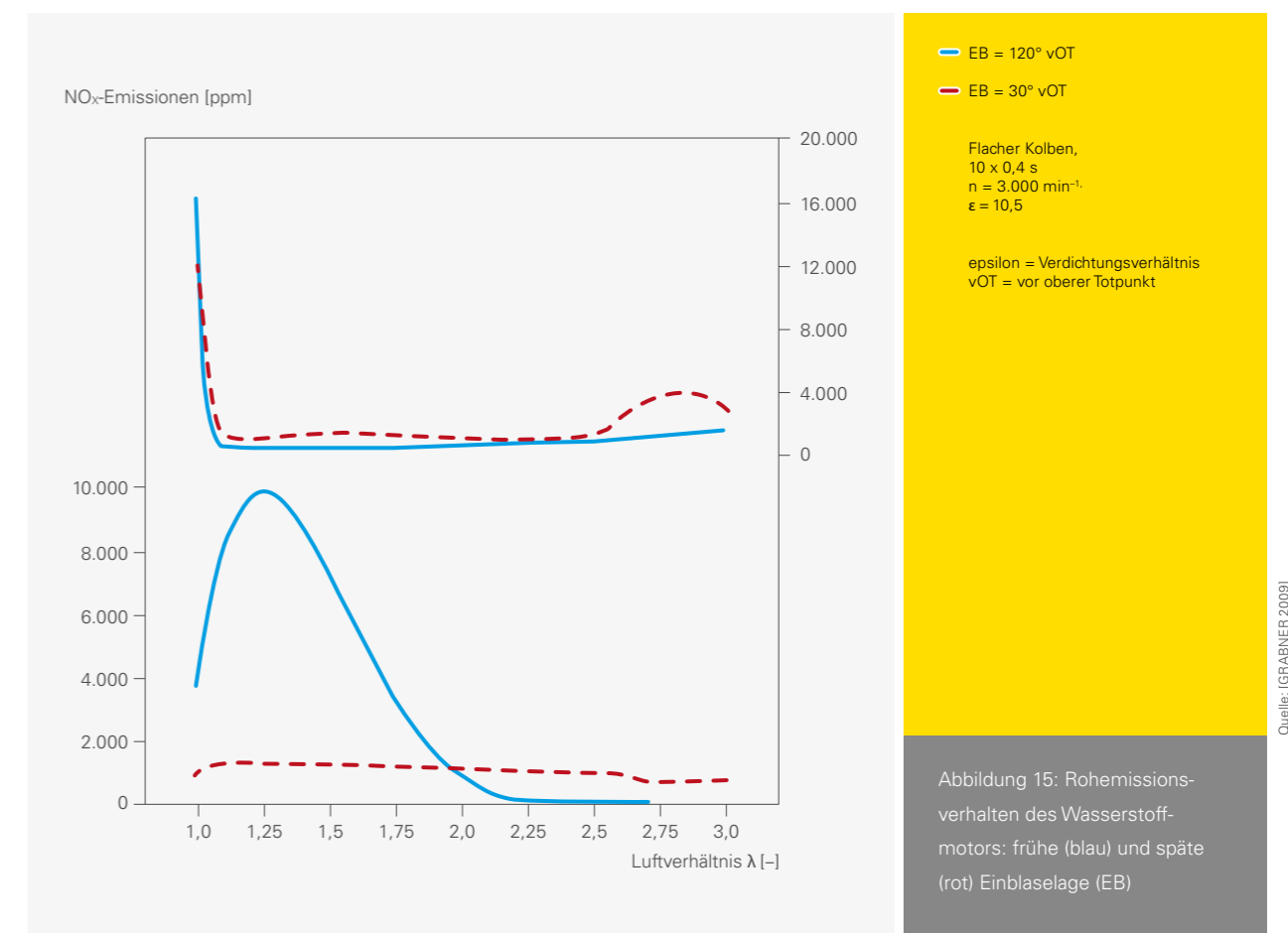
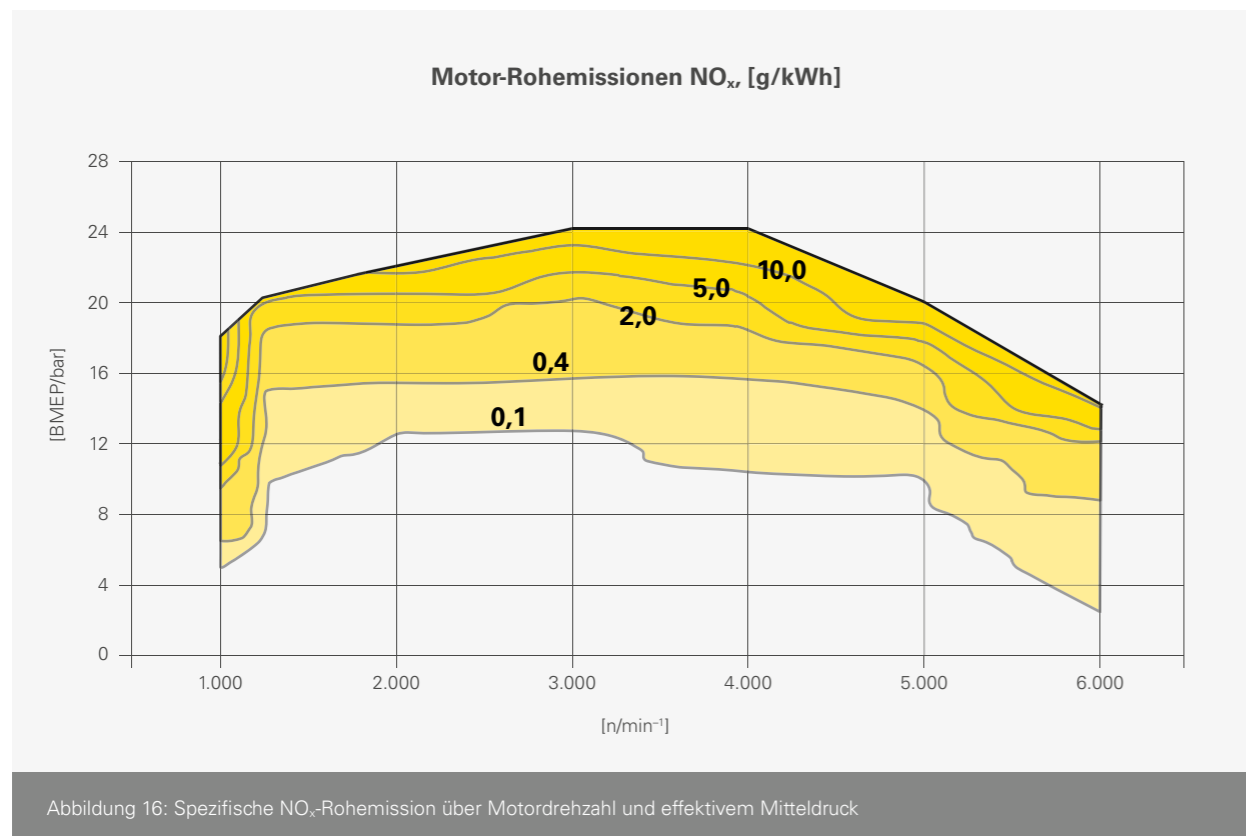


Abbildung 15: Rohemissionsverhalten des Wasserstoffmotors: frühe (blau) und späte (rot) Einblaselage (EB)



HC- und CO-Emissionen

Kohlenwasserstoff(HC)- und Kohlenmonoxid(CO)-Emissionen werden durch das Motoröl verursacht und sind auch nachweisbar. Sie fallen jedoch sehr gering aus, sodass bereits die Rohemissionen weit unter den gesetzlichen Anforderungen liegen.

Abbildung 17 beinhaltet zwei Kennfelder: HC- und CO-Rohemissionen eines Wasserstoffmotors, aufgetragen über Motordrehzahl (n) und effektivem Mitteldruck (BMEP). Beide Diagramme sind an der Ordinate durch die Vollastkurve begrenzt. Die Linien im Diagramm sind Isolinien, d.h. Verbindungslinien zwischen Punkten gleicher Konzentration. In beiden Fällen nimmt die Konzentration an HC- und CO-Emissionen mit steigendem effektivem Mitteldruck und Drehzahl zu.

Partikelemissionen

Aus der Verbrennung des Wasserstoffs selbst entstehen keine Partikelemissionen. Allerdings können aufgrund von Motorölemissionen in den Brennraum, wie oben bei HC-

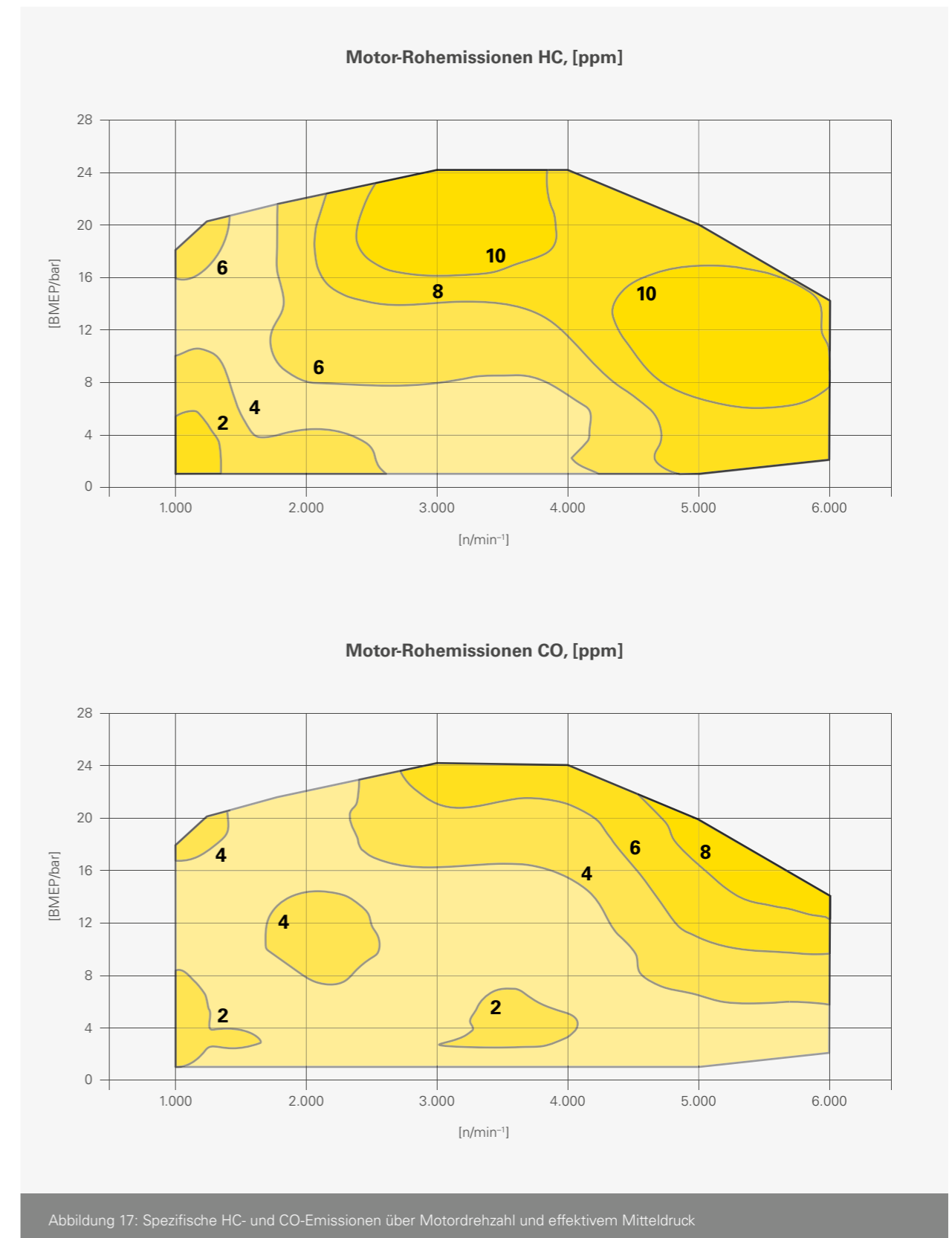
und CO-Emissionen beschrieben, kleinste Mengen an Partikeln emittiert werden. Es ist davon auszugehen, dass ein Wasserstoffmotor keinen Partikelfilter benötigt, um gesetzliche Schadstoffemissionslimits einhalten zu können. Allerdings wurde ein genaues Verhalten der Partikelemissionen über lange Motorlaufzeiten noch nicht näher untersucht.

Resümee

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Der Wasserstoffverbrennungsmotor ist „zero-impact“-fähig. Geringste NO_x-Emissionen und CO₂ spielen keine Rolle ...

Wasserstoffmotoren bieten im Vergleich zu Dieselmotoren das Potenzial niedrigerer Schadstoffemissionen. Zwar gibt es konkrete Zielkonflikte zwischen Leistungsdichte und Stickoxidrohmissionen, jedoch kann durch die richtige Kombination von Motor- und aktuell verfügbarer Abgasnachbehandlungstechnologie sowohl die aktuelle als auch die derzeit absehbare künftige Emissionsgesetzgebung unterschritten werden.



6.2.5 Ottomotorische Verbrennungskonzepte für das Nutzfahrzeug

Der Wasserstoffmotor bietet als fremdgezündeter Motor theoretisch die Möglichkeit, ohne Ausstoß von CO₂-Emissionen betrieben zu werden (CO₂-Emissionen aus verbranntem Schmieröl und SCR-Reduktionsmittel nicht berücksichtigt). Wie in Abschnitt 6.2.4 beschrieben, bietet die ottomotorische Magerverbrennung zusätzlich den Vorteil niedrigster Stickoxidemissionen bei hohem Luftverhältnis. Allerdings ist das erreichbare Luftverhältnis bei Vollast stark von der gewünschten Leistungsdichte und dem erreichbaren Ladedruck abhängig. Die Leistungsdichte bzw. der erreichbare Mitteldruck werden somit wesentlich von der zulässigen Stickoxidemission bestimmt [ARNBERGER 2021].



Quelle: AVL

Saugrohreinspritzung

Kennzeichen der Saugrohreinspritzung: Die Einbringung des Kraftstoffs erfolgt vor den Einlassventilen der Brennkammer (also im Saugrohr) während des Ansaugtaktes.

Geht man von einer maximalen Gleichteileverwendung aktueller Diesel- oder Erdgasmotoren aus, so bietet die Saugrohreinspritzung die meisten Vorteile. Der Nachteil des niedrigen Gemisch-Heizwertes gegenüber der Direkteinspritzung lässt sich teilweise durch niedrigere Luftverhältnisse kompensieren. Aufgrund der besseren Gemisch-Homogenisierung können für gleiche NO_x-Emissionen geringere λ-Werte gefahren werden. Die Gefahr der unkontrollierten Vorent-

flammung und damit verbundener Rückzündungen in das Saugrohr macht dieses Konzept für das schwere Nutzfahrzeug und dessen lange Nutzungsdauer weniger interessant [ARNBERGER 2021].

Direkteinspritzung (Fokus: Übernahme bestehender Motorkomponenten)

Kennzeichen der Direkteinspritzung: Die Einbringung des Kraftstoffs erfolgt direkt in die Brennkammer, unmittelbar nach dem Ansaugen der Frischluft.

Die Direkteinspritzung unterbindet die Gefahr von Rückzündungen und bietet aufgrund des hohen Gemisch-Heizwertes großes Potenzial für die Leistungsdichte. Dieser Vorteil kann allerdings nur bei entsprechend optimierter Gemisch-Aufbereitung umgesetzt werden. Dieses H₂-Verbrennungskonzept steht momentan im Hauptfokus der Entwicklungstätigkeiten.

Die erste Generation von Wasserstoffmotoren in schweren Nutzfahrzeugen in Europa verfügt mit höchster Wahrscheinlichkeit über zündkerzengezündete Magerkonzepte mit niedrigem H₂-Einblasdruck. Dafür gibt es folgende Gründe:

- Direkteinspritzung (DI, Direct Injection) ist im Vergleich zur Saugrohreinspritzung (MPI, Multi Point Injection) weniger kritisch im Hinblick auf irreguläre Verbrennung sowie Rückzündungen, was insbesondere relevant für eine lange Motorlebensdauer ist („Useful Life“). Für Anwendungen mit kürzerer Motorlebensdauer (leichtes Nutzfahrzeug) kann die Saugrohreinspritzung auch als Alternative angesehen werden.
- Die Übernahme von Dieseldesign (z. B. Zylinderkopf-Rohrteil) ist aus konstruktiver Sicht möglich. Die Integration von Zündkerze und DI-Injektor benötigt jedoch für jeden Basismotor entsprechende Untersuchungen und Anpassungen.
- Die moderaten Einspritzdrücke (20–30 bar) erfordern keine zusätzliche Verdichtung des Kraftstoffs an Bord.
- Das Magerkonzept mit vorgemischter Verbrennung zeigt den Vorteil von sehr niedrigen NO_x-Emissionen im stationären Niedriglastbetrieb (z. B. langer Leerlaufbetrieb).
- Das benötigte Abgasnachbehandlungssystem (SCR) ist ähnlich zu bestehenden Abgasnachbehandlungssystemen, wie sie für Dieselmotoren verwendet werden. AdBlue-Infrastruktur (AdBlue: Reduktionsmittel für NO_x) ist vorhanden.



Quelle: AVL

- Die erreichbare Leistung entspricht jener von Dieselmotoren in der meistverkauften Leistungsklasse.
- Hardware-Entwicklung (Injektoren, Druckregelventile etc.) ist bei Komponenten-Herstellern im Gange.
- Es ist kein Dieseldieselkraftstoff zur Zündung notwendig, daher ist eine 100%ige CO₂-Reduktion möglich (ohne Berücksichtigung von AdBlue oder Öl-Emissionen).

Risiken/Nachteile des Konzepts

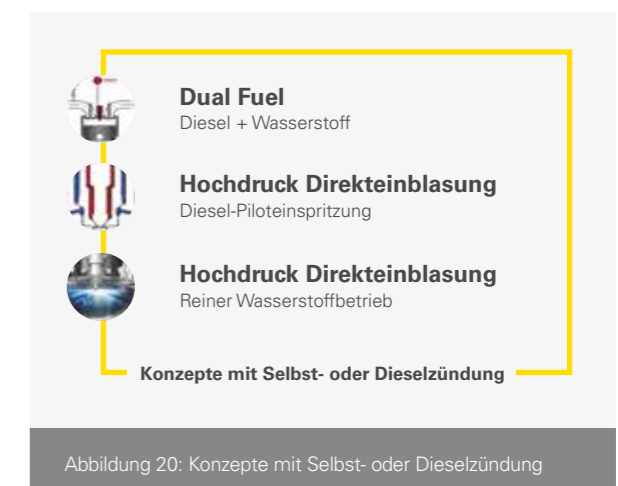
- Der Wirkungsgrad ist niedriger im Vergleich zu modernen Dieselmotoren.
- Da AdBlue Kohlenstoff enthält, könnte die Verwendung in einem SCR-Abgasnachbehandlungssystem als nicht CO₂-frei angesehen werden. Die Verwendung von gasförmigem Ammoniak (NH₃) als Reduktionsmittel im SCR kann eine kohlenstofffreie Alternative sein.
- Die transiente Performance ist im Vergleich zum Dieselmotor mit demselben Hubvolumen benachteiligt. Gegenmaßnahmen wie die Erhöhung des Hubvolumens, externe Aufladung und Hybridisierung sind möglich.

Direkteinspritzung (neuer, gasspezifischer Zylinderkopf)

Dieses Konzept unterscheidet sich thermodynamisch nicht von den anderen Magerkonzepten. Im Falle einer Neuent-

wicklung des Zylinderkopfs kann allerdings besondere Rücksicht auf die optimale Kombination aus Ladungsbewegung und Injektor-Positionierung genommen werden, um somit die Gemischbildung und Verbrennung zu verbessern.

6.2.6 Verbrennungskonzepte mit Selbst- und Dieseldzündung



Quelle: AVL

Dual-Fuel-Motor

Ein Dual-Fuel-Betrieb mit Diesel und Wasserstoff ist ein durchweg pragmatischer Weg, um die CO₂-Emissionen bei maximaler Modularität zum Basis-Dieselmotor zu senken. Vor- und Nachteile von Dual-Fuel-Motoren wurden in Veröffentlichungen der TU Graz beschrieben [BARNSTEDT 2015]. In diesen sind Messergebnisse hinsichtlich Emissionen und Substitutionsrate dargestellt. In einem weiten Kennfeldbereich können Substitutionsraten von über 90 % abgebildet werden. Mit der mit steigender Last einhergehenden, stärkeren Neigung zu Verbrennungsanomalien muss die Substitutionsrate trotz reduziertem Verdichtungsverhältnis im Vergleich zum Dieselmotor allerdings reduziert werden. Ein Mitteldruckniveau wie für das schwere Nutzfahrzeug angestrebt (≈ 24 bar) konnte bislang nicht mit wünschenswerter Substitutionsrate dargestellt werden [ARNBERGER 2021].

Hochdruck-Direkteinblasung mit Piloteinspritzung

Sollte der Wasserstoffmotor Einzug ins schwere Nutzfahrzeug halten, wird der Fokus künftiger Entwicklungen auf möglichst hohe Effizienz, Leistungsdichte und bestes transientes Ansprechverhalten gelegt werden. Diese Anforderungen lassen sich am besten durch Verbrennungskonzepte mit nicht vorgemischter Verbrennung („Diffusionsverbrennung“) erreichen. Das Verbrennungsprinzip gleicht dabei einer üblichen Dieselverbrennung, die Zündung des Wasserstoffs erfordert durch die hohe Zündtemperatur des Wasserstoffs spezielle Maßnahmen. Bedingungen zur Zündung können durch einen Glühstift, eine Zündkerze oder etwa eine Diesel-Piloteinspritzung geschaffen werden.

Eine baldige technische Umsetzung in Serie ist nur in Verbindung mit Diesel-Piloteinspritzung möglich. Gleiche Verbrennungskonzepte mit Erdgas-Hochdruckeinblasung und Diesel-Piloteinspritzung wurden bereits entwickelt und sind in Serie [VOLVO 2021]. Der Gasanteil (Gas Energy Ratio) kann damit in der Praxis auf 95 % gebracht werden [ARNBERGER 2018]. Westport Fuel Systems bietet für den Serieneinsatz dazu ein Einspritzsystem an [WFSINC 2021].

Aus Sicht der Motorenentwicklung scheint eine Überführung dieser Technologie zur Wasserstoff-Hochdruckeinblasung möglich. Der Umstand, dass aktuell keine Serienlösungen für H₂-Hochdruckkompressoren oder H₂-Kryogenpumpen für den mobilen Einsatz verfügbar sind, stellt ein Risiko für dieses Motorenkonzept dar. Ebenso der Umstand, dass mit der Pilot-

einspritzung zwangsläufig ein zweiter, kohlenstoffhaltiger Kraftstoff (Diesel) zum Einsatz kommt.

Hochdruck-Direkteinblasung-Monofuel

Langfristiges Ziel sollte es sein, die nicht vorgemischte Verbrennung des Wasserstoffs ohne Diesel-Piloteinspritzung darstellen zu können. Bemühungen, den Dieselanteil bei Erdgas-Hochdruckkonzepten am Nutzfahrzeugmotor durch eine externe Zündquelle zu ersetzen, zeigten zwar die grundsätzliche Machbarkeit [MCTAGGERT 2019], konnten allerdings nie bis zur Serienreife entwickelt werden.

Glühstiftbrennverfahren wurden ebenfalls schon am Wasserstoffmotor erfolgreich getestet. So konnten an PKW-Derivaten bereits vor mehr als zehn Jahren Glühstiftbrennverfahren im gesamten Kennfeld mit hohen Wirkungsgraden dargestellt werden [EICHLSEDER 2010].

Die Bestpunktwirkungsgrade (45 % ~ 46.5 %) gelten für Konvertierungen von aktuellen Dieselmotoren. Optimiert man das Basisaggregat und hebt man den Einblasedruck weiter an, sind Bestpunktwirkungsgrade bis zu 50 % denkbar.

Daraus ergeben sich folgende konkrete Vorteile:

- hohes Wirkungsgradpotenzial
- große Bauteilegleichheit mit dem Dieselmotor
- hohe Leistungsdichte, hohes Drehmoment, gutes transientes Ansprechverhalten
- Rohemissionsverhalten (NO_x) ähnlich dem Dieselmotor auf etwas geringerem Niveau

Risiken/Nachteile des Konzepts:

- Aktuell wird von einem Tankdruck von 700 bar ausgegangen. Entspräche der Einblasedruck dem Restdruck im Tank, so ergäbe sich ein großer Nachteil in Bezug auf Tankgröße bzw. Reichweite. Aktuell sind keine Serienlösungen für H₂-Hochdruckkompressoren oder H₂-Kryogenpumpen für den mobilen Einsatz verfügbar. Deren Entwicklung ist aber denkbar, da es die Technologie grundsätzlich bereits für stationäre Anwendungen gibt.
- hoher Entwicklungsaufwand eines stabilen Verbrennungssystems mit dauerhaltbaren Glüh- oder Zündkerzen, insbesondere unter Berücksichtigung der Anforderungen am schweren Nutzfahrzeug.

6.2.7 Wasserstoffmotorkonzepte und deren Wirkungsgrad für die TCO-Betrachtung

Im Kapitel 7.1.5 werden die jährlichen Betriebskosten ermittelt, wofür eine genaue Kenntnis der Effizienz der verwendeten Motorkonzepte nötig ist. Da sich die Motorkonzepte deutlich unterscheiden, sind die wesentlichen Unterschiede (Arbeitsprinzip und daraus resultierend Wirkungsgrad) der beiden Konzepte in Tabelle 7 zusammengefasst. In ihr ist

auch der effektive Wirkungsgrad für beide Konzepte in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl dargestellt. Die Diagramme sind an der Ordinate durch die Volllastkurve begrenzt. Die Linien im Diagramm beschreiben Punkte gleicher Effizienz. In beiden Fällen befindet sich der Kennfeld-„Sweet-Spot“ im Bereich von 1.000 bis 1.200 Umdrehungen pro Minute sowie etwa 75 % der Last. Anhand der Kennfelder ist zu erkennen, dass der für das Modelljahr 2030 vorgesehene Wasserstoffmotor neben der besseren Spitzeneffizienz auch höhere Effizienz in der Teillast hat.

Wasserstoffmotor für das Modelljahr 2025 (H ₂ LP-DI)	Wasserstoffmotor für das Modelljahr 2030 (H ₂ HP-DI)
Arbeitsprinzip = Ottomotor	Arbeitsprinzip = Dieselmotor
Ottomotorische Verbrennung: Das vorgemischte Luft-Kraftstoff-Gemisch wird mittels Zündkerze gezündet	Dieselmotorische Verbrennung: Gemischbildung und Verbrennung geschehen gleichzeitig
Gründe für den moderaten Wirkungsgrad - niedriges Verdichtungsverhältnis - Verbrennungsschwerpunkt durch Klopfen begrenzt - relativ hohe Wandwärmeverluste - hohes Luftverhältnis bei Vollast nötig, das zu Kompromissen in der Ladungswechselarbeit führt	Gründe für den hohen Wirkungsgrad - hohes Verdichtungsverhältnis - keine Klopflimitierung - geringe Wandwärmeverluste - flexibel in der Wahl des Luftverhältnisses, was zu guter Ladungswechselarbeit führt
Kennfeld des effektiven Wirkungsgrades, 13-l-Wasserstoffmotor, Modelljahr 2025 (H ₂ LP-DI)	Kennfeld des effektiven Wirkungsgrades, 13-l-Wasserstoffmotor, Modelljahr 2030 (H ₂ HP-DI)
Tabelle 7: Arbeitsprinzipien und effektive Wirkungsgrade der beiden in der TCO-Rechnung verwendeten Wasserstoffmotorkonzepte	

6.2.8 Abgasnachbehandlung

Betrachtet man Partikel-, Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxid-Rohemissionen, so unterschreitet der Wasserstoffmotor, als ottomotorisches Magerkonzept ausgeführt, aktuelle und künftige Grenzwerte (wie in Kapitel 6.2.4 beschrieben). Allerdings gibt es konkrete Zielkonflikte zwischen Leistungsdichte und Stickoxidrohmissionen. Durch die korrekte Kombination aus Motor und aktuell verfügbarer Abgasnachbehandlungstechnologie können Grenzwerte der heutigen und künftigen Emissionsgesetzgebung unterschritten werden.

Konzept zur Erfüllung der aktuellen Gesetzgebung (Euro VI)

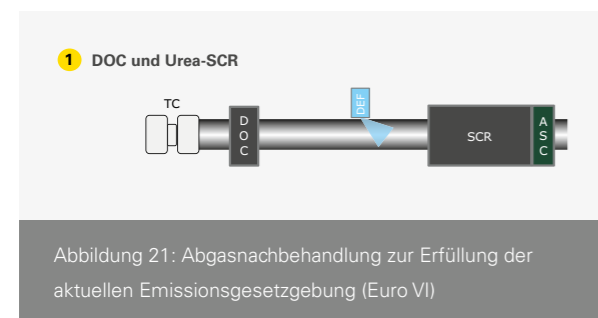


Abbildung 21: Abgasnachbehandlung zur Erfüllung der aktuellen Emissionsgesetzgebung (Euro VI)

Abbildung 21 zeigt die Abgasnachbehandlungskomponenten für die Erfüllung der aktuellen Emissionsgesetzgebung (Euro VI). Der Oxidationskatalysator (DOC) kann für die Anwendung bestimmter SCR-Technologien weggelassen werden. Zwischen Oxidationskatalysator und SCR-Katalysator kann optional ein Partikelfilter zum Einsatz kommen. Die Stickoxidreduktion erfolgt im SCR-Katalysator. Wie bei aktuellen Dieselantrieben können sowohl Zeolith- als auch Vanadiumpentoxid-Katalysatoren eingesetzt werden. Um überschüssiges Ammoniak zu oxidieren, werden SCR-Katalysatoren am Ende üblicherweise mit einer Beschichtung versehen (Ammonia Slip Cat, ASC). Als Reduktionsmittel kann, wie beim Nutzfahrzeug üblich, eine wässrige Harnstofflösung (AdBlue oder DEF) zum Einsatz kommen.

Konzepte zur Erfüllung künftiger Anforderungen (Euro VII)

Aktuell gibt es erste Veröffentlichungen zur Euro-VII-Norm, die möglicherweise im Zeitraum 2025 bis 2027 in Kraft treten wird [ACEA_2 2020]. In Zukunft ist die Verwendung mehrstufiger SCR-Systeme im Nutzfahrzeug zum Zwecke der Stick-

oxidsenkung sehr wahrscheinlich. Beim Dieselmotor werden wie heute SCR-Katalysatoren mit wässriger Harnstofflösung als Reduktionsmittel zum Einsatz kommen. Auch diese Technologie lässt sich auf den Wasserstoffmotor übertragen, wie in Abbildung 22 als Konzept 3 dargestellt.

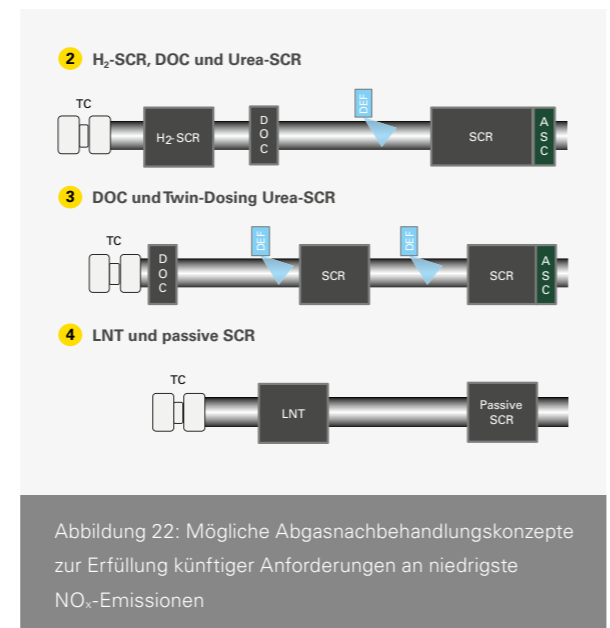


Abbildung 22: Mögliche Abgasnachbehandlungskonzepte zur Erfüllung künftiger Anforderungen an niedrigste NO_x-Emissionen

Die Konzepte 2 und 4 sind mögliche Alternativen, die ebenfalls eine mehrstufige NO_x-Reduktion ermöglichen, hinsichtlich Marktreife aber deutlich hinter Konzept 3 liegen. Bei allen Konzepten der Abbildung 22 kann ein Partikelfilter optional Verwendung finden.

Mögliche Reduktionsmittel für die notwendige NO_x-Konvertierung im Abgasnachbehandlungssystem sind:

1. AdBlue
2. Wasserstoff
3. Ammoniak
4. eine Kombination der verschiedenen Ansätze, zum Beispiel Wasserstoff mit AdBlue oder Ammoniak

AdBlue hat einen Startvorteil: Es ist heute das gebräuchliche Mittel in allen Anwendungen, die ein solches Reduktionsmittel benötigen. Daher ist seine Verfügbarkeit gegeben. Zudem ist die Handhabung ungefährlich und die Kosten sind vertretbar. Der wesentliche Nachteil betrifft sicherlich die CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung von AdBlue entstehen. Diese sind dennoch um einige Größenordnungen

geringer als jene von Dieseldieselkraftstoff, weil der Anteil von AdBlue am Diesel im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegt (in der Regel; dies ist jedoch stark abhängig von der Technologieroute der Fahrzeughersteller) und auch die Verbrennung von AdBlue im Vergleich zum Diesel deutlich weniger CO₂ freisetzt.

Abhilfe in puncto CO₂-Emissionen könnten Wasserstoff und reines Ammoniak als Reduktionsmittel schaffen. Wasserstoff hat den Vorteil, dass er schon in einem sehr niedrigen Temperaturfenster angewendet werden kann. Beim Wasserstoffmotor ist dieses Niedertemperaturfenster grundsätzlich nicht so wichtig, weil die NO_x-Emissionen hier im Vergleich zum Diesel deutlich geringer sind. Bei höheren Temperaturen gibt es die Gefahr der Bildung von N₂O, einem starken Treibhausgas. Bei reinem Ammoniak, zum Beispiel in flüssiger Form im Druckbehälter, stellt sich die Frage nach der Gefahr der Handhabung, da Ammoniak als giftig und umweltgefährdend eingestuft ist.

Aktuell ist die Nutzung von AdBlue für den Wasserstoffmotor die am schnellsten zu realisierende Möglichkeit. Alternativen wie Wasserstoff oder Ammoniak oder Kombinationen davon befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium, eine zukünftige Nutzung hätte positive Effekte in Bezug auf die weitere CO₂-Reduktion.

6.2.9 Aktuelle Entwicklungen (Beispiele)

MAN

MAN Truck & Bus war mit der praktischen Anwendung des Wasserstoffmotors in der Stadtbus-Anwendung bereits in der Vergangenheit aktiv [GREENCAR 2021]. MAN will nun wieder Prototypen-Fahrzeuge aufbauen, die mit Wasserstoff betrieben werden: Für die Variante mit Brennstoffzelle rechnet MAN mit einer Reichweite von rund 800 Kilometern. Im Wasserstoffmotor sieht der Hersteller hingegen „eine schneller verfügbare und robuste Lösung“, die als Brückentechnologie dienen kann [AUTOMI 2021].

Scania/Westport

Scania und Westport Fuel Systems haben veröffentlicht, Untersuchungen zur Verwendung eines HP-DI-Wasserstoff-Kraftstoffsystems (High Pressure Direct Injection) mit der neuesten Motorgeneration von Scania durchzuführen [SCANIA 2021]. Die in der Veröffentlichung angesprochene Technologie entspricht dem in Kapitel 6.2.6 beschriebenen Konzept der Hochdruckeinblasung mit Piloteinspritzung. Wie auch bei anderen Herstellern wird betont, dass Scania neben diesem Wasserstoffmotor viele andere erneuerbare sowie elektrische Alternativen zum Dieselantrieb untersucht.



Abbildung 23: MAN sieht H₂-BZ und H₂-Motor im Portfolio vor, wobei der H₂-Motor als „die schneller verfügbare und robuste Lösung“ gesehen wird

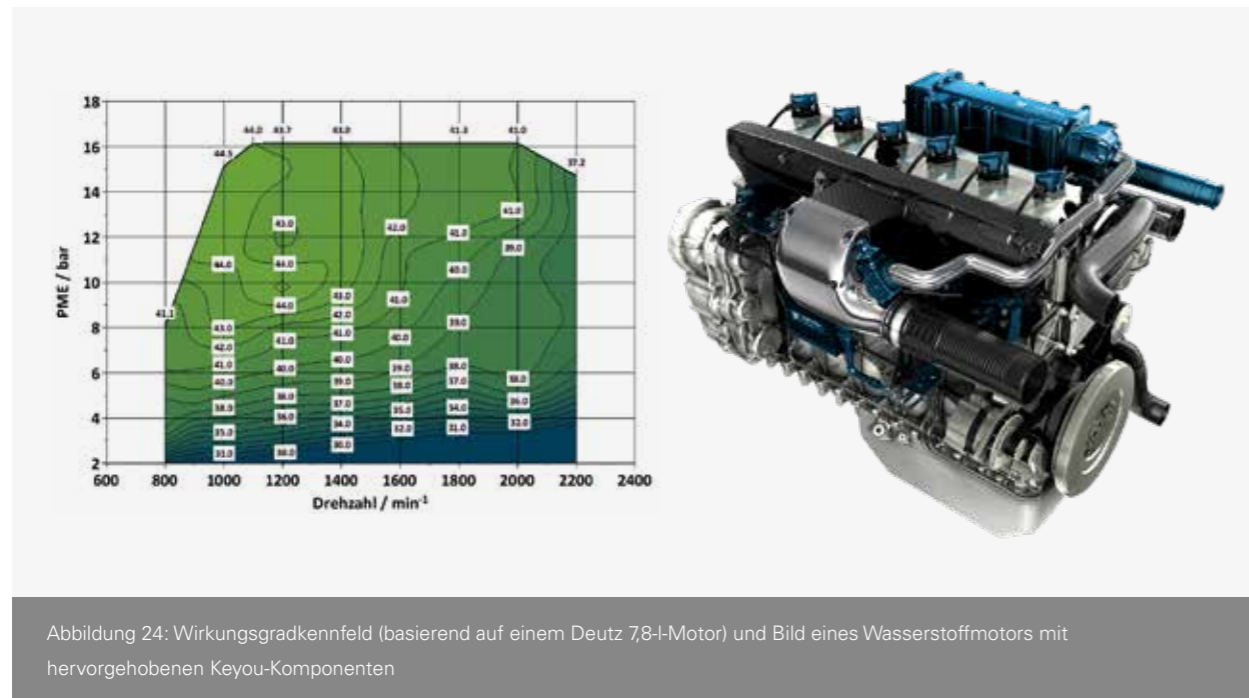


Abbildung 24: Wirkungsgradkennfeld (basierend auf einem Deutz 7,8-l-Motor) und Bild eines Wasserstoffmotors mit hervorgehobenen Keyou-Komponenten

Quelle: [Keyou GmbH]

Keyou

Die Firma Keyou bietet die Konvertierung von Verbrennungsmotoren auf Wasserstoff an, siehe beispielhafte Darstellung in Abbildung 24. Das dargestellte Wirkungsgrad-Kennfeld zeigt aktuell gemessene Wirkungsgrade in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl für einen Wasserstoffverbrennungsmotor basierend auf einem 7,8-l-Dieselmotor von Deutz. Es handelt sich bei der konkreten Konvertierung um ein ottomotorisches Magerkonzept mit niedrigen NO_x -Rohemissionen.

Bosch/TU Graz

Bosch veröffentlichte in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Graz einen Bericht über die Entwicklung eines Wasserstoffmotors [PAUER 2020]. Auch wenn die Zielapplikation PKW und leichtes Nutzfahrzeug war, kommen die in der Veröffentlichung dargestellten Kennfelder den Zielwerten für das schwere Nutzfahrzeug (effektiver Mitteldruck, NO_x -Emissionen bei Volllast) sehr nahe.

6.3 Wasserstoff im LKW

6.3.1 Einfluss der Wasserstoff-Tanksysteme

Auf den ersten Blick scheint es keinen großen Unterschied zu machen, über welches Tanksystem der Wasserstoff für H_2 -Motor und -BZ im Fahrzeug bereitgestellt wird. Einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Antriebsstrangwirkungsgrad hat jedoch das Druckniveau zwischen Tank und H_2 -Motor bzw. H_2 -BZ. Dieses Zwischendruckniveau liegt zwischen 12 und 15 bar bei der H_2 -BZ, bei ca. 25 bis 30 bar für den H_2 -Motor bei LP-DI (Niederdruck-Direkteinbläsung) und bei über 250 bar für HP-DI (Hochdruck-Direkteinbläsung).

Folgende H_2 -Tanksysteme stehen zur Diskussion: gasförmig unter Druck (CGH_2) bei 350 bar oder 700 bar, Flüssigwasserstoff (LH_2) und tiefkalter, kryogener Wasserstoff (CCH_2). CGH_2 bei 350 bar ist derzeit üblich für Busse und erste LKW-Anwendungen im Regionalverkehr. CGH_2 bei 700 bar ist der De-facto-Standard für BZ-PKW, daher arbeiten die meisten H_2 -Tankstellen in Europa mit diesem Druckniveau. Die Betankungsprotokolle für 350 und 700 bar sind definiert in der SAE-J2601-Reihe. Flüssigwasserstoff-Tanks (LH_2) bei Niederdruck (um etwa 5 bar) wurden bereits um die 2000er-Jahre von Linde entwickelt und als Tanksystem in Fahrzeugen unter anderem für den 7er-BMW mit H_2 -Motor eingesetzt. Die benötigte hochwirksame thermische Isolierung bei LH_2 -Fahrzeuggtanks ist nach wie vor eine große Herausforderung. Gerade kleinere LH_2 -Tanksysteme (für PKW mit

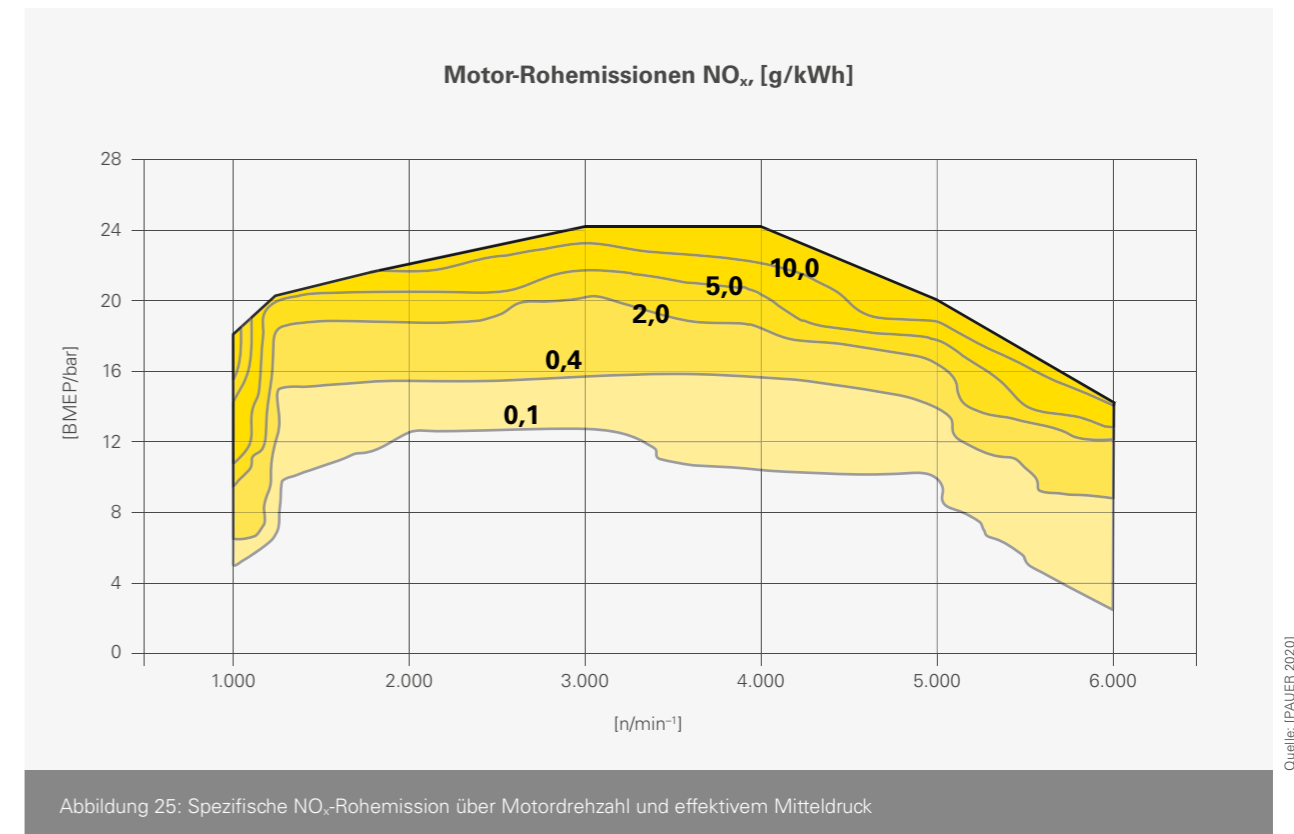


Abbildung 25: Spezifische NO_x -Rohemission über Motordrehzahl und effektivem Mitteldruck

Quelle: [PAUER 2020]

etwa 5 kg H_2) mit einem ungünstigen Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen zeigen Boil-off-Verluste durch den Wärmeeintrag aus der Umgebung bei längeren Standzeiten des Fahrzeugs. Durch kontinuierliche H_2 -Entnahme, optimierte Isolierung und eine geringere Oberfläche im Vergleich zum Volumen können Boil-off-Verluste minimiert werden. Eine noch höhere Energiedichte als LH_2 -Speicher erreicht eine Kombination aus tiefkalt und hohem Druck im kryogenen Druckspeicher (CCH_2). Diese Technologie bietet nach dem Phasendiagramm von Wasserstoff die höchste Speicherdichte und wurde von BMW und Linde entwickelt und erprobt. Da für die Verflüssigung von Wasserstoff beim heutigen Stand der Technik etwa 30 % des H_2 -Energieinhalts aufgewendet werden müssen, sind die Kosten für die LH_2 -Technologie in der Kraftstoff-Bereitstellung zu beachten. Zukünftig könnte der Energiebedarf für die Verflüssigung bei 20 % und darunter liegen. Inwieweit hier das von Daimler gemeinsam mit Linde neu entwickelte Betankungsverfahren für flüssigen Wasserstoff (Subcooled Liquid Hydrogen, sLH_2 -Technologie) einen technologischen und ökonomischen Vorteil bieten kann, wird sich erst durch die Erprobung belegen lassen.

Bei einer H_2 -BZ ist der Netto-Systemwirkungsgrad in Kombination mit einem LH_2 -Tank etwa einen Prozentpunkt geringer als bei CGH_2 mit 700 bar. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass sowohl bei 350 also auch bei 700 bar mit einer passiven Anoden-Rezyklierung gearbeitet werden kann, während beim LH_2 -Tank eine aktive Anoden-Rezyklierung mit ARB unabdingbar ist und damit ein zusätzlicher elektrischer (Hochvolt-) Verbraucher berücksichtigt werden muss.

Beim H_2 -Motor ist das Druckniveau aus dem Tank in Bezug zu dem Einblasedruck zu berücksichtigen. Bei LP-DI ist lediglich eine geringe Druckerhöhung, beim LH_2 -Tank und im Falle eines CGH_2 -Tanks mit 700 bar gar keine Druckerhöhung erforderlich. Bei LP-DI kann daher davon ausgegangen werden, dass das Wasserstoff-Tanksystem keinen wesentlichen Einfluss auf den Antriebsstrangwirkungsgrad hat.

Weiter ist beim H_2 -Motor mit HP-DI ist davon auszugehen, dass die ständig benötigte Hochdruckverdichtung von H_2 (z. B. durch eine Kryopumpe) bei Verwendung von einem LH_2 -Tanksystem einen Einfluss auf den Antriebsstrangwirkungsgrad haben wird. Bei 350 bar oder 700 bar muss je

nach tatsächlichem Tankdruck unterhalb ca. 300 bar zusätzlich (thermodynamisch) verdichtet werden. Damit ergibt sich dann auch ein Einfluss auf den Antriebsstrangwirkungsgrad, sobald der Tank ein bestimmtes Druckniveau unterschreitet. Die Verdichtung des flüssigen Wasserstoffs ist mit wenigen Verlusten verbunden, muss aber während des gesamten Motorbetriebs erfolgen. Eine Verdichtung des gasförmigen Wasserstoffs ist mit thermodynamischen Verlusten verbunden, erfolgt allerdings erst, wenn der Tankdruck unter den Einblasedruck fällt. Am Ende ist der Wirkungsgradeinfluss für beide H₂-Tankssysteme (700 bar und LH₂) gleich hoch und liegt bei gut einem Prozentpunkt des effektiven Wirkungsgrades des Wasserstoffmotors.

Beispiel Hochdruckverdichtung in Kombination mit 700-bar-Tank

Berücksichtigt man einen Einblasedruck von 300 bar sowie eine idealisierte lineare Abhängigkeit von Kompressorarbeit und aktuellem Tankdruckniveau, so ergibt sich die in Abbildung 26 dargestellte Abhängigkeit von effektivem Motorwir-

kungsgrad und aktuellem Tankdruck. Sinkt der Tankdruck unter 300 bar, so verliert der Wasserstoffmotor aufgrund der nötigen Kompression des Kraftstoffs an Effizienz. Im Mittel ergibt sich ein Verlust von etwas unter einem Prozentpunkt des effektiven Wirkungsgrades. Wird der Tank nicht vollständig entleert und früh nachgetankt, ist der Verlust geringer.

Beispiel Kryopumpe in Kombination mit LH₂-Tank

Derzeit gibt es noch keine H₂-Kryopumpen für den Serieinsatz in mobile Applikationen, allerdings wird eine ähnliche Technologie bei Nutzfahrzeugen mit Erdgas-Hochdruckeinblasung verwendet. Um das Erdgas auf effiziente Weise auf 300 bar zu komprimieren, befindet sich eine lineare Kryogenpumpe direkt im LNG (flüssiges Erdgas) Tank verbaut (Abbildung 27). Die Kryogenpumpe wird über einen Hydraulikkreislauf vom Erdgasmotor angetrieben. Die Antriebsleistung reduziert im Mittel den effektiven Wirkungsgrad des Erdgasmotors um etwas weniger als einen Prozentpunkt.



Quelle: IWFSINC 2021

Abbildung 27: Westport-HP-DI-System.

Für die Erdgas-Hochdruckversorgung sorgt eine LNG-Pumpe, die im LNG-Tank integriert ist

6.3.2 Benötigte Wasserstoff-Reinheit

Beim Wasserstoffmotor spielt die Reinheit oder Qualität des Wasserstoffs und der Luft eine eher untergeordnete Rolle. In diesem Punkt ist der Wasserstoffmotor im Vorteil gegenüber der Brennstoffzelle.

Die in dieser Studie berücksichtigte BZ-Technologie für schwere Nutzfahrzeuge (und PKW) ist die NT-PEM-BZ (siehe oben). Diese BZ-Technologie benötigt Edelmetall-Katalysatoren, damit die elektrochemische Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff bei niedrigen Arbeitstemperaturen um 80 °C abläuft. Die genannten Katalysatoren können durch eine Vielzahl unterschiedlicher Verunreinigungen im Wasserstoff reversibel oder irreversibel vergiftet werden. Dies äußert sich einerseits in einem Leistungsverlust, andererseits in höherer Katalysator-Alterung und damit Leistungsverlust über die Betriebszeit der Brennstoffzelle.

Die für BZ-Anwendungen erforderlichen Wasserstoff-Spezifikationen sind in internationalen Normen definiert, z. B. in

- EN 17124:2018: Wasserstoff als Kraftstoff – Produktfestlegung und Qualitätssicherung – Protonenaustauschmembran(PEM)-Brennstoffzellenanwendungen für Straßenfahrzeuge
- ISO 14687-2: Hydrogen fuel – Product specification – Part 2: Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles
- ISO/DIS 19880-8: Gaseous hydrogen – Fueling stations – Part 8: Fuel quality control

Die Effekte möglicher Verunreinigungen sind insbesondere in der ISO 19880-8 gut beschrieben.

Die große Herausforderung in Bezug auf mögliche Verunreinigungen besteht darin, dass die in den existierenden Normen gelisteten, bekannten Verunreinigungen unvollständig sind. Das bedeutet, dass es bekannte Verunreinigungen gibt, die in keiner der geltenden Normen aufgeführt sind, wie zum Beispiel ionische Flüssigkeiten. Schlussendlich bedeutet dies, dass auch eine den Normen entsprechende Wasserstoffqualität nicht automatisch für BZ geeignet sein muss.

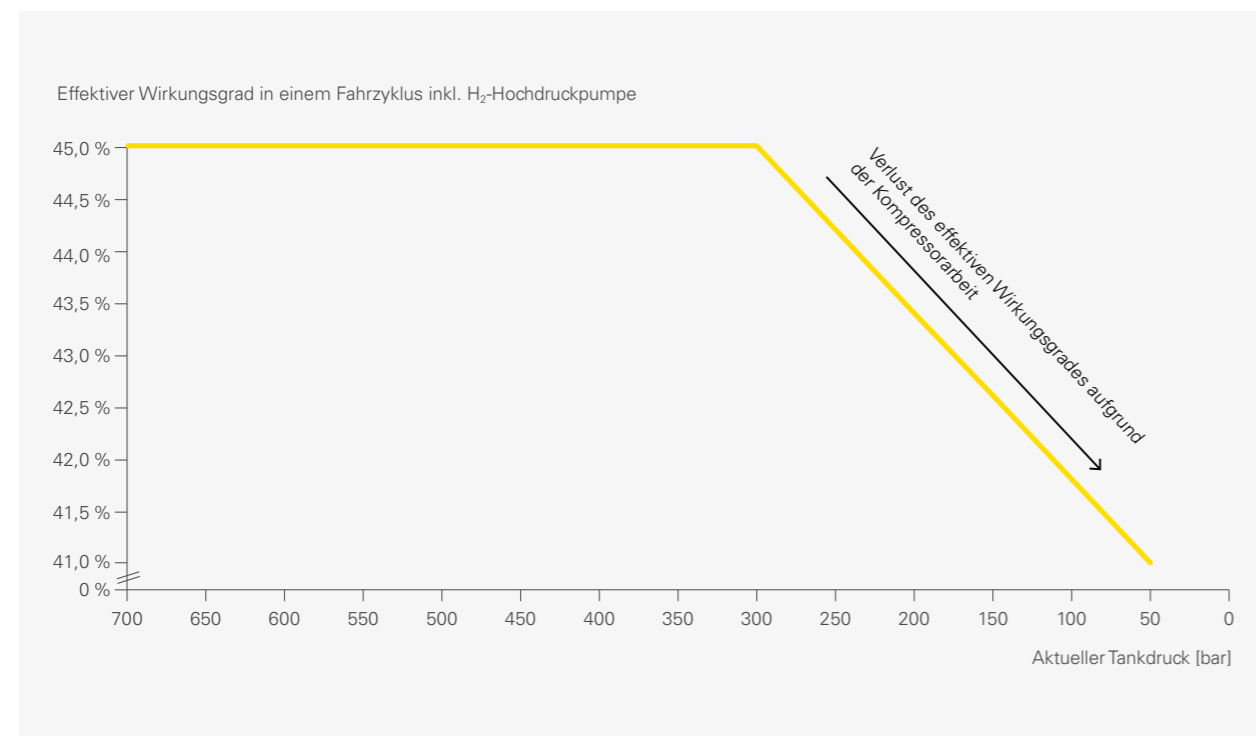
Wesentlichen Einfluss auf die Wasserstoffqualität haben der Herstellungsprozess selbst, die nachgeschaltete Aufreinigung und die Materialien, mit denen der Wasserstoff im Verdichter- oder Verflüssigungsprozess und beim Transport in Kontakt kommen kann.

Insbesondere bei der Elektrolyse von Wasser sind die meisten der bekannten Verunreinigungen per se nicht im Wasserstoff enthalten. Sofern dann bei allen nachgeschalteten Prozessen keine nachträgliche Kontamination erfolgt, kann man davon ausgehen, dass grüner Wasserstoff für NT-PEM-BZ-Anwendungen geeignet ist.

Die angestrebte lange Lebensdauer in der BZ-Anwendung für schwere Nutzfahrzeuge erfordert dennoch eine sorgfältige Beachtung der Wasserstoff-Qualität.

Mehrere der Experten, mit denen wir unsere Telefoninterviews durchgeführt haben, gehen davon aus, dass die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Reinheit von Wasserstoff keinen wesentlichen Einfluss auf die Kosten von Wasserstoff haben wird.

Es ist allerdings nicht davon auszugehen, dass zwei separate, parallele Wasserstoff-Infrastrukturen mit unterschiedlichen Wasserstoff-Qualitäten errichtet werden. Dies wäre mit höheren Kosten verbunden, als generell eine einheitliche für BZ-Anwendung geeignete Wasserstoff-Qualität zu vertanken.



Quelle: AVL

Abbildung 26: Effektiver Wirkungsgrad eines H₂-HP-DI-Wasserstoffmotors in Abhängigkeit vom aktuellen Tankdruck unter Berücksichtigung der Kompressorarbeit



07

**Vergleich der beiden
Antriebsformen für den schweren
Fernverkehrs-LKW**

07

Vergleich der beiden Antriebsformen für den schweren Fernverkehrs-LKW

Im Folgenden werden die beiden betrachteten Wasserstoffantriebe für das Fernverkehrsfahrzeug hinsichtlich der definierten ökonomischen und technischen Kriterien analysiert. Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich im Rahmen einer TCO-Betrachtung sind die wesentlichen Annahmen explizit dargestellt, um eine transparent nachvollziehbare Darstellung zu gewährleisten und gleichzeitig auch Vergleiche mit anderen Rechnungen zu ermöglichen. Die vergleichende Bewertung hinsichtlich technischer Kriterien ist hierbei im Sinne der Übersichtlichkeit in einzelne Unterkapitel gegliedert.

7.1 Ökonomischer Vergleich anhand von TCO-Rechnungen

Die TCO bilden die Gesamtnutzungskosten eines Fahrzeugs über den gesamten Nutzungszeitraum ab und erlauben somit einen Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen den betrachteten Alternativen. Sie stellen, vereinfacht ausgedrückt, die Summe aus den Anschaffungskosten und den jährlich anfallenden Kosten über die gesamte Nutzungsdauer dar. In den nachfolgenden Abschnitten werden zunächst die für die TCO getroffenen Annahmen genauer erläutert, bevor abschließend die Ergebnisse der Vergleichsrechnung dargestellt werden.

7.1.1 Grundlegende Fragestellung im Rahmen der TCO

Die Total Cost of Ownership wurden für beide Antriebsformen anhand der genannten Eingabeparameter und auf Basis der gängigen Berechnungsmethodik ermittelt. Mithilfe dieser Kostenbetrachtung sollen dabei insbesondere folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Welche der beiden Antriebsstrangvarianten ist für ein schweres Nutzfahrzeug im Fernverkehr die über den Gesamtnutzungszeitraum kostengünstigere Lösung?

2. Wie fällt der Kostenvergleich der Alternativen im Vergleich mit dem konventionellen Dieselantrieb aus?

Zitate von Interviewteilnehmern:

... *Wirtschaftlich tragfähiges Konzept ist Pflicht ...*

... *Alle Mehrkosten sind zu vermeiden. Ein PKW ist privates Vergnügen, ein LKW wird einzig gekauft, um damit Geld zu verdienen ...*

Die zweite Fragestellung zielt insbesondere darauf ab, ein besseres Verständnis für eine mögliche Nachfrageentwicklung nach den beiden Alternativen zu bekommen und die Ergebnisse im Kontext der Kostensituation konventioneller Dieselantriebe besser einordnen zu können. Für den Fall, dass die Wasserstoffalternativen kostenseitig gleichwertig oder günstiger als der konventionelle Dieselantrieb sind, ist von einer hohen Nachfrage und einer damit einhergehenden raschen Industrialisierung zu rechnen, sofern die Wasserstofftankinfrastruktur parallel entwickelt wird und eine für die Logistikunternehmen ausreichende Abdeckung erreicht. Sollte die Kostenparität zum konventionellen Diesel dagegen nicht erreicht werden, besteht die Gefahr, dass die Industrialisierung und die damit verbundene Kostenreduktion der Wasserstoffkomponenten erst deutlich verzögert oder gar nicht stattfindet.

7.1.2 Betrachtungszeit

Die beiden oben angeführten Fragestellungen bedingen eine Definition des jeweiligen Zeitrahmens, für den die Frage beantwortet werden soll, da viele der betrachteten Kostenbestandteile über die Zeit variieren. So können über die Zeit beispielsweise der Verbrauch im Rahmen von Effizienzverbesserungen oder auch die Anschaffungskosten aufgrund steigender Produktionsvolumina sinken. Um dies zu berücksichtigen, wurden zwei Zeitpunkte mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen definiert:

1. Ein früher Zeitpunkt stellvertretend für erste Markteinführungen

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... *Es gibt kaum käufliche Alternativen zum Diesel, insbesondere noch keine Brennstoffzellen und noch keinen Wasserstoffverbrennungsmotor ...*

Gemäß aktuellen Veröffentlichungen avisiert beispielsweise Iveco das Jahr 2023 für den Start von Brennstoffzellenfahrzeugen, Daimler das Jahr 2026 und MAN einen Zeitraum von 2023 bis 2024 für den Start einer ersten Testflotte. Unter Berücksichtigung der noch notwendigen Entwicklungen sowie Validierungen scheint ein solcher Zeitraum auch realistisch für H₂-Motoren mit Direkteinspritzung. Im weiteren Verlauf wird dieser Zeitpunkt mit dem Jahr „2025“ titulierte, wohl wissend, dass es eher ein Zeitraum denn ein fixer zeitlicher Bezugspunkt ist.

2. Ein späterer Zeitpunkt stellvertretend für hochindustrialisierte Lösungen

Auch hier gilt es, die unterschiedlichen Herausforderungen der beiden Antriebsvarianten zu berücksichtigen. Besonders für BZ liegt die Herausforderung überwiegend in der Industrialisierung, die sehr stark von der Nachfrage getrieben wird. Die gewählten Rahmenbedingungen für BZ unterstellen in etwa ein jährliches Produktionsvolumen von rund 50.000 Fahrzeugen oder mehr, vgl. [AVL Kundenprojekte, Department of Energy 2017, APCUK 2021]. Dasselbe gilt sinngemäß auch für H₂-Motoren, deren Kosten auch von der Nachfrage abhängig sind, die aber zum großen Teil auf bestehende Komponenten zurückgreifen. Der noch bedeutendere Punkt beim H₂-Motor ist sicherlich die zu erwartende Technologieentwicklung in Richtung Hochdruckdirekteinspritzung, die eine deutliche Verbrauchsreduktion mit sich bringen würde. Im weiteren Verlauf wird dieser Zeitpunkt mit dem Jahr „2030+“ bezeichnet.

Mögliche Zeitpunkte zwischen diesen beiden Extrema lassen sich in weiterer Folge interpolieren und wurden in dieser Studie nicht untersucht.

7.1.3 Betrachtete Fahrzeugvarianten

Die TCO-Berechnungen wurden für die verschiedenen, im vorherigen Kapitel aufgezeigten Varianten der beiden unter-

suchten Antriebsarten durchgeführt. Folgende Varianten wurden hierbei untersucht:

1. Brennstoffzelle mit unterschiedlichen Anschaffungskosten sowie Wirkungsgraden für folgende Variationen
 - „Überdimensioniertes“ BZ-System (300 kW)
 - Range-Extender-Konzept (150 kW)
2. Wasserstoffmotor mit den folgenden Variationen
 - 15 l Hubraum und Niederdruckeinspritzsystem (LP-DI)
 - 13 l Hubraum, LP-DI und Hochvolthybridsystem
 - 13 l Hubraum und Hochdruckeinspritzsystem (HP-DI)
 - 13 l Hubraum, HP-DI und Hochvolthybridsystem

Im Falle der Wasserstoffmotorvarianten mit LP-DI gibt es eine Variante mit größerem Hubraum, 15 Liter anstelle von 13 Litern. Der größere Motor ist eine Gegenmaßnahme zum schlechteren transienten Verhalten im Falle der Niederdruckeinspritzung, siehe auch Kapitel 6.2.5. Wenn LP-DI mit einem Hybridsystem kombiniert wird, dann würde das Hybridsystem das transiente Verhalten verbessern, der Hubraum muss in diesem Fall nicht erhöht werden.

Wasserstoffmotoren mit Plug-in-Hybridsystemen mit größeren Batteriekapazitäten und der damit verbundenen Möglichkeit, zumindest gewisse Wegstrecken rein elektrisch zu fahren, wurden aufgrund des typischen Einsatzes eines Fernverkehrsfahrzeugs nicht betrachtet, da es in der Regel keine bis wenig Stadteinfahrten durchführt, für die Plug-in-Systeme zielführend erscheinen.

7.1.4 Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten eines Fahrzeugs setzen sich aus den Anschaffungskosten für das Fahrzeugchassis (ohne Antriebsstrang) sowie den Anschaffungskosten der verschiedenen Antriebsstrangkomponenten wie Batterie (EUR/kWh mit Varianten), Brennstoffzellensystem (EUR/kWh mit Varianten), Tanksystem (mit Varianten), H₂-Eindosierung und H₂-Verdichter für H₂-Motor, E-Antrieb und Antriebsachse etc. zusammen. Im Rahmen der Studie wurden die Anschaffungskosten für die Fahrzeugvarianten mit der Brennstoffzelle und dem Wasserstoffmotor relativ zum konventionellen Dieselfahrzeug ermittelt. Berücksichtigt wurden hierbei die folgenden Änderungen im Vergleich zum Dieselfahrzeug:

- Batterie für den Brennstoffzellenantrieb
- Wasserstoffspeicher im Fahrzeug (für gasförmigen Wasserstoff mit 700 bar)
- Brennstoffzellensystem
- Elektrische Antriebsachse für Brennstoffzellenfahrzeuge (inkludiert Elektromotor, Leistungselektronik, Getriebe und Hinterachse)
- Wasserstoffeinspritzsystem für H₂-Motor
- Wasserstoffverdichter für H₂-Motor
- Hochvolthybridsystem für ausgewählte H₂-Motor-Betrachtungen
- Wegfall der konventionellen Antriebsstrangkomponenten im Falle der Brennstoffzelle (Motor, Getriebe und Achse)

Die Größe des Wasserstoffspeichers wurde in den Berechnungen variiert, d.h. jeweils der durchschnittlichen täglichen Reichweite von rund 520 km (116.000 km jährliche Laufleistung mit 245 Arbeitstagen und einer 10%igen Reserve) und dem jeweiligen Verbrauch angepasst. Eine Antriebsvariante mit einem geringeren Wasserstoffverbrauch hat dadurch auch einen kleineren Wasserstoffspeicher und hieraus resultierend einen geringeren Fahrzeugpreis. Für die verschiedenen Hubraumvarianten (13 vs. 15 Liter für den Zeitpunkt 2025) wurden keine unterschiedlichen Preise angesetzt.

Basierend auf den dargestellten Annahmen sowie unter Berücksichtigung der Bandbreiten für die Anschaffungskosten für Brennstoffzellensysteme, Wasserstoffspeicher oder Batterien ergeben sich, differenziert nach den verschiedenen Anschaffungszeitpunkten, die in Abbildung 28 dargestellten Fahrzeugpreise.

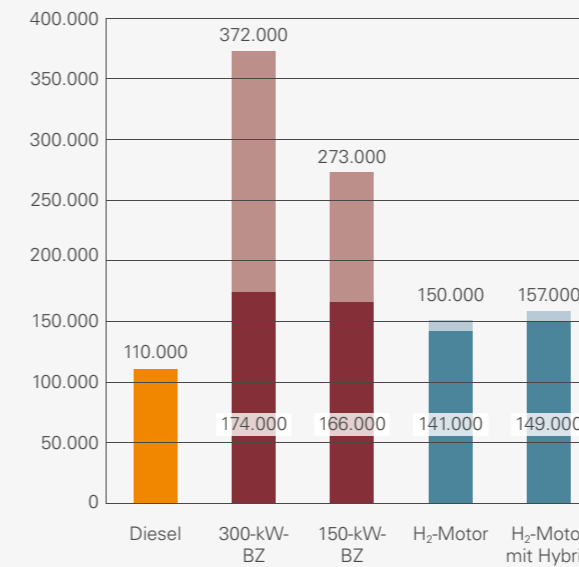
Die Annahmen für die Anschaffungskosten für die einzelnen Fahrzeugkomponenten sind in Tabelle 8 dokumentiert. Die Annahmen stammen im Wesentlichen aus AVL-Kundenprojekten und sind in guter Übereinstimmung mit allgemein zugänglichen Annahmen. Darüber hinaus wurden die einzelnen Annahmen auch in den durchgeführten Experteninterviews bestätigt.

Fahrzeugkomponente	Annahmen für Anschaffungskosten für die Jahre		
	2020 (als Vergleich)	2025	2030+
In EUR pro kW Leistung, Brennstoffzellensystem	1.000	130 bis 750	50 bis 100
In EUR pro kWh für Batterien als Teil von BZ-Fahrzeugen	220 bis 270	160 bis 190	110
In EUR pro kg Wasserstoff, gespeichert (CGH ₂ 700 bar)	1.000	650 bis 820	364
Für elektrische Achse (Elektromotor, Leistungselektronik, Getriebe, Achse)	20.000	14.000 bis 17.000	10.000
Zusätzliche Anschaffungskosten in EUR für H ₂ -Einspritzsystem, H ₂ -Verdichter (vom Tank zum H ₂ -Motor für Hochdruck) und Partikelfilter (2030+)	3.000 bis 5.000	3.000 bis 5.000	4.000 bis 6.000
In EUR für Hochvolthybridsystem (Elektromotor, Batterie)		10.000	
In EUR für Basisfahrzeug (Chassis) ohne Dieselmotor, Abgasnachbehandlung (Euro VIe) und 12-Gang-AMT		85.000	

Tabelle 8: Annahmen zur Definition der Anschaffungskosten

Quelle: AVL

Anschaffungspreise für Fahrzeuge in [EUR]
Jahr 2025



Jahr 2030+

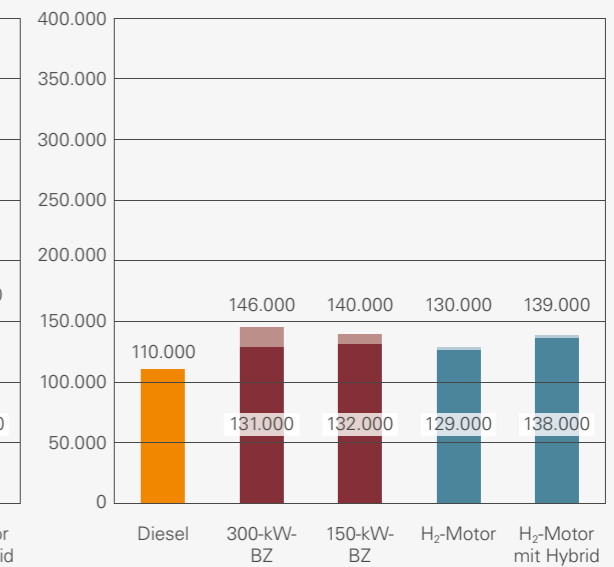


Abbildung 28: Fahrzeugpreise für die Jahre 2025 und 2030+ für unterschiedliche Varianten (die „dunkleren“ Farben stellen Minimumpreise dar, die „hellere“ Farben mögliche maximale Preise)

Quelle: AVL

Die Grafik zeigt deutlich die „Unsicherheit“ in Bezug auf Anschaffungskosten für Brennstoffzellenantriebe, aber auch eine recht homogene Einschätzung in einer längerfristigen Betrachtung. Die längerfristige Perspektive spiegelt hier eine weitreichende Industrialisierung der Brennstoffzelle wider, in [DOE 2019] wurden beispielsweise rund 60 EUR/kW Brennstoffzellenleistung für Nutzfahrzeugsysteme ermittelt bei rund 100.000 Systemen pro Jahr. Alle untersuchten Alternativen weisen zu beiden Betrachtungszeiten Anschaffungskosten über denen der konventionellen Dieselvariante auf, wobei die Unterschiede insbesondere bei den Varianten mit Brennstoffzellenantrieb im Zeitverlauf jedoch deutlich abnehmen.

Restwerte wurden für alle Antriebsvarianten auf null gesetzt, d.h. es erfolgt eine 100%ige Abschreibung der Fahrzeuge innerhalb der Haltedauer. Dies erfolgt abweichend von der heute üblichen Praxis der Logistikunternehmen, die mit einer durchschnittlichen Fahrzeughaltedauer von drei Jahren kalkulieren. Nach diesen drei Jahren wird das Fahrzeug zu einem Restwert in Zweitmärkte verkauft. Für die Wasserstoffvarianten erscheint diese Praxis aktuell nicht umsetzbar, da zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund fehlender Infrastrukturen für die

Wasserstoffversorgung keine Zweitmärkte für die Fahrzeuge existieren. Auch Restwerte lassen sich auf dieser Basis zum jetzigen Zeitpunkt nicht seriös bestimmen.

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Alternative Antriebe ermöglichen oder erfordern sogar eine neue TCO-Betrachtung ...

Selbst die hohe Ähnlichkeit des H₂-Motors zum konventionellen Dieselmotor führt in einer Restwertbetrachtung nicht zu Vorteilen für den H₂-Motor. Eine „Umrüstung“ vom H₂-Motor auf einen Dieselmotor, um bspw. den Wiederverkauf in Regionen ohne Wasserstoffinfrastruktur zu begünstigen, ist nicht ohne großen Aufwand machbar. Die wesentlichen Komponenten, die hier am Fahrzeug umgebaut werden müssten, sind das Tanksystem, das Einspritzsystem, der Zylinderkopf und weitere Komponenten wie Kolben, Motorsteuerung und Abgasnachbehandlung. Das heißt, eine solche Umrüstung ist mit erheblichem Aufwand verbunden und deswegen mit großer Wahrscheinlichkeit unter den derzeitigen Rahmenbedingungen nicht wirtschaftlich darstellbar.

7.1.5 Jährliche Betriebskosten

Die jährlichen Betriebskosten umfassen die jährlich im Rahmen der Fahrzeugnutzung anfallenden Kosten. Bei dieser Analyse wurden folgende Bestandteile berücksichtigt:

- Wasserstoff- bzw. Dieserverbrauch (in Liter bzw. Kilogramm multipliziert mit den Kosten der Energieträger)
- AdBlue-Verbrauch für Diesel- und Wasserstoffmotor (in Liter multipliziert mit den Kosten für AdBlue)
- Bereifung
- Maut
- Reparatur- und Wartungskosten
- Lohn für Fahrer
- Steuern und Versicherungen für Fahrzeug und transportierte Güter

Im Folgenden werden die Kostenarten weiter beschrieben, um Klarheit in Bezug auf die Inputfaktoren zu schaffen.

Diesel- und Wasserstoffverbrauch je Liter bzw. Kilogramm

Aufgrund des typischerweise hohen Anteils der Kraftstoffkosten an den Gesamtkosten wurden die Verbräuche für die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten mittels einer Längsdynamiksimulation simuliert. Dabei wurden für die unterschiedlichen Antriebsstrangkonzepete jeweils eigene Simulationsmodelle erstellt und mittels AVL Cruise™ M entlang eines definierten Fahrzyklus (siehe unten) berechnet.

Für die Simulation wurden hierbei dieselben Rahmenbedingungen verwendet, die auch für die CO₂-Emissionsberechnung in der EU mit Hilfe von VECTO gelten (siehe hierzu auch Abschnitt 5.1 und 5.3). Dabei wurden, basierend auf der Fahrzeuguntergruppe 5-LH, die definierten Fahrzyklen gewichtet und addiert. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Nutzlasten simuliert, um die tatsächlich vorherrschenden Fahrbedingungen möglichst präzise abbilden zu können. Insgesamt ergeben sich damit die folgenden vier Fahrprofile.

- Verteilverkehr (Regional Delivery), geringe Nutzlast (Low Load): RD-LL
- Verteilverkehr (Regional Delivery), repräsentative Nutzlast (Representative Load): RD-RL
- Fernverkehr (Long Haul), geringe Nutzlast (Low Load): LH-LL
- Fernverkehr (Long Haul), repräsentative Nutzlast (Representative Load): LH-RL

Die Vorgehensweise und die Rahmenbedingungen sind für alle untersuchten Antriebsvarianten identisch. Die Ergebnisse ermöglichen somit einen direkten Vergleich ohne die Notwendigkeit weiterer Umrechnungen. Eine graphische Darstellung der Zyklen für Verteil- und Fernverkehr kann Abbildung 29 und Abbildung 30 entnommen werden.

Für die selektierte Fahrzeuguntergruppe 5-LH, also die Fernverkehrsanwendung, ergibt sich gemäß [EU 2017/2400] eine bestimmte Zusammensetzung (Gewichtung) der jeweiligen Fahrprofile in Kombination mit einer bestimmten Nutzlast, dargestellt in Tabelle 9. Dabei dominiert der Fernverkehr (LH) mit den beiden Nutzlasten (LL und RL) mit insgesamt 90 %, während der Verteilverkehr (RD) lediglich mit insgesamt 10 % gewichtet wird.

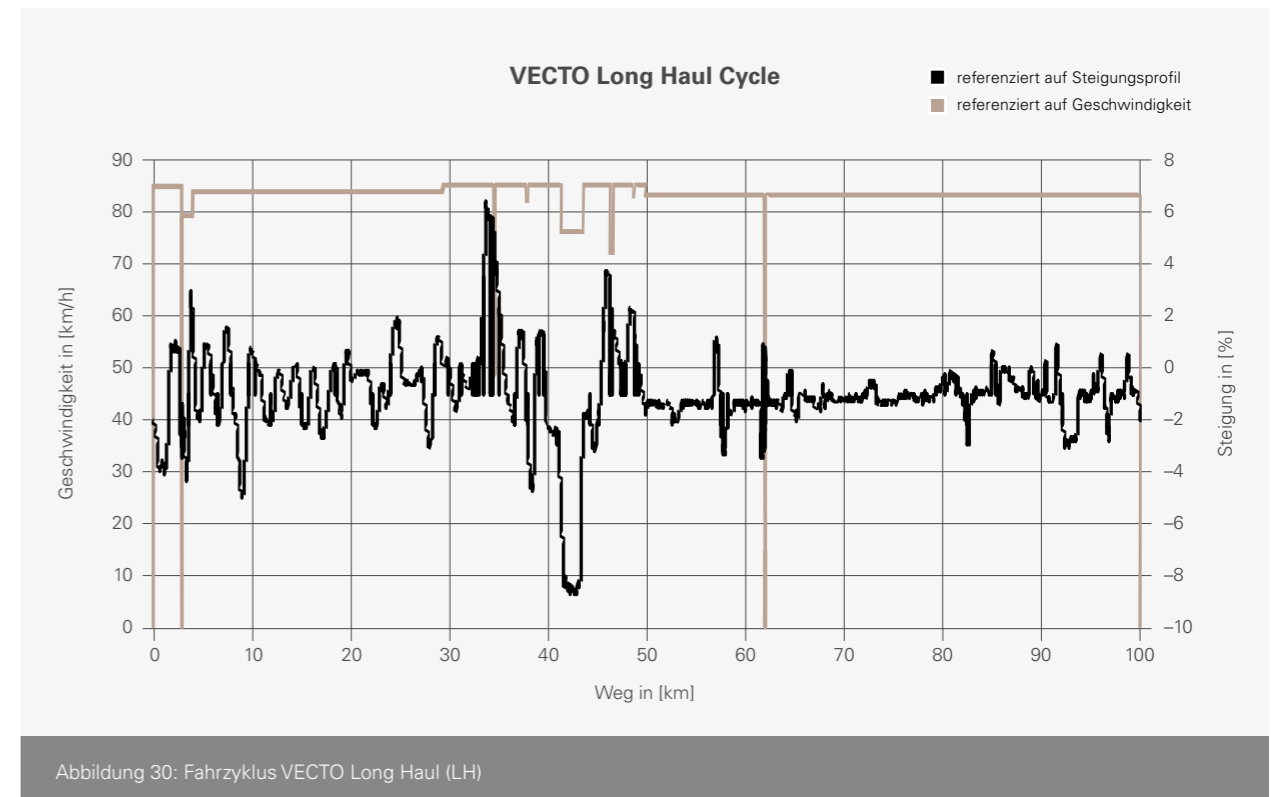
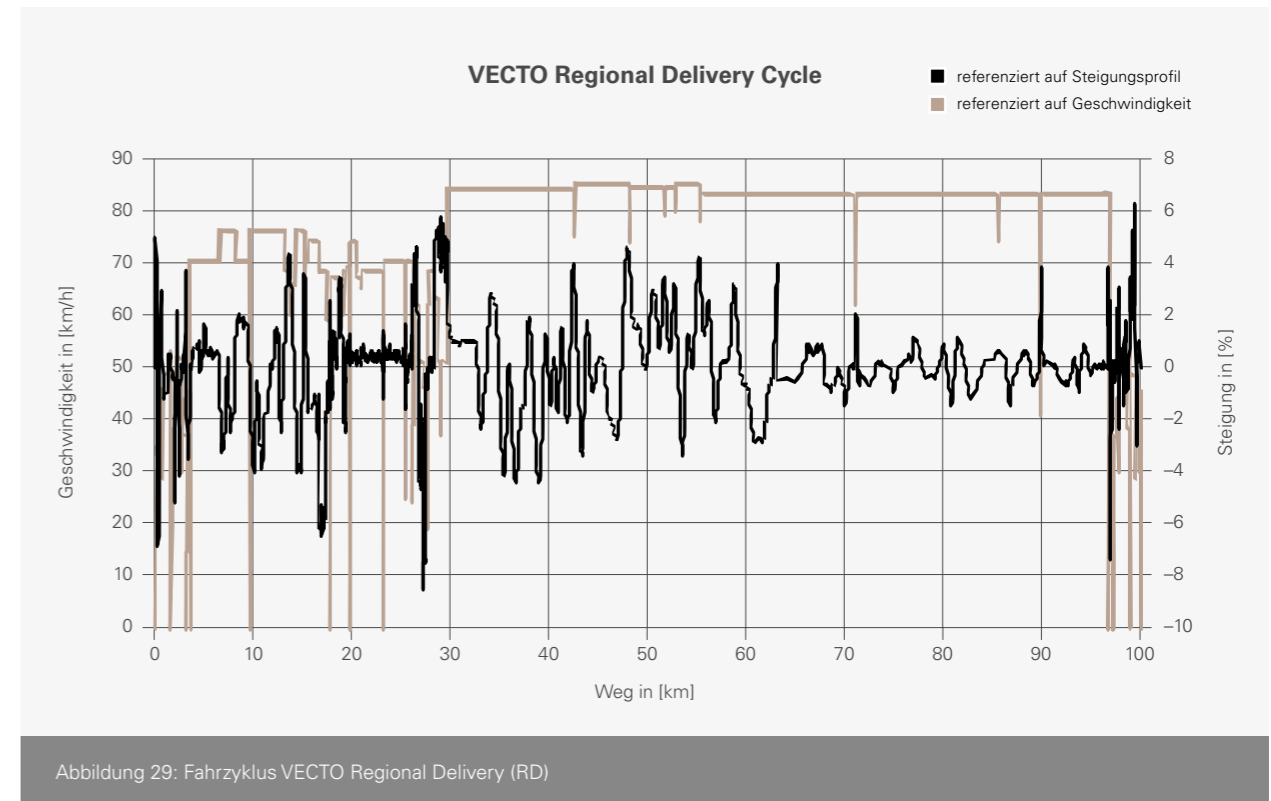
	RD-LL	RD-RL	LH-LL	LH-RL
Gewichtung, [%]	3	7	27	63
Nutzlast, [kg]	2.600	12.900	2.600	19.300

Quelle: [EU 2019/1242]

Tabelle 9: Gewichtung und Nutzlastfaktoren der vier Fahrprofile der Fahrzeuguntergruppe 5-LH

Basierend auf den in Tabelle 9 aufgezeigten Angaben für Gewichtung und Nutzlast ergibt sich eine Summierung des Kraftstoffverbrauchs (Fuel Consumption, FC) gemäß folgender Formel:

$$FC_{[5-LH]} = 0,03 \times FC_{[5-LH],RD-LL} + 0,07 \times FC_{[5-LH],RD-RL} + 0,27 \times FC_{[5-LH],LH-LL} + 0,63 \times FC_{[5-LH],LH-RL}$$



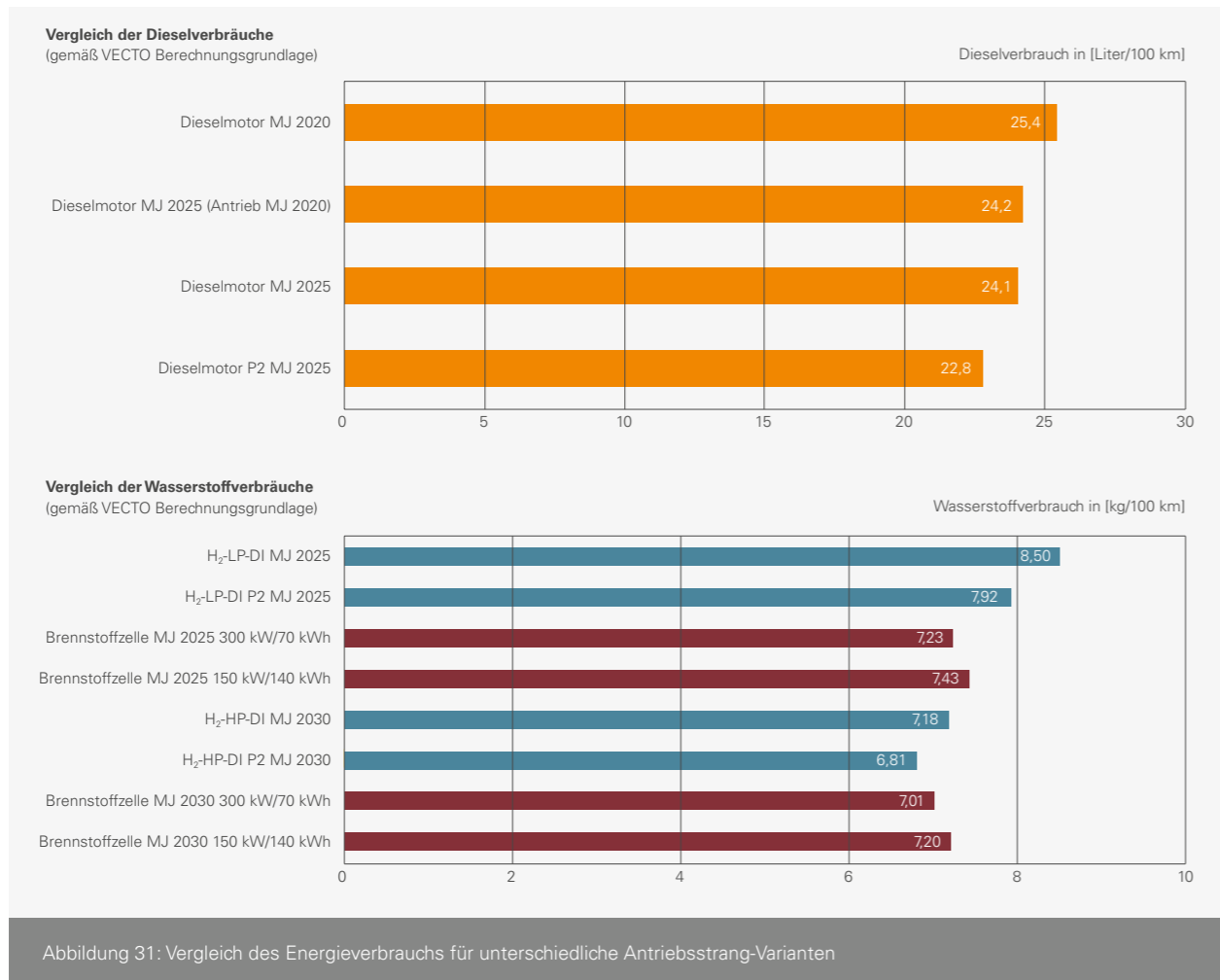


Abbildung 31: Vergleich des Energieverbrauchs für unterschiedliche Antriebsstrang-Varianten

Abbildung 31 zeigt die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Varianten. Die Varianten für 2025 wurden hierbei vollständig nach der aufgezeigten Methodik simuliert. Die Verbräuche für die Varianten im Jahr 2030 wurden anschließend, ausgehend von den Ergebnissen für das Jahr 2025, hochgerechnet. Dabei wurde beim BZ-Antriebsstrang für das Jahr 2030 eine Verbrauchsminderung von 3 % im Vergleich zu 2025 angenommen. Beim Wasserstoffmotor beträgt die angenommene Verbrauchsminderung etwa 15 % im Vergleich zu 2025. Details zu den angenommenen Wirkungsgradverbesserungen sind in Kapitel 6.1.8 für die Brennstoffzelle und in Kapitel 6.2.7 für den Wasserstoffmotor zu finden.

Diesel- und Wasserstoffpreise

Für die anzusetzenden Treibstoffkosten wurden verschiedene Szenarien berücksichtigt, um unterschiedliche Preisentwick-

lungen abbilden zu können. Im Hinblick auf den Wasserstoffpreis wurde für das Jahr 2025 ein mittlerer Preis von 7 EUR/kg unterstellt. Ausgehend hiervon erfolgt je nach unterstelltem Szenario eine lineare Reduktion auf 6 EUR/kg (high-case), 4,50 EUR/kg (mid-case) oder 3 EUR/kg (low-case) bis 2030. Für die Entwicklung des Dieselpreises wurden ebenfalls drei Szenarien berücksichtigt, die von einem konstanten Preis in Höhe von 1 EUR/Liter, 1,25 EUR/Liter bzw. 1,50 EUR/Liter ab 2025 ausgehen. Durch eine solche Variation kann auch ein zukünftiger CO₂-Aufschlag auf Dieselmotoren abgebildet werden.

Die Annahmen werden in Abbildung 32 veranschaulicht. Abbildung 33 zeigt die getroffenen Annahmen zusätzlich auf denselben Heizwert normiert, um einen direkten Vergleich zwischen den unterschiedlichen Treibstoffarten zu ermöglichen.

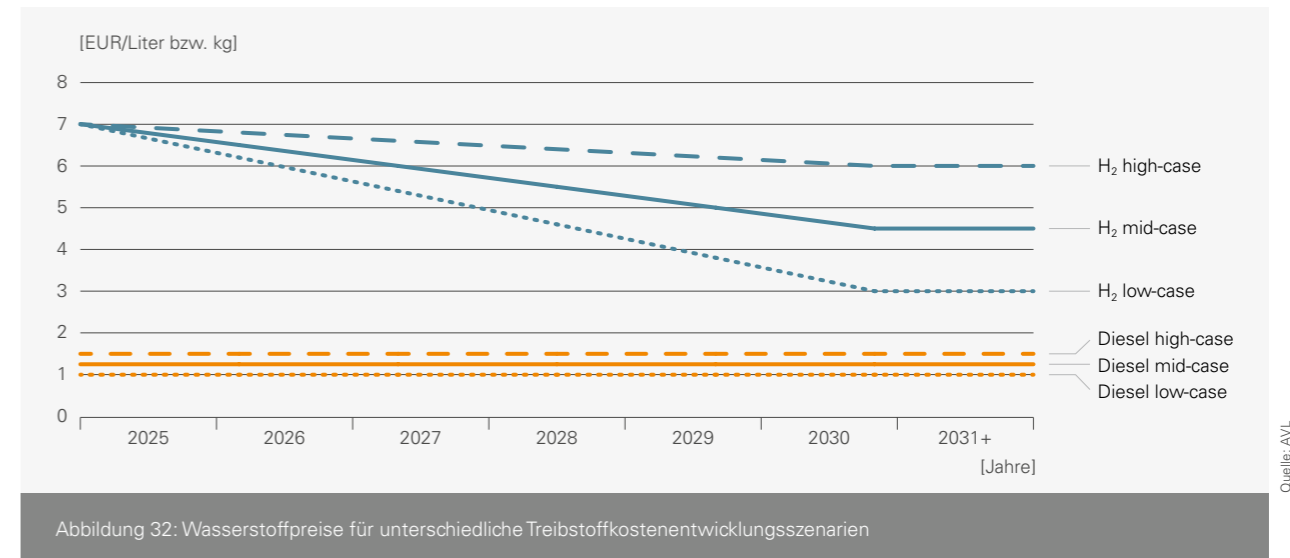


Abbildung 32: Wasserstoffpreise für unterschiedliche Treibstoffkostenentwicklungsszenarien

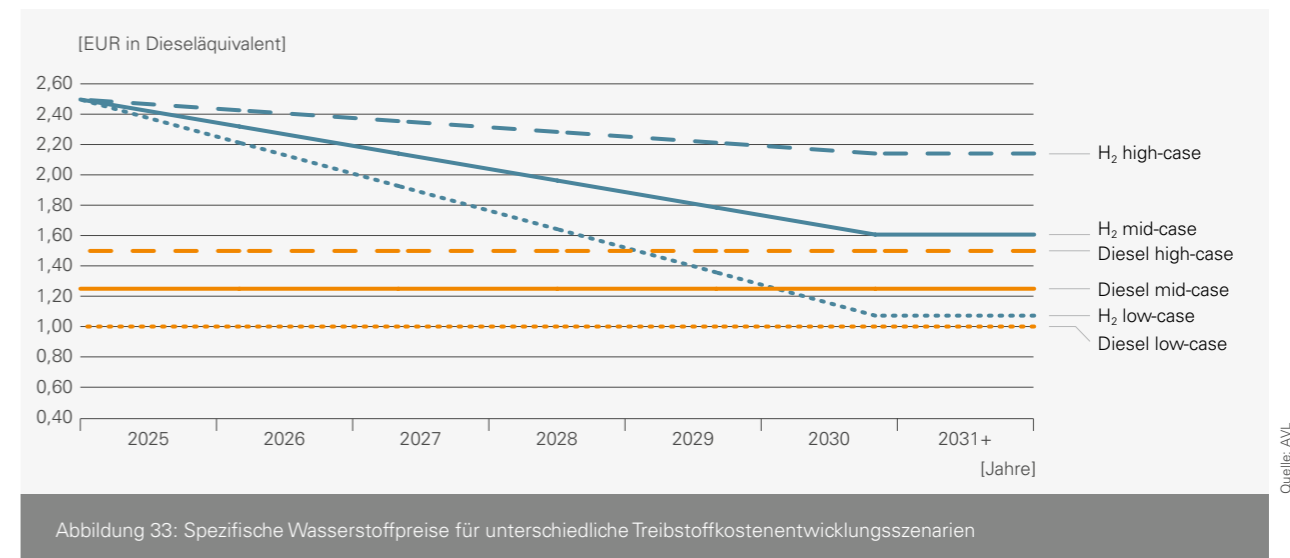


Abbildung 33: Spezifische Wasserstoffpreise für unterschiedliche Treibstoffkostenentwicklungsszenarien

AdBlue-Verbrauch in Liter und Kosten für AdBlue

Für Diesel- und H₂-Motor-Fahrzeuge wurde zusätzlich zum Treibstoff der Verbrauch von AdBlue berücksichtigt. Dieser liegt für Dieselfahrzeuge bei 5 % des Dieselvebrauchs. Bei einem Verbrauch von 24,2 Liter Diesel auf 100 km beläuft sich der AdBlue-Verbrauch demnach auf 1,2 Liter pro 100 km. Dieser absolute AdBlue-Verbrauch wurde auch für Fahrzeuge mit H₂-Motor berücksichtigt. Die Kosten für AdBlue wurden hierbei mit 0,25 EUR/Liter angesetzt, ein typischer Wert für Speditionen mit der Möglichkeit, große Mengen an AdBlue einzukaufen und zu lagern [LO 2016].

Bereifung

Für die Untersuchung der jährlichen Betriebskosten ist zusätzlich die Abnutzung der Reifen zu berücksichtigen. Diese wird für alle Fahrzeugvarianten mit 4,50 EUR für 100 km angesetzt. Dieser Wert wurde von [LO 2016] übernommen und stimmt gut mit früheren DEKRA-Berechnungen [LOK 2016] überein.

Maut

Für die Maut wurden aktuelle Mautsätze für Deutschland mit 0,173 EUR/km als Maßstab genommen. Für Dieselfahrzeuge wurde die Maut vollständig berücksichtigt, d.h. von der jährlichen Laufleistung mit 116.000 km wurden 90 % als mautpflichtig angesetzt (Vergleiche mit der Zykluszusammensetzung: 90 % Autobahnzyklus, 10 % Verteilzyklus). Das ergibt in Summe eine Maut von rund 18.000 EUR/Jahr. Die Mautgebühr wird hierbei über die Jahre konstant gehalten. Im Dezember 2020 haben sich die europäischen Verkehrsminister auf eine EU-weit einheitliche „Eurovignette“-Richtlinie geeinigt, die zukünftig die zu zahlende Maut an CO₂-Emissionen der Fahrzeuge koppelt und Begünstigungen für emissionsfreie Fahrzeuge vorsieht. Die Regelung, die 2023 in Kraft treten soll, sieht vor, dass emissionsfreie Fahrzeuge bis 2025 einen mindestens 50%igen Mautnachlass bekommen, wobei bis zu 100 % möglich sind. Nach 2025 kann der Nachlass 50 % bis 75 % ausmachen. An dieser Stelle sei jedoch auch erwähnt, dass es Länder mit deutlich höherer Maut gibt, wie beispielsweise die Schweiz, wodurch sich Maßnahmen wie eine Mautbefreiung für alternative Antriebe gegebenenfalls noch viel deutlicher auf die TCO-Ergebnisse auswirken können. Für H₂-Motor und BZ wurden die TCO mit verschiedenen Mautmodellen gerechnet (0, 25, 50, 75 und 100 %).

Reparatur- und Wartungskosten

Dieser Kostenblock beinhaltet Ausgaben für Reparaturen, Service, Instandhaltung, Prüfungskosten, Schmierstoffe/Öle, Reinigung, Kommunikation (zwischen Fahrer, Spedition, Kunden) sowie Ausfallkosten. Basierend auf [LO 2016] wurden diese Kosten für Dieselfahrzeuge auf jährlich rund 7.800 EUR errechnet. Die Kosten für die Wasserstoffalternativen wurden geschätzt, siehe Tabelle 10.

Für die Varianten des H₂-Motors mit Hybrid wurden dieselben Reparatur- und Wartungskosten berücksichtigt wie für die Antriebe ohne Hybrid. Es kann zwar davon ausgegangen werden, dass bestimmte Komponenten, wie beispielsweise Bremsen, deutlich weniger verschleifen. Andererseits ist die Prüfung und Wartung des zusätzlichen Hybridsystems zu berücksichtigen. Auch in PKW-Anwendungen ist das Bild in dieser Hinsicht nicht eindeutig.

Lohn für Fahrer

Für den Fahrer wurden, unabhängig von der Antriebsart, 47.500 EUR/Jahr angesetzt.

Antriebsart	Anmerkungen	Jährliche Reparatur- und Wartungskosten in [EUR]
Konventioneller Dieselantrieb	Siehe [LO 2016]	7.800
Batterie-elektrischer Antrieb	Basierend auf Erfahrungen im PKW und daraus resultierenden Erwartungen für Nutzfahrzeuge (z. B. geringerer Bremsenschleiß, weniger bewegte Teile, geringere Komplexität) [AVL-Kundenprojekte]	5.200 (1/3 geringer als beim konventionellen Dieselantrieb)
BZ-Antrieb	In der Größenordnung wie ein batterieelektrischer Antrieb (größtenteils derselbe Antriebsstrang); typische Wartungsteile sind diverse Filter sowie Kühlfüssigkeit) [AVL-Kundenprojekte]	5.500 (+5 % der Kosten für batterieelektrische Antriebe)
H ₂ -Motor LP-DI	Vergleichbare Größenordnung wie beim konventionellen Dieselantrieb [AVL-Kundenprojekte]	7.800
H ₂ -Motor HP-DI	Etwas höherer Aufwand aufgrund der notwendigen Wartung des Hochdrucksystems inkl. Verdichter zwischen Tank und Einspritzsystem [AVL Kundenprojekte]	8.400

Quelle siehe Text in der Tabelle

Tabelle 10: Ausgaben für Reparaturen, Service, Instandhaltung, Prüfungskosten, Schmierstoffe/Öle, Reinigung, Kommunikation (zwischen Fahrer, Spedition, Kunden ...) sowie Ausfallkosten

Steuern und Versicherungen für Fahrzeuge und transportierte Güter

Für Steuern und Versicherungen wurden rund 5.500 EUR/Jahr veranschlagt. Der Betrag setzt sich zusammen aus rund 400 EUR/Monat für eine Vollkaskoversicherung (Internetangebot einer bekannten Versicherung) sowie der Kfz-Steuer von 556 EUR/Jahr.

7.1.6 Ergebnisse der TCO-Rechnungen

Unter Berücksichtigung der verschiedenen Parameter und deren Kombinationsmöglichkeiten wurden mit Hilfe eines excelbasierten Modells mehr als 400 TCO-Varianten berechnet. Das Modell wurde bereits für verschiedene andere Rechnungen angewandt und im Vorfeld mit bestehenden TCO-Rechnungen von DEKRA validiert [LOK 2016].

Nachfolgend werden die TCO-Ergebnisse für die unterschiedlichen Varianten der beiden untersuchten Antriebsformen miteinander verglichen, wobei die unterschiedlichen Randbedingungen bezüglich Anschaffungsjahr, Haltedauer und Kosten variiert werden. Abschließend erfolgt zudem eine Darstellung der TCO für einen konventionellen Dieselantrieb, um die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Alternativen mit diesem vergleichen zu können.

7.1.6.1 TCO-Vergleich mit Bezugsjahr 2025 und einer Haltedauer von fünf Jahren

Im Folgenden sollen zunächst die TCO-Ergebnisse bei einer Fahrzeuganschaffung zum aus heutiger Sicht frühestmöglichsten

Zeitpunkt	Fahrzeug-haltedauer	Szenario Wasserstoffpreis	300-kW-BZ TCO in [EUR]	150-kW-BZ TCO in [EUR]	Niederdruck-H ₂ -Motor ohne Hybrid TCO in [EUR]	Niederdruck-H ₂ -Motor mit Hybrid TCO in [EUR]
2025	5 Jahre	H ₂ low-case	718.297 bis 915.849	716.935 bis 823.771	737.940 bis 745.761	727.821 bis 735.108
2025	5 Jahre	H ₂ mid-case	743.458 bis 941.010	742.791 bis 849.627	767.520 bis 775.341	755.383 bis 762.670
2025	5 Jahre	H ₂ high-case	768.618 bis 966.170	768.648 bis 875.484	797.100 bis 804.921	782.944 bis 790.231

Quelle: AVL

Tabelle 11: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2025

chen Zeitpunkt im Jahr 2025 sowie bei einer Haltedauer von fünf Jahren dargestellt werden. Die Haltedauer entspricht hierbei in etwa der heutigen Nutzung. Bei einer solchen Haltedauer sollte ein positiver ROI (Return on Investment) innerhalb der ersten beiden Jahre erreicht werden, d.h. dank geringerer Betriebskosten führen Investitionen mit höheren Anschaffungskosten zu niedrigeren Gesamtkosten innerhalb des betrachteten Zeitraums. Ansonsten ist das Risiko, in eine Technologie zu investieren, die sich unter Umständen nicht innerhalb der Haltedauer amortisiert, für die Spediteure zu groß.

Basierend auf den dargestellten Annahmen ergeben sich in Abhängigkeit von unterschiedlichen Wasserstoffpreisszenarien die in Tabelle 11 dargestellten TCO-Bandbreiten für die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten. Für alle dargestellten Varianten wurde eine vollständige Mautbefreiung angenommen.

Die in Tabelle 11 aufgezeigten Werte werden in Abbildung 34 graphisch veranschaulicht. Die Ergebnisse zeigen insbesondere bei der Brennstoffzelle eine hohe TCO-Spannbreite, welche durch die hohe Unsicherheit bezüglich der Anschaffungskosten im Jahr 2025 bedingt ist. Im ungünstigsten Fall liegen die TCO nach fünf Jahren somit je nach Variante des BZ-Fahrzeugs um ca. 180.000 EUR bzw. 89.000 EUR über den TCO der günstigsten Variante mit H₂-Motor. Im günstigsten Fall hingegen liegen die TCO beider BZ-Varianten knapp unterhalb der TCO der günstigsten H₂-Motor-Variante.

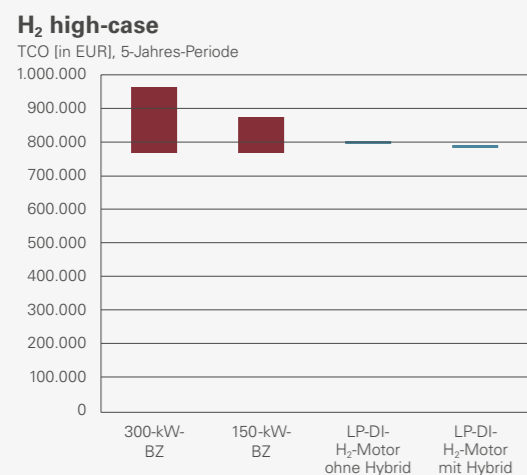
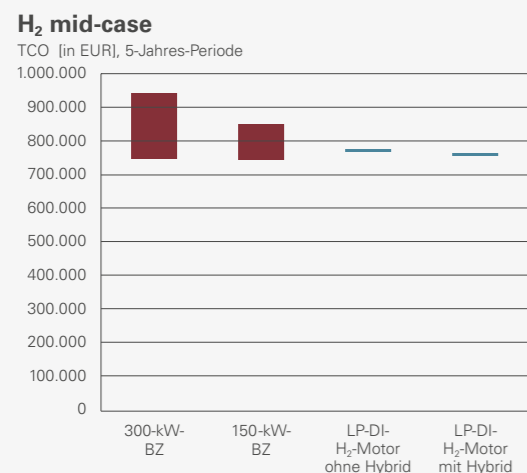
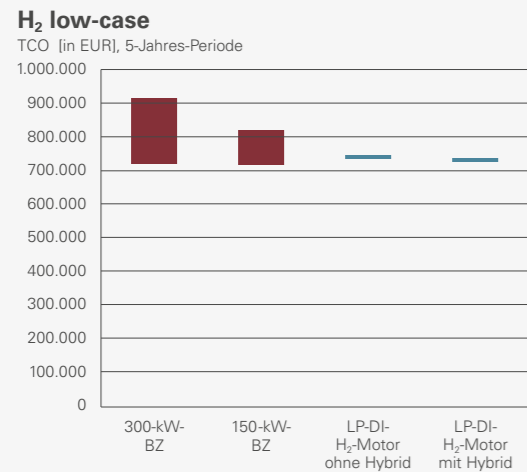


Abbildung 34: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2025

Quelle: AVL

Im Hinblick auf die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten weist beim H₂-Motor der Niederdruck-H₂-Motor mit Hybrid leichte TCO-Vorteile gegenüber der Variante ohne Hybrid auf. Die Unterschiede sind im Hinblick auf die Größenordnung der gesamten TCO über fünf Jahre allerdings gering. Bei Betrachtung der BZ-Varianten zeigt sich, dass für das Betrachtungsjahr 2025 die Range-Extender-Variante (150 kW), die über eine geringere Brennstoffzellenleistung, aber dafür eine höhere Batteriekapazität verfügt, die aus TCO-Sicht sinnvollere BZ-Variante darstellt. Dies begründet sich aus den voraussichtlich noch hohen Brennstoffzellenkosten in der Anfangsphase der Industrialisierung der BZ-Fertigung.

Die dargestellten Werte beziehen sich hierbei auf eine Mautbefreiung von 100 % für beide Wasserstoffalternativen. Sollte der H₂-Motor nicht mautbefreit sein, würde sich die TCO für diese Alternative um bis zu ca. 18.000 EUR pro Jahr (bei 100%iger Mautanrechnung) erhöhen, was über die Haltedauer von fünf Jahren etwa 90.000 EUR entspräche.

Abbildung 35 zeigt die TCO-Entwicklung für die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten über die ersten drei Jahre im mittleren Wasserstoffszenario sowie die Grenze für den ROI. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass in einigen Fällen die BZ-Varianten bereits innerhalb der ersten zwei Jahre einen positiven ROI im Vergleich zu den H₂-Motor-Varianten erreichen. Dies ist beispielsweise bei der Kombination des Best Case 150-kW-BZ im Vergleich zum H₂-Motor ohne Hybrid im Worst Case der Fall. In beiden Fällen handelt es sich um BZ-Varianten mit einem Preis von 130 EUR pro kW Brennstoffzellenleistung, d. h. am untersten Ende der Annahmen für das Jahr 2025. Die Berechnungen mit höheren BZ-Preisen ab 300 EUR pro kW Brennstoffzellenleistung führen zu einem ROI in deutlich über drei Jahren.

Basierend auf einer Haltedauer von fünf Jahren und einem Anschaffungszeitpunkt um das Jahr 2025 gibt es im direkten Vergleich eher Vorteile für den H₂-Motor. Dieser weist typischerweise einen besseren ROI innerhalb eines 2-Jahres-Fensters sowie in der Regel niedrigere TCO am Ende der 5-Jahres-Periode auf. BZ-Antriebe haben zwar das Potenzial zur Erreichung niedrigerer TCO im Vergleich zum H₂-Motor, können diese aber nur unter bestmöglichen Entwicklungen der Brennstoffzellenkosten realisieren. Insgesamt sind die tatsächlichen Anschaffungskosten der Brennstoffzellenalternativen bei einer Anschaffung im Jahr 2025 noch von hoher Unsicherheit geprägt und resultieren diesbezüglich in einer hohen Schwankungsbreite der TCO.

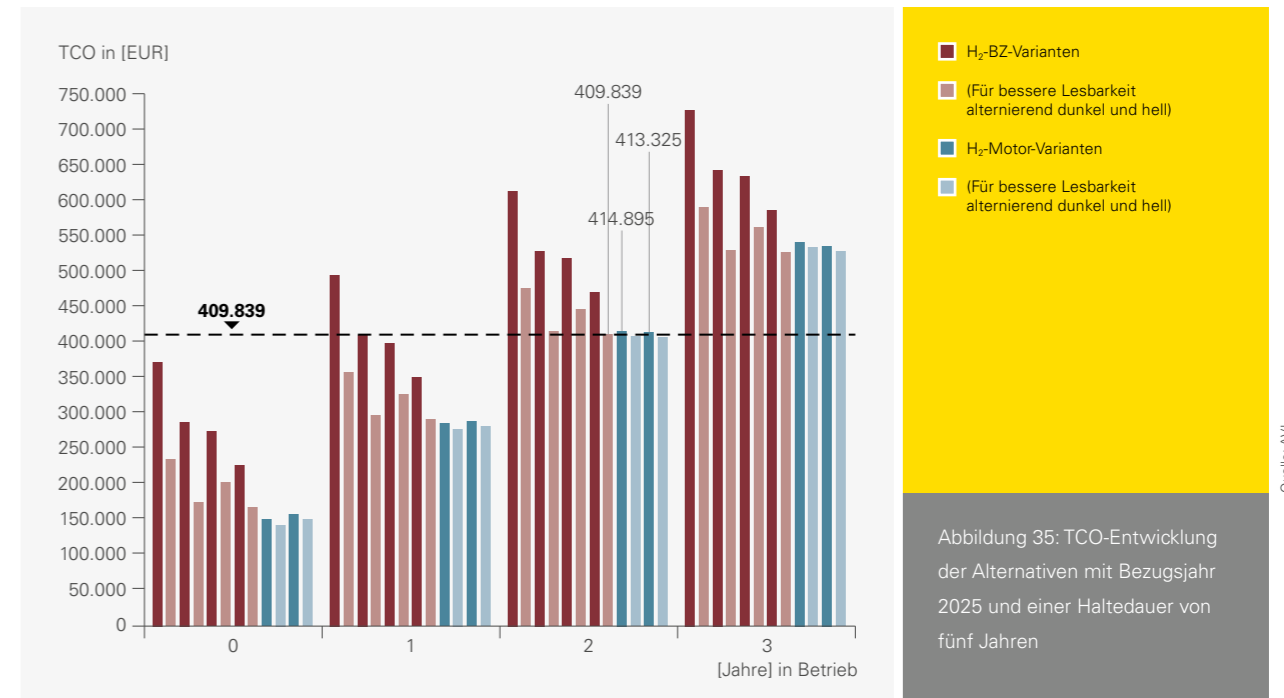


Abbildung 35: TCO-Entwicklung der Alternativen mit Bezugsjahr 2025 und einer Haltedauer von fünf Jahren

Quelle: AVL

7.1.6.2 TCO-Vergleich mit Bezugsjahr 2030 und einer Haltedauer von fünf Jahren

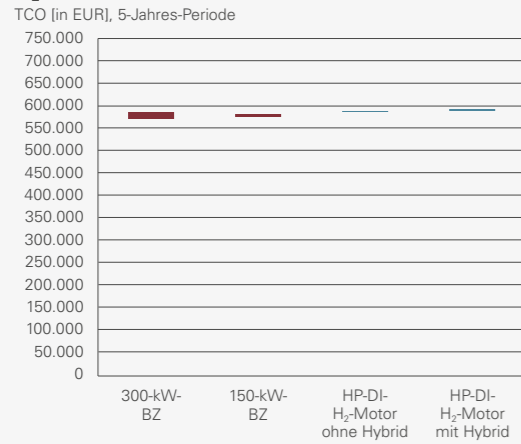
Die nachfolgenden Darstellungen zeigen die TCO-Ergebnisse bei einer Fahrzeuganschaffung im Jahr 2030 und bei einer Haltedauer von fünf Jahren. Tabelle 12 zeigt die TCO-Bandbreiten für die unterschiedlichen Fahrzeugvarianten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Wasserstoffpreisszenarien. Für alle dargestellten Varianten wurde eine vollständige Mautbefreiung angenommen.

Zeitpunkt	Haltedauer	Szenario Wasserstoffpreis	300-kW-BZ TCO in [EUR]	150-kW-BZ TCO in [EUR]	Hochdruck-H ₂ -Motor ohne Hybrid TCO in [EUR]	Hochdruck-H ₂ -Motor mit Hybrid TCO in [EUR]
2030+	5 Jahre	H ₂ low-case	571.151 bis 586.151	575.017 bis 582.517	587.536	590.397
2030+	5 Jahre	H ₂ mid-case	632.138 bis 647.138	637.657 bis 645.157	650.002	649.644
2030+	5 Jahre	H ₂ high-case	693.125 bis 708.125	700.297 bis 707.797	712.468	708.891

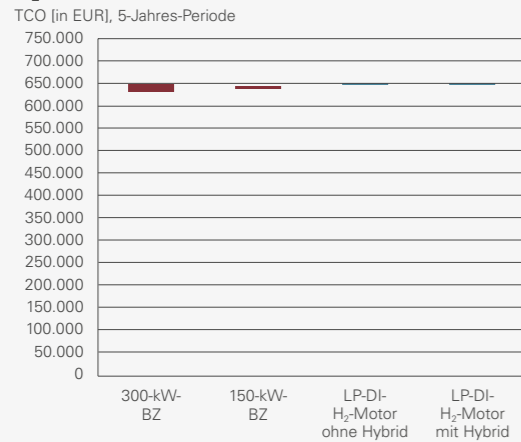
Tabelle 12: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2030+

Quelle: AVL

H₂ low-case



H₂ mid-case



H₂ high-case



Abbildung 36: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2030+

Quelle: AVL

Eine graphische Veranschaulichung der Werte aus Tabelle 12 erfolgt in Abbildung 36. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass bei einer Fahrzeuganschaffung im Jahr 2030 die TCO beider BZ-Varianten selbst im ungünstigsten Fall unter denen der besten H₂-Motor-Variante liegen. Dies resultiert einerseits aus dem für diesen Zeitpunkt angenommenen höheren Industrialisierungsgrad der Brennstoffzellenfertigung und den somit deutlich geringeren Anschaffungskosten und Kostenschwankungen von BZ-Fahrzeugen. Andererseits wirken sich auch die geringeren Reparatur- und Wartungskosten der BZ-Fahrzeuge positiv aus. Die TCO-Unterschiede zu den Alternativen mit H₂-Motor liegen hierbei allerdings insgesamt bei maximal 20.000 EUR und entsprechen somit nur einem vergleichsweise kleinen Anteil der gesamten TCO.

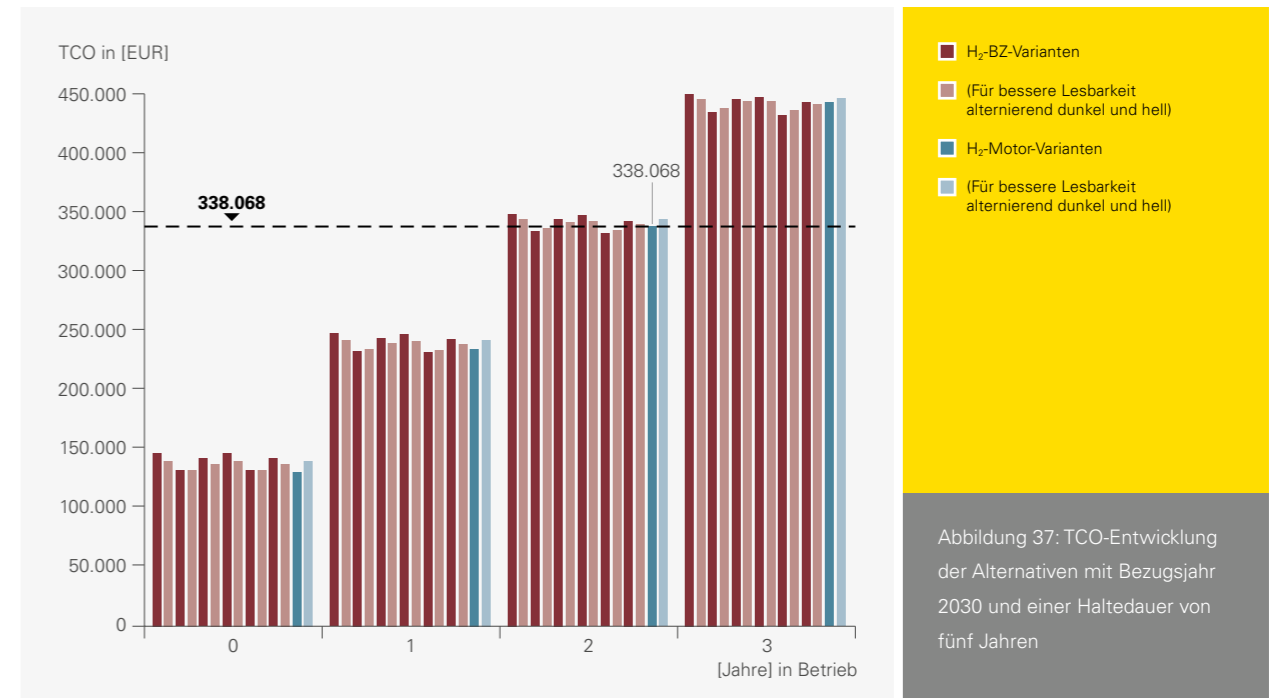
Bei einem Anschaffungszeitpunkt ab 2030 gibt es mehrere Fälle, bei denen es einen positiven ROI innerhalb von zwei Jahren für BZ-Antriebe im Vergleich zum Hochdruck-H₂-Motor-Antrieb gibt, da die Anschaffungskosten je nach Kostannahme sehr ähnlich sind. Im Vergleich zum Jahr 2025 ist auch ersichtlich, dass die TCO-Abweichungen zwischen den beiden Antriebsformen deutlich geringer sind. Auch in dieser Betrachtung spielt der Wasserstoffpreis de facto keine Rolle, die Unterschiede werden dadurch nur marginal beeinflusst.

Zitate von Interviewteilnehmern:

... Wenn die Brennstoffzelle hält, was sie verspricht, wird sie langfristig den Wasserstoffmotor übertrumpfen ...

... In 20 Jahren ist Brennstoffzelle dominierend, absolut! Der Wasserstoffmotor wird keine Chance haben gegenüber einer Brennstoffzelle ...

Basierend auf einer Haltedauer von fünf Jahren und einem Anschaffungszeitpunkt um das Jahr 2030 liegen die Vorteile bei der Brennstoffzelle. Die betrachteten BZ-Varianten weisen im Vergleich zu den H₂-Motor-Alternativen insgesamt einen schnelleren ROI sowie in jedem berechneten Fall die niedrigsten TCO am Ende der 5-Jahres-Periode auf. Die TCO-Unterschiede sind insgesamt, zumindest unter Annahme einer vollständigen Mautbefreiung beider Alternativen, jedoch vergleichsweise gering und liegen in allen mautfreien Berechnungen unter 20.000 EUR.



■ H₂-BZ-Varianten
 ■ (Für bessere Lesbarkeit alternierend dunkel und hell)
 ■ H₂-Motor-Varianten
 ■ (Für bessere Lesbarkeit alternierend dunkel und hell)

Abbildung 37: TCO-Entwicklung der Alternativen mit Bezugsjahr 2030 und einer Haltedauer von fünf Jahren

Quelle: AVL

7.1.6.3 TCO-Vergleich bei einer Haltedauer von zehn Jahren

Neben den aufgezeigten TCO-Rechnungen mit einer Haltedauer von fünf Jahren wurden auch die TCO bei einer Haltedauer von zehn Jahren untersucht. Die Notwendigkeit längerer Haltedauern begründet sich hierbei aus den anfangs noch hohen Anschaffungs- und Treibstoffkosten sowie den zu erwartenden Herausforderungen im Wiederverkauf.

Aus Tabelle 13 und Tabelle 14 ist ersichtlich, dass die Ergebnisse für zehn Jahre Haltedauer im Wesentlichen mit denen für fünf Jahre Haltedauer vergleichbar sind. Tendenziell ist es so, dass bei einer längeren Haltedauer die Anschaffungskosten an Bedeutung verlieren und Verbrauchskosten sowie z. B. Wartungskosten an Bedeutung gewinnen. In den hier durchgeführten Rechnungen sind keine „Auswirkungen“ erkennbar, die zu anderen Aussagen führen.

Zeitpunkt	Fahrzeug-haltedauer	Szenario Wasserstoffpreis	300-kW-BZ TCO in [EUR]	150-kW-BZ TCO in [EUR]	Niederdruck-H ₂ -Motor ohne Hybrid TCO in [EUR]	Niederdruck-H ₂ -Motor mit Hybrid TCO in [EUR]
2025	10 Jahre	H ₂ low-case	1.162.003 bis 1.359.555	1.164.120 bis 1.270.956	1.215.433 bis 1.223.253	1.195.222 bis 1.202.509
2025	10 Jahre	H ₂ mid-case	1.250.064 bis 1.447.616	1.254.618 bis 1.361.454	1.318.963 bis 1.326.783	1.291.687 bis 1.298.974
2025	10 Jahre	H ₂ high-case	1.338.125 bis 1.535.678	1.345.115 bis 1.451.951	1.422.493 bis 1.430.313	1.388.153 bis 1.395.440

Tabelle 13: TCO für Anschaffung im Jahr 2025, Haltedauer zehn Jahre

Quelle: AVL

Zeitpunkt	Fahrzeughaltedauer	Szenario Wasserstoffpreis	300-kW-BZ TCO in [EUR]	150-kW-BZ TCO in [EUR]	Hochdruck-H ₂ -Motor ohne Hybrid TCO in [EUR]	Hochdruck-H ₂ -Motor mit Hybrid TCO in [EUR]
2030+	10 Jahre	H ₂ low-case	1.011.028 bis 1.026.028	1.018.201 bis 1.025.701	1.044.961	1.041.383
2030+	10 Jahre	H ₂ mid-case	1.133.002 bis 1.148.002	1.143.481 bis 1.150.981	1.169.893	1.159.877
2030+	10 Jahre	H ₂ high-case	1.254.976 bis 1.269.976	1.268.761 bis 1.276.261	1.294.825	1.278.371

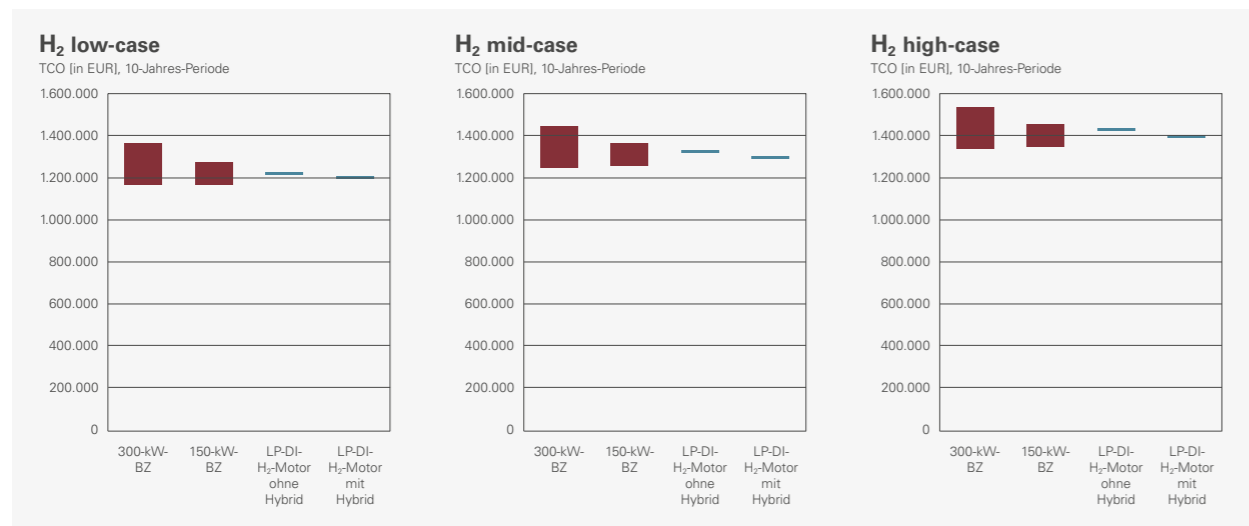
Quelle: AVL

Tabelle 14: TCO für die Anschaffung im Jahr 2030, Haltedauer zehn Jahre

Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen die Rechenergebnisse graphisch aufbereitet. Im Vergleich zu Abbildung 34 und Abbildung 36 zeigt sich, wie schon erwähnt, kein wesentlicher Unterschied in der Reihung der Antriebe. Lediglich die Varianz in den BZ-Antrieben reduziert sich insbesondere, weil die Unsicherheit in Bezug auf die Anschaffungskosten für die TCO nur eine kleinere Rolle spielt, die TCO-Ergebnisse für den H₂-Motor rücken ein wenig näher an das obere TCO-Ende für BZ-Antriebe und die Hybridisierung beim H₂-Motor führt eher zu einem TCO-Vorteil, weil die Verbrauchskosten bei einer Haltedauer von zehn Jahren einen höheren Anteil an den TCO haben als im Falle von fünf Jahren.

7.1.6.4 TCO-Ergebnisse für einen konventionellen Dieselantrieb

Um die TCO-Ergebnisse der untersuchten Fahrzeugalternativen in eine breitere Perspektive zu setzen, wurden auch TCO-Rechnungen für Fahrzeuge mit konventionellem Dieselantrieb durchgeführt. Die Möglichkeit eines solchen Vergleichs ist insbesondere deshalb wichtig, da das Ergebnis einen Einfluss auf die Industrialisierungsbemühungen haben kann. Wenn die Wasserstoffalternativen eine günstigere TCO zeigen, wird die Nachfrage stark steigen, was wiederum deren Industrialisierung begünstigt. Sollte das nicht der Fall sein, ist davon auszugehen, dass die Nachfrageent-



Quelle: AVL

wicklung schleppender verläuft und damit die Industrialisierung nicht beschleunigt wird.

Tabelle 15 zeigt die TCO-Ergebnisse für Dieselfahrzeuge bei einer Anschaffung im Jahr 2025 mit variierenden Dieselpreisen, einer Haltedauer von fünf Jahren sowie 100 % Maut.

Dieselpreis in [EUR/Liter]	Dieselfahrzeug TCO in [EUR]
1,00	671.426
1,25	706.371
1,50	741.316

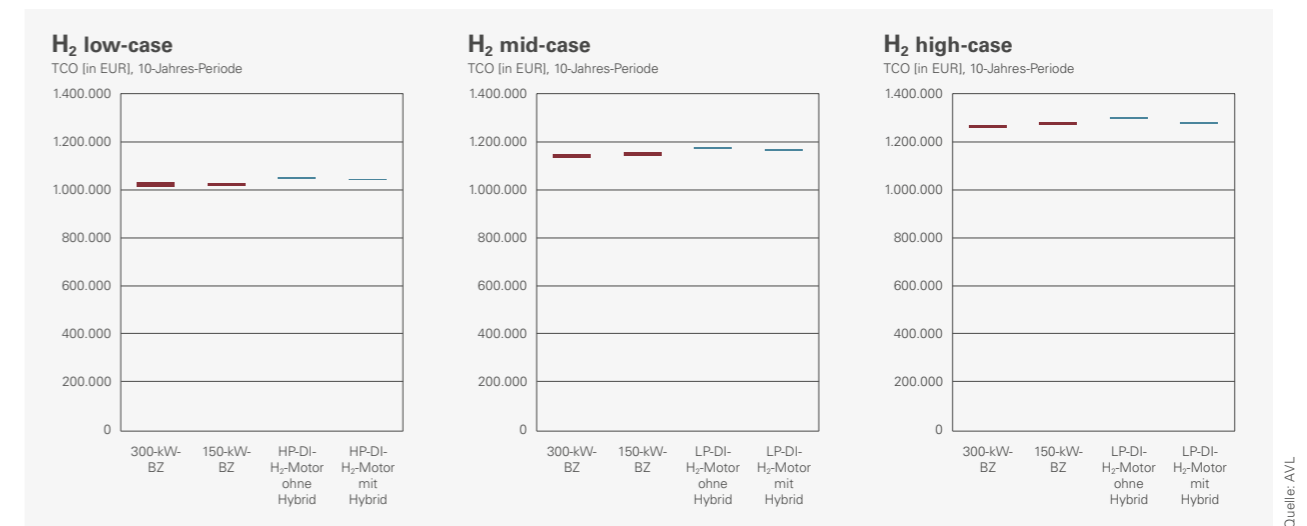
Quelle: AVL

Tabelle 15: TCO-Ergebnisse für Dieselfahrzeuge für Anschaffung im Jahr 2025, verschiedene Dieselpreise, eine Haltedauer von fünf Jahren sowie 100 % Maut

Vergleicht man die dargestellten Ergebnisse mit denen, die zuvor für die Wasserstoffantriebe erläutert wurden, ist Folgendes zu erkennen:

1. Die TCO-Ergebnisse sind in einer vergleichbaren Größenordnung bei Dieselpreisen von 1,50 EUR pro Liter und „Best Case“-Annahmen für die Anschaffungskosten für die Wasserstoffantriebe sowie „Low Case“-Wasserstoffpreisen.
2. Ist die Situation nicht wie unter Punkt 1 dargestellt, kann es im Bezugsjahr 2025 TCO-Unterschiede in der Größenordnung von 140.000 bis über 300.000 EUR über eine 5-Jahres-Periode geben, d. h. eine deutlich schlechtere TCO-Bilanz für die Wasserstoffvarianten.
3. Im langfristigen Vergleich (ohne zukünftige mögliche weitere Wirkungsgradsteigerungen beim Dieselmotor berücksichtigt zu haben) zeigt sich deutlich, dass die betrachteten Wasserstoffantriebe aufgrund der zu erwartenden Kostendegression und sinkender Wasserstoffpreise wettbewerbsfähig mit konventionellen Dieselantrieben sind. In den meisten Konstellationen mit einem Anschaffungsjahr ab 2030 zeigen sich sogar erkennbar geringere TCO der untersuchten Alternativen.

Hervorzuheben ist, dass auch in den Ergebnissen für Dieselfahrzeuge keine Restwerte berücksichtigt wurden. Nach einer fünfjährigen Laufzeit ist davon auszugehen, dass der Restwert in etwa 30 bis 40 % des ursprünglichen Anschaffungspreises betragen kann. Dieser Betrag würde die TCO entsprechend verringern.



Quelle: AVL

7.1.6.5 Kurzzusammenfassung der TCO-Ergebnisse

Der TCO-Vergleich zeigt, dass die beiden Wasserstoffantriebe unter gleichen Rahmenbedingungen aus TCO-Sicht in etwa ebenbürtig sind. Unter Betrachtung eines frühen Anschaffungszeitpunktes im Jahr 2025 und einer Haltedauer von fünf Jahren gibt es Vorteile für den H₂-Motor, die vor allem aus den Unsicherheiten bezüglich der Anschaffungskosten der BZ-Varianten resultieren.

In der längerfristigen Perspektive mit einem Anschaffungszeitpunkt ab 2030 weisen beide betrachteten Varianten des BZ-Antriebs geringere TCO als die Varianten des H₂-Motors auf. Die letztendlichen Unterschiede bei einer Haltedauer von fünf Jahren und unter Annahme einer vollständigen Mautbefreiung beider Alternativen sind jedoch gering.

Aufgrund der Ähnlichkeit der TCO-Ergebnisse für die beiden Alternativen ist die relative Vorteilhaftigkeit in hohem Maße sensitiv gegenüber Änderungen der Rahmenbedingungen. So würde beispielsweise eine nicht vollständige Mautbefreiung der Alternativen mit H₂-Motor die Vorteilhaftigkeit deutlich in Richtung BZ-Fahrzeuge verschieben.

Im Vergleich zum Diesel weisen beide Varianten aus heutiger Sicht noch deutliche TCO-Nachteile auf. Es müssten bei einer Anschaffung im Jahr 2025 sehr viele Faktoren zugunsten der Wasserstoffantriebe zusammentreffen, um hier wettbewerbsfähig zu sein.

Zitate von Interviewteilnehmern:

... Wenn Kosten nicht neutralisiert werden, sind Mehrkosten undenkbar. Ökologie und Ökonomie müssen Hand in Hand gehen ...

... EU-CO₂-Einsparziele bei LKW kommt bei Spedition nicht an! Wer kauft am Ende die alternativen Technologien? Ohne politische Maßnahmen passiert da nichts ...

... Technologieoffenheit ist wichtig, und Praxiserfahrung ...

Bei einem Anschaffungszeitpunkt ab 2030 sind hingegen beide Antriebe konventionellen Dieselfahrzeugen hinsichtlich ihrer TCO mindestens ebenbürtig, unter den entsprechenden Rahmenbedingungen sogar erkennbar überlegen.

7.2 Technischer Vergleich

Der technische Vergleich bezieht sich auf die unten angeführten Kriterien, die einerseits für Fahrzeughersteller, andererseits auch für Flottenbetreiber bzw. Fahrer relevant sind.

1. Die Möglichkeit, Technologien zu übernehmen, mit denen Hersteller vertraut sind
2. Zuverlässigkeit
3. Lebensdauer
4. Emissionen (NO_x, CO₂, Partikel, Lärm etc.)
5. Kühlung
6. Auswirkungen auf das Fahrzeuggewicht und die zur Verfügung stehende Nutzlast
7. Mögliche Übererfüllung der minimalen Fahrzeuganforderungen (Fahrleistungen)

7.2.1 Etablierte Technologie

Vorteile für den Wasserstoffmotor

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Ein Motor muss in allen Weltmärkten betrieben werden können. Das erfüllt ein gleicher Motor für zwei Kraftstoffe, zum Beispiel Diesel und Wasserstoff ...

Aus Sicht bestehender Fahrzeughersteller ist klar die Lösung mit Wasserstoffmotor zu favorisieren, da dies aus Ablauf-, Maschinen- und Personalsicht die geringsten Umstellungskosten bedeuten würde. Das gilt vor allem für etablierte Fahrzeughersteller, die aktuell überwiegend konventionelle Dieselfahrzeuge herstellen.

Im Wesentlichen betreffen die Änderungen, abgesehen vom Tanksystem, lediglich bestimmte Bauteile des Motors wie Einspritzsystem, Platzbedarf für eine Zündkerze, andere Leitungen (aus Materialgründen) und ggf. ein anders dimensioniertes Abgasnachbehandlungssystem. Die weiteren Komponenten des Antriebsstrangs, beispielsweise Getriebe, Kardanwelle, Differential und Hinterachse, sind baugleich mit denen heutiger Dieselantriebe.

Der Wasserstoffmotor hat dadurch aus Sicht der Fahrzeughersteller einen höheren Verwandtschaftsgrad zum konventionellen Dieselmotor als die Brennstoffzelle, die als rein elektrischer Antriebsstrang große Ähnlichkeit mit batterieelektrischen Fahrzeugen hat. Der Wasserstoffmotor zieht in

Bezug auf die Gesamtfahrzeugauslegung weniger Änderungen nach sich als die Elektrifizierung mit Batterie und Brennstoffzelle. Aus Sicht einiger Interviewpartner ist diese einfache Betrachtung allerdings häufig zu kurz gedacht, da auch der Wasserstoffmotor einige Herausforderungen mit sich bringt und ohnehin eine Entwicklung von batterieelektrischen Fahrzeugen angestoßen wurde.

7.2.2 Zuverlässigkeit

Ausgeglichen

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Der Wasserstoffmotor steht ganz am Anfang, die Brennstoffzelle wird seit 20 Jahren intensiv erprobt, der Verbrennungsmotor seit 125 Jahren! Damit ist der technische Reifegrad definiert ...

Die Zuverlässigkeit kann anhand der Anzahl von Teilen, der Komplexität des Aufbaus und der bisher gesammelten Erfahrungen mit den in Frage kommenden Komponenten beurteilt werden. Hinsichtlich der Anzahl von Teilen sowie der Komplexität des Aufbaus sind Brennstoffzellenantriebe dem konventionellen Antriebsstrang deutlich überlegen. Die Teileanzahl und auch die Komplexität sind hier – bezogen auf die physischen Komponenten – deutlich geringer. Auch wenn die Steuerung der Teile des Brennstoffzellenantriebs aufgrund des Zusammenspiels der Brennstoffzelle mit der Batterie sowie vorausschauender Steuerungen als komplexer angesehen werden kann, ist hier der Brennstoffzellenantrieb dennoch im Vorteil zu sehen. Andererseits gibt es jedoch schon lange Erfahrung mit konventionellen Antrieben, die außerordentlich zuverlässig arbeiten. Aufgrund der Neuigkeit von Brennstoffzellenantrieben sieht man hier in den verschiedenen Entwicklungen jedoch noch ein deutliches Potenzial zur Optimierung und für verstärkte Lerneffekte.

Die Zuverlässigkeit eines LKW ist aus Sicht der Flottenbetreiber von wesentlicher Bedeutung. Sie steht in direktem Zusammenhang zu den Wartungskosten und hat damit einen direkten Einfluss auf die TCO-Betrachtung. Die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff in einem Verbrennungsmotor bedingt, dass in allen Untersystemen notwendige wasserstoffspezifische Anforderungen identifiziert werden. Methodiken zur Identifizierung möglicher Fehlermodi sind in der Motorenentwicklung anhand anderer Kraftstoffe erprobt und können auch auf den H₂-Motor angewandt werden. Fehlermodi des H₂-Motors lassen sich mit etablierten struk-

turierten Produktentwicklungsprozessen und methodischen Ansätzen überprüfen und validieren. Die durch den Betrieb mit Wasserstoff möglichen Ausfallparameter sind dennoch vielfältig und umfassen beispielsweise:

- Zusatzbelastungen aufgrund von Verbrennungsanomalien, die zu einer frühzeitigen thermomechanischen Ermüdung führen
- übermäßigen Verschleiß der Ventile und Ventilsitze primär aufgrund schlechterer Schmiereigenschaften
- vorzeitigen Verschleiß oder Korrosion durch erhöhten Wassergehalt im Abgas
- Fehler im Motorentlüftungssystem
- Dauerhaltbarkeitsprobleme bei Zündkerzen und Einblassystem

Da die Produktentwicklungszyklen denselben Anforderungen wie in der klassischen Motor- und Antriebsstrangentwicklung entsprechen, ist auch in der LKW-Anwendung von einer zukünftig hohen Zuverlässigkeit der H₂-BZ auszugehen. Einige Interviewpartner sehen hier allerdings noch großen Entwicklungsbedarf. Die in Bezug auf die Zuverlässigkeit entscheidenden Systemkomponenten sind neben dem BZ-Stapel selbst die neu entwickelten Komponenten, wie zum Beispiel das H₂-Dosierventil und der Luftverdichter. Der BZ-Stapel hat sich in den letzten Jahren hinsichtlich Robustheit und Lebensdauer deutlich verbessert. Der zunehmende Industrialisierungsgrad der BZ-Stapel einzelner Hersteller ist hierbei deutlich erkennbar. Auch bei der Industrialisierung von Stapelkomponenten wie Membran, Gasdiffusionslage, Dichtungen und Bipolarplatten wurden in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt. Die Ergebnisse von Dauerlauf-Erprobungen auf Stapel-Prüfständen bestätigen diesen Entwicklungsfortschritt.

Die Interviewpartner betrachten das Thema Zuverlässigkeit stark unterschiedlich. Ein Experte sieht es beim H₂-Motor gelöst, bei der H₂-BZ dagegen als „große Unbekannte“. Andere Rückmeldungen sehen dies hingegen genau umgekehrt, nämlich die H₂-BZ mit höherer Zuverlässigkeit gegenüber dem H₂-Motor.

7.2.3 Lebensdauer

Ausgeglichen

Die Lebensdauer hat einen maßgeblichen Einfluss auf die TCO-Betrachtung. Für beide wasserstoffbasierten Technologien ist die Lebensdauer eine der größten Herausforderungen.

Im BZ-PKW wird eine Lebensdauer von ca. 5.500 Stunden spezifiziert, wobei eine Leistungsabnahme von 10 % über die Lebensdauer akzeptiert wird [DOE, 2020]. Allgemein kann diese sogenannte irreversible Leistungsabnahme, der jedes elektrochemische System unterliegt, in eine irreversible Spannungsabnahme übersetzt werden. Im Nennarbeitspunkt des BZ-Stapels beträgt diese 10 $\mu\text{V/h}$ für PKW-Anwendungen. Maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer der BZ haben die Betriebsbedingungen, die Dynamik (von elektrischer Leistung und Betriebsbedingungen) sowie die Anzahl von Gefrierstarts und Starts/Stopps allgemein. Die Alterung eines BZ-Fahrzeugs wird im Wesentlichen durch die Komponenten im BZ-Stapel selbst (Elektroden, Polymermembran, Bipolarplatten etc.) und im System (Befeuchter, H₂-Dosierventil, H₂-Rezirkulationsgebläse und maßgeblich auch Luftverdichter) beeinflusst.

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Brennstoffzellen sind super kompliziert, [sehr] teuer, leicht zu vergiften, aber es führt kein Weg daran vorbei ...

Die Lebensdaueranforderungen in einer LKW-Anwendung liegen mit 25.000 bis über 30.000 Betriebsstunden um ein Vielfaches höher als im PKW. Das entspricht einer irreversiblen Spannungsdegradation von weniger als 2 $\mu\text{V/h}$ im Nennarbeitspunkt. Gleichzeitig sind die Dynamik-Anforderungen im LKW aber deutlich geringer als im PKW, was der Lebensdauer zugutekommt. In einzelnen Bus-Prototypen konnte bereits eine Lebensdauer von mehr als 19.000 Stunden nachgewiesen werden. Viele Experten trauen der BZ auch die im LKW geforderte Lebensdauer zu, wenn das BZ/Bat.-Hybrid-System entsprechend optimal ausgelegt ist. Selbstverständlich müssen alle peripheren Komponenten im BZ-System diese Lebensdaueranforderung gleichermaßen erfüllen.

Auch beim H₂-Motor ist die Lebensdauer ein aktuelles Entwicklungsthema. Eine große Herausforderung beim Wasserstoffmotor besteht in der schlechten Schmierfähigkeit des Wasserstoffs. Die Dauerhaltbarkeit der H₂-Injektoren ist daher ein Entwicklungsthema. Weiterhin ist die Korrosion von Materialien durch Produktwasser (deutlich mehr als bei Diesel) zu beachten.

Wie im Kapitel 7.2.2 angemerkt, sind Methodiken zur Identifizierung möglicher Fehlermodi aufgrund der konstruktiven und thermodynamischen Unterschiede des Wasserstoffmotors im Vergleich zum Dieselmotor erprobt und können ebenso

auf den Wasserstoffmotor angewendet werden. Im Kapitel 7.2.2 wurden bereits mögliche Fehlermodi aufgelistet, von denen einige Einfluss auf die Dauerhaltbarkeit und somit auch die Lebensdauer haben. Einige Komponenten haben hingegen lediglich Einfluss auf Zuverlässigkeit und Serviceintervall, nicht aber auf die Lebensdauer, wie z. B. die Zündkerzen.

Es ist anzunehmen, dass Wasserstoffmotoren eine ähnliche Lebensdauer wie aktuelle Diesel- oder Gasmotoren erreichen können, wenn erwähnte Entwicklungsprozesse wie nötig exerziert und kritische Komponenten in entsprechenden Serviceintervallen gewartet bzw. getauscht werden.

Insgesamt sind damit beide Technologien bezogen auf die Lebensdauer auf einem vergleichbaren Niveau. Jedoch gibt es auch hier unterschiedliche Wahrnehmungen bei den Interviewpartnern.

7.2.4 Emissionen

Im Vorteil ist die Brennstoffzelle

Ganz allgemein muss bei Emissionen zwischen Luftschadstoffen (wie z. B. Partikel, NO_x oder Schwefelverbindungen) und klimaschädlichen Gasen wie CO₂ unterschieden werden. Die BZ ist lokal emissionsfrei, daher wird im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels lediglich auf den H₂-Motor eingegangen.

Schadstoffemission des Wasserstoffmotors

Wasserstoffmotoren bieten im Vergleich zu aktuellen Dieselmotoren das Potenzial niedrigerer Schadstoffemissionen. Das Rohemissionsverhalten ist in Kapitel 6.2.4 im Detail beschrieben. Es gibt konkrete Zielkonflikte zwischen Leistungsdichte und Stickoxidemissionen, jedoch kann durch die richtige Kombination von Motor und aktuell verfügbarer Abgasnachbehandlungstechnologie die aktuelle sowie künftige Emissionsgesetzgebung unterschritten werden.

CO₂-Emissionen

Zu CO₂-Emissionen eines LKW mit Wasserstoffmotor gibt es aktuell zwei Sichtweisen: Einerseits die „gesetzliche“, d. h. bei Verwendung des EU-Berechnungswerkzeuges VECTO zur Bestimmung der CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs. Andererseits die tailpipe CO₂-Emissionen eines Fahrzeugs, d. h. gemessen am Auspuffrohr. In der VECTO-Betrachtung ist ein Fahrzeug mit H₂-Motor emissionsfrei, weil CO₂ verursachen-

de Betriebsstoffe wie Schmieröl und AdBlue nicht berücksichtigt werden. Bei den tailpipe CO₂-Emissionen ändert sich das Bild, da hier CO₂-Emissionen nachweisbar sind.

Unter Berücksichtigung heute üblicher Schmierstoffverbräuche und moderater AdBlue-Verbräuche ergeben sich CO₂-Einsparungen von >98 % im Vergleich zu einem Dieselfahrzeug. Die Einsparung ist somit sehr groß, beträgt allerdings nicht 100 % wie bei einem BZ-Antrieb.

Lärm

Die wesentlichen Geräuschquellen eines Fahrzeugs sind das Antriebsgeräusch (Motor, Getriebe) sowie das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Im Falle eines Nutzfahrzeugs dominiert bis ca. 50 bis 60 km/h das Antriebsgeräusch, darüber das Reifen-Fahrbahn-Geräusch [UBA 2020]. Im Falle von niedrigeren Geschwindigkeiten, also bis ca. 50 bis 60 km/h, ist der BZ-Antrieb leiser als der H₂-Motor. Einzig der Hauptlüfter könnte beim BZ-Antrieb im Falle eines schlecht ausgelegten Thermosystems negativ auffallen. Auch wenn der H₂-Motor durch die Verbrennungscharakteristik in der Teillast niedrigere Geräuschemissionen als der Dieselmotor erzielen kann, liegt die Geräuschemission dennoch auf ähnlichem Niveau. Im Falle von Geschwindigkeiten über 50 bis 60 km/h überwiegt das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, das Antriebsgeräusch hingegen spielt dann nur mehr eine untergeordnete Rolle. Hier sind beide Antriebsvarianten in erster Näherung gleich zu bewerten. Eine Auswertung des Fahrprofils, das dem schweren Fahrzeug in dieser Untersuchung zugrunde gelegt wurde, zeigt, dass die Zeitanteile von Fahrten mit mindestens 50 und 60 km/h bei rund 96 und 95 % liegen. Das heißt, de facto spielt der Vorteil des BZ-Antriebs in puncto Antriebsgeräusch in dieser Anwendung eine vernachlässigbare Rolle.

7.2.5 Kühlung

Vorteil Wasserstoffmotor

Zitate von Interviewteilnehmern:

... Für schwere Nutzfahrzeuge macht die Brennstoffzelle am wenigsten Sinn ...

... Der Wasserstoffverbrennungsmotor ist im Forschungsstadium in der Vorentwicklung. Die Brennstoffzelle ist durch PKW-Anwendungen viel reifer. Es gibt nur einen Vorteil gegenüber der Brennstoffzelle: die Kühlungsherausforderung ...

... Jedes technische Problem ist lösbar, die Frage ist nur, zu welchen Kosten ...

Eine der maßgeblichen Auswirkungen auf das Fahrzeug besteht in der Kühlung der BZ. Zwei Aspekte kommen hier zum Tragen. Erstens ist die Betriebstemperatur einer BZ mit maximal ca. 80 °C (allenfalls kurzzeitig max. 90 °C) deutlich niedriger als bei einem Motor (gilt sowohl für Diesel- als auch für H₂-Motor), zweitens ist der Enthalpie-Verlust über den Abgasstrang bei der BZ deutlich geringer als bei einem Motor. Letzteres liegt vor allem an den deutlich geringeren Abgastemperaturen der BZ (ca. 60 °C) im Vergleich zum Motor. Dies bedeutet, dass die Abwärme der BZ großteils über den Kühler abgeführt werden muss, während der H₂-Motor den Großteil der Abwärme über den Abgasstrang abführt.

Beim klassischen Diesel-LKW ist die Kühler-Auslegung in etwa wie folgt: Ca. 2/3 der Antriebsleistung müssen als Wärme über den Kühler abgeführt werden [RICARDO 2019]. Bei ca. 1 m² Frontkühlerfläche und 330 kW Antriebsleistung sind das ca. 200 kW_{therm}. Etwa die gleiche Menge an Wärme wird über die Abgasenthalpie abgeführt. Bei der H₂-BZ ist zwar der Wirkungsgrad höher als beim Diesel, dafür verschiebt sich die Kühlleistung deutlich von der Abgasenthalpie hin zur Abwärme im Kühler. Die über die Abgasenthalpie abgeführte Wärme ist eher vernachlässigbar, demzufolge steigt die über den Frontkühler abzuführende Wärme. Da auch das Betriebstemperaturniveau der BZ deutlich niedriger ist als beim Diesel- oder H₂-Motor, kann man davon ausgehen, dass die Kühlerfläche des Frontkühlers etwa um mindestens den Faktor 2,5 vergrößert werden muss im Vergleich zu einem bestehenden Diesel-LKW.

Demzufolge muss über den klassischen Fahrzeugkühler (Luft-Wasser-Wärmetauscher) wesentlich mehr Wärme bei gleichzeitig geringerem Temperatur-Delta in die Umgebung abgeführt werden. Bereits bei BZ-Systemen in PKW-Anwendungen findet man daher häufig zusätzliche Kühlsysteme oder eine im Vergleich zu klassischen Motor-Fahrzeugen deutlich vergrößerte Kühlfläche. Eine Extremsituation für jede mobile BZ-Anwendung ist die Steigfähigkeit. Bei einer Bergauf-Fahrt sind hohe Dauerleistungen erforderlich, wobei gleichzeitig durch die niedrigere Fahrtgeschwindigkeit eine geringere Kühlleistung ermöglicht wird. Insbesondere beim LKW ist das eine der zentralen Herausforderungen. Wenn dann noch hohe Außentemperaturen hinzukommen, wird die maximal zur Verfügung stehende Kühlleistung schnell ein leistungsbegrenzender Faktor.

Die Theorie hinter dieser Kühlthematik lässt sich durch das Wassermanagement der BZ erklären, insbesondere der NT-PEM-BZ. Höhere Betriebstemperaturen sind mit den heutigen Polymermembranen nicht ohne weiteres möglich, da die Leistungsfähigkeit dieser BZ-Technologie vom Wassergehalt in der Membran abhängt (Stichwort Protonenleitfähigkeit). Systembedingte Lösungen wie die Anpassung der Betriebsparameter (z. B. durch Druckerhöhung) erweitern zwar das Temperaturfenster nach oben, allerdings auf Kosten des Systemwirkungsgrades. Andere Lösungen wären Membrantechnologien mit anderen (nicht wasserbasierten) Protonenleitfähigkeitsmechanismen. Diese Entwicklungen gibt es bereits seit Jahrzehnten, bisher jedoch ohne erkennbare Vorteile gegenüber vorhandenen Membranmaterialien. Auch in diesem Fall gibt es deutlich unterschiedliche Rückmeldungen von den Interviewpartnern. Für manche ist die Herausforderung der Kühlung der BZ in einem 40-Tonnen-LKW unlösbar, weil ein zusätzlicher Lüfter mit 60 kW jeden Wirkungsgradvorteil zunichtemachen würde. Andere Rückmeldungen sehen das Kühlthema zwar als große, aber dennoch lösbare Herausforderung der BZ. Selbst die Bewertung unterschiedlicher neuartiger Kühlkonzepte führt am Ende immer wieder zur klassischen Frontkühler-Lösung zurück.

Am Ende ist es so, dass die Kühlung bei der BZ eine Herausforderung ist und bleiben wird, die aber zu bewältigen ist. Unbestritten ist jedoch, dass ein BZ-LKW nicht dauerhaft unter maximaler Last betrieben werden kann. Je nach Nutzung ist dies aber auch nicht notwendig. Eine der anspruchsvollsten Strecken in Europa für BZ-LKW ist der Brenner-Pass. Hier muss ein voll beladener 40-Tonnen-LKW über ca. 30 Minuten eine Antriebsleistung von ca. 400 kW erreichen. Wenn diese Leistung zur Gänze aus dem BZ-System kommen sollte, wäre das der Punkt maximaler Leistung für das BZ-System. Die dafür benötigte Kühlleistung lässt sich in einem LKW mit klassischem Frontkühlersystem nicht oder nur mit wesentlichen Änderungen in der Kühlsystemauslegung unterbringen. Erst recht bei geringem Fahrtwind und erhöhter Außentemperatur wird das Kühlsystem für Brennstoffzellen schnell an Grenzen stoßen. Eine elektrisch betriebene Zusatzkühlung (Ventilator) verschlechtert den Wirkungsgrad zusätzlich und ist daher kontraproduktiv. Zusätzliche Kühlsysteme im LKW können dieses Thema ebenfalls adressieren, brauchen aber weitere Entwicklung und ein angepasstes Fahrzeugdesign. Da ein BZ-System aber immer mit einer entsprechend großen Batterie hybridisiert wird, reduziert sich der Kühlbedarf in Abhängigkeit von der Batteriekapazität. Im Anschluss an eine Bergauf-Fahrt

kann die Batterie dann durch Rekuperation (Bremsenergie-rückgewinnung) oder zusätzlichen Strom aus der BZ wieder geladen werden.

7.2.6 Auswirkungen auf das Fahrzeuggewicht und die zur Verfügung stehende Nutzlast

Ausgeglichen

Die EU-Gesetzgebung erlaubt Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, das höchstzulässige Gewicht von Dieselfahrzeugen um ein bzw. zwei Tonnen zu überschreiten [EU 2019/1242]. Wichtig ist, dass diese Gewichtsüberschreitung explizit dem alternativen oder emissionsfreien Antrieb zugeordnet wird. Eine Erhöhung der Nutzlast ist damit nicht möglich.

Somit wurde hier eine Möglichkeit geschaffen, einen alternativen oder emissionsfreien Antrieb in Fahrzeuge zu installieren, ohne einen Nachteil gegenüber herkömmlichen dieselpetriebenen Fahrzeugen zu generieren. Dies ist auch als Notwendigkeit zu sehen, um alternative oder emissionsfreie Antriebe zu etablieren.

Unter Berücksichtigung der wesentlichen Komponenten der beiden Wasserstoffantriebe ist davon auszugehen, dass die Brennstoffzelle auch unter Einbeziehung der Batterie (bis zu einer gewissen Kapazität) durchaus ebenbürtig mit konventionellen Dieselantrieben sein kann. Der Wasserstoffmotor wäre unter Berücksichtigung des Tanksystems etwas schwerer als der Dieselantrieb, aber auch noch in einem vergleichbaren Rahmen. So wiegt ein Tanksystem (ausschließlich die zylindrischen Behälter) für rund 40 bis 50 kg Wasserstoff zwischen 700 und 750 kg. Addiert man die 40 bis 50 kg Wasserstoff, kommt man auf ca. 750 bis 800 kg. Das sind lediglich ca. 300 bis 400 kg mehr, als ein Dieselfahrzeug mit ca. 400-Liter-Dieseltank wiegt, und deutlich innerhalb der Möglichkeit, das Gewicht um eine Tonne zu erhöhen.

7.2.7 Mögliche Übererfüllung der minimalen Fahrzeuganforderungen (Fahrleistungen)

Vorteil für die Brennstoffzelle

Alle Antriebsstränge, die auch mit elektrischen Antriebsmotoren (etwa H₂-Motor mit Hybrid und auch Antriebe, deren

Versorgung durch eine Brennstoffzelle stattfindet) ausgestattet sind, haben einen Vorteil gegenüber einem rein mechanischen Antrieb, da die Energie beim Bremsen oder beim Bergabfahren rekuperiert werden kann. Diese Energie kann, unter Berücksichtigung von Umwandlungsverlusten, in späteren Phasen wieder zum Antrieb genutzt werden. Dadurch ergibt sich ein Vorteil im Vergleich zu Fahrzeugen, die ausschließlich durch einen H₂-Motor angetrieben werden. Die Energiebilanz, betrachtet auf einem definierten Zyklus, fällt dadurch besser aus. Darüber hinaus haben Systeme mit Elektromotoren im Antriebsstrang auch die Möglichkeit, im Peak-Betrieb zu operieren und dadurch kurzzeitig mehr Leistung als die Nennleistung zur Verfügung zu stellen. Dadurch ergeben sich im transienten Fahrbetrieb deutlich bessere Fahrleistungen (zum Beispiel: besseres Beschleunigungsverhalten), als es bei einem mit H₂-Motor ausgestatteten Fahrzeug der Fall wäre. Dies wird darüber hinaus durch die Drehmomentcharakteristik begünstigt, die ein Elektromotor als Antriebseinheit mitbringt. Ein Elektromotor kann bereits ab dem Stillstand sein maximales Drehmoment bereitstellen, wohingegen ein H₂-Motor dies erst bei einer erhöhten Motordrehzahl liefern kann.

7.3 Schlussfolgerungen

Zitate von Interviewteilnehmern:

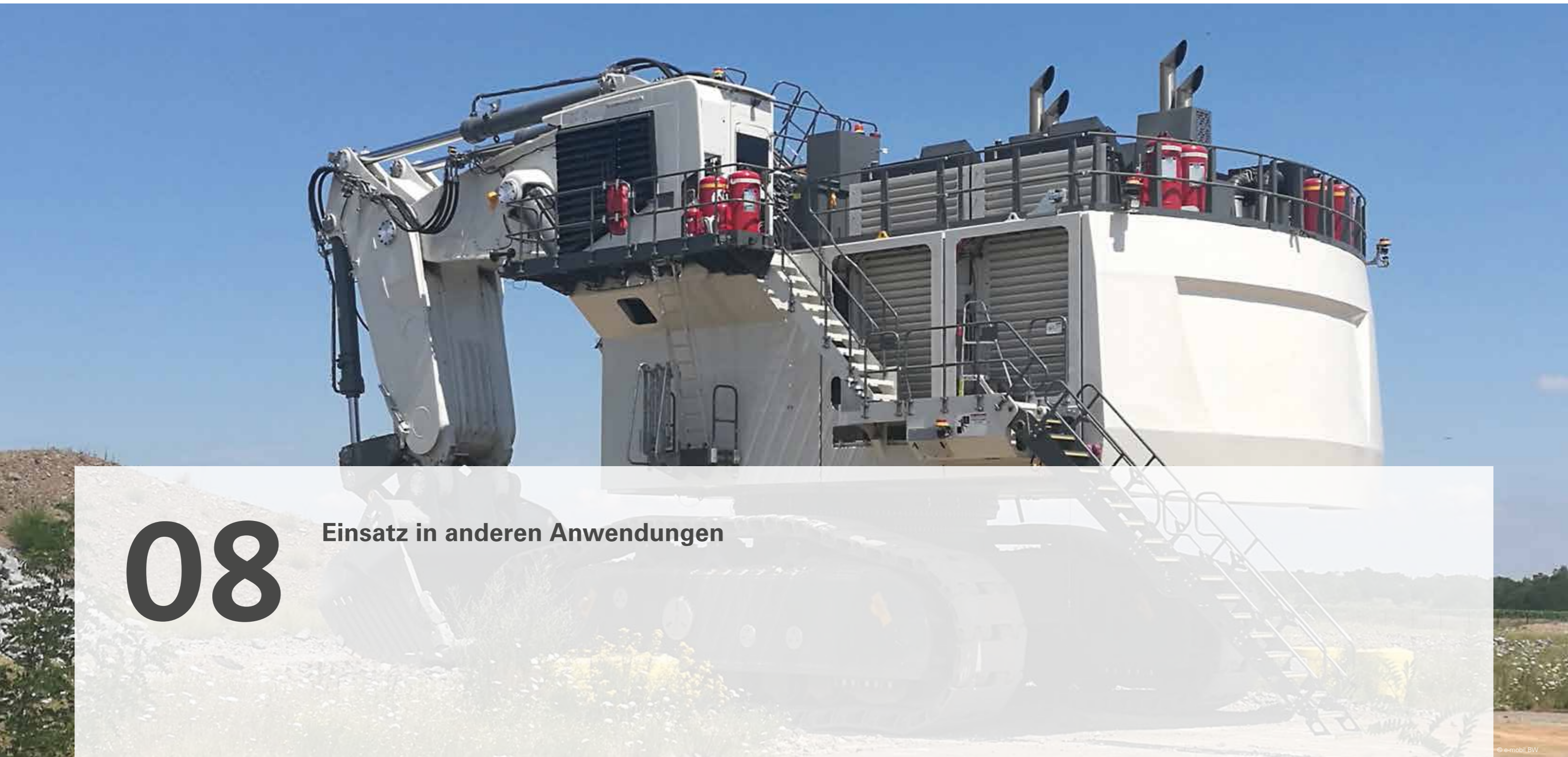
... Die Not der LKW-Hersteller ist groß, die CO₂-Ziele zu erreichen. Ein Wasserstoffmotor ist die einfachste Maßnahme, aber eben nur eine Brückentechnologie. Es besteht die Gefahr, dass zu viel in die Wasserstoffverbrennungsmotor-Technologie investiert wird. Am Ende überholen uns [andere] beim Thema BZ-LKW ...

... Es wäre ein Fehler, nach der einzig wahren Technologie zu suchen. Brennstoffzelle wie auch Wasserstoffverbrennungsmotor, beide haben ihren Sinn. Beides sind komplexe Technologien, aber ohne Konkurrenz zueinander. Je nach Kunden kann sich die eine oder andere Technologie bewähren ...

Tabelle 16 zeigt, wie sich die Ergebnisse der Bewertungen auf die beiden verschiedenen Antriebskonzepte hinsichtlich der Attraktivität für Käufer und Hersteller auswirken könnten. Ein „+“ kennzeichnet, welche Antriebsform für das jeweilige Kriterium besser erscheint, die unterschiedlichen Farben kennzeichnen, für welche Gruppe, also Fahrzeughersteller oder Fahrzeugkäufer, das jeweilige Kriterium primär von Interesse ist, wobei natürlich aus Herstellersicht alle für Kunden relevanten Kriterien auch für Hersteller wichtig sind.

Kriterium	Brennstoffzelle	Wasserstoffmotor
Technologie-vertrautheit		+ Klare Vorteile für H ₂ -VKM (Antriebsstrang kann beibehalten werden, größtenteils bestehende Lieferantenstruktur, Wissen der Mitarbeiter, Produktionseinrichtungen, Werkstätten)
Zuverlässigkeit	+ Mechanisch geringere Komplexität, Prozess ist zuverlässig, Herausforderung ist im Wesentlichen die Integration im Fahrzeug	+ Mechanisch deutlich komplexer, jedoch sind die meisten Komponenten fertig entwickelt; Methodiken zur Identifizierung möglicher Fehlermodi sind erprobt und können auch auf den H ₂ -Verbrennungsmotor angewendet werden
Lebensdauer	+ Experten erwarten, dass die BZ unter Berücksichtigung der Dimensionierung in der Lage ist, Lebensdaueranforderungen zu erfüllen	+ Der Wasserstoffmotor kann ähnliche Lebensdauer wie aktuelle Diesel- oder Gasmotoren erreichen, wenn bekannte Entwicklungsprozesse exerziert werden und kritische Komponenten in entsprechenden Serviceintervallen gewartet bzw. getauscht werden
Emissionen	+ 100% emissionsfreie Antriebsform, geringerer/kein Lärm (bei Langsamfahrten, Stillstand)	NO_x : Rohemissionen können durch entsprechend korrekt ausgelegte SCR-Abgasnachbehandlung auf das gesetzlich geforderte Niveau reduziert werden PN, HC, CO : nachweisbar; Rohemissionen weit unter gesetzlichen Limits Lärm : Geräuschemission geringfügig besser als die aktueller Dieselmotoren, aber in der gleichen Größenordnung
Kühlung		+ Keine Änderungen im Vergleich zum konventionellen Dieselantrieb zu erwarten
Fahrleistungen	+ Durch die rein elektrische Übertragung und Drehmomentcharakteristik des E-Motors Potenzial für deutlich bessere dynamische Fahrleistungen	Schlechteres transientes Ansprechverhalten im Vergleich zu Dieselmotor; Gegenmaßnahmen wie Erhöhung des Hubvolumens, externe Aufladung sowie Hybridisierung sind aber möglich

Tabelle 16: Fazit aus Kunden- und Herstellersicht (gelbe Farbe weist auf eine höhere/direkte Relevanz des Kriteriums für Kunden hin, blaue Farbe auf Relevanz für Hersteller)



08

Einsatz in anderen Anwendungen

08

Einsatz in anderen Anwendungen

Der Fokus der bisherigen Betrachtung lag auf der Anwendung im Fernverkehr, also für ein schweres Nutzfahrzeug mit hoher jährlicher Laufleistung. Für ein solches ist eine hohe Effizienz sehr wichtig, der Anschaffungspreis spielt hingegen lediglich eine eher untergeordnete Rolle. Vom Einsatzgebiet her ist die Anwendung ausschließlich außerhalb von Stadtzentren zu finden und wegen der typischerweise hohen Geschwindigkeit von 80 km/h ist die Kühlsituation aufgrund des Fahrtwinds eher entspannt.

Um die beiden wasserstoffbasierten Antriebsformen auch im Hinblick auf andere Anwendungen betrachten zu können, ist es sinnvoll, diese Anwendungen mit Hilfe von Kriterien zu beschreiben, die letztendlich für die Wettbewerbsfähigkeit der einen bzw. anderen Wasserstoffalternative ausschlaggebend sind.

Dies sind die wesentlichen Kriterien.

1. Wirkungsgrad: Ein sehr hoher Wirkungsgrad ist bei all jenen Anwendungen wichtig, die eine hohe Laufleistung haben. Darüber hinaus ist festzuhalten, dass das Thema Wirkungsgrad für Straßenanwendungen sehr wichtig, im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen, wie bspw. landwirtschaftliche Traktoren oder Baumaschinen, hingegen weniger relevant ist. Je niederlastiger die Anwendung ist, desto mehr Vorteile ergeben sich für einen BZ-Antrieb. Ist eine dauerhaft hohe Last gefordert, ist der H₂-Motor im Vorteil, jedoch unter der Annahme, dass die BZ nicht beliebig groß dimensioniert werden kann
2. Anschaffungskosten: Niedrigere Anschaffungskosten sind überall dort sehr wichtig, wo die Nutzung eher gering ist, d. h. in diesen Fällen ist kurz- und mittelfristig eher der H₂-Motor im Vorteil.
3. Lärm- und emissionssensible geographische Bereiche (zum Beispiel in Stadtzentren): Für solche Anwendungen

ist ganz klar der BZ-Antrieb im Vorteil. Typische Anwendungen wären bspw. Müllabfuhr, Stadtbusse, Paketzustellfahrzeuge und dergleichen. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass viele dieser Fahrzeuge je nach Anforderungsprofil derzeit bereits batterieelektrisch ausgeführt werden (können).

4. (Quasi)stationäre Anwendungen: Aufgrund der Herausforderungen in der Kühlung für den BZ-Antrieb sind stationäre bzw. quasistationäre Anwendungen (zum Beispiel Bagger, Radlader oder landwirtschaftliche Traktoren) aufgrund des fehlenden Fahrtwinds und der damit einhergehenden Kühlung tendenziell einfacher mit Hilfe eines Wasserstoffverbrennungsantriebs darstellbar. Durch die Notwendigkeit der Kühlung der H₂-BZ müsste ein Teil der Leistung des BZ-Systems für einen Lüfter aufgewendet werden, was sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirkt. JCB hat kürzlich einen Test mit einem Bagger mit BZ-Antrieb vorgestellt, d. h., die Kühlproblematik ist technisch beherrschbar, vergleichende Untersuchungen hinsichtlich Effizienz mit einem H₂-Motor, die diese Einschätzung bestätigen könnten, sind nicht verfügbar.
5. Tabelle 17 zeigt die „Übersetzung“ dieser Kriterien für andere Anwendungen, die neben dem Fernverkehr im Sinne der weltweiten Nachfrage ebenfalls eine große Rolle spielen.

Für den Verteilerverkehr könnte der BZ-Antrieb seine Stärken – wie Wirkungsgrad, geringerer Lärm und Emissionsfreiheit – ausspielen. Eine Herausforderung ist sicherlich der Anschaffungspreis, insbesondere im Wettbewerb mit batterieelektrischen Antrieben, die heute diese Applikationen schon größtenteils abdecken können. Der H₂-Motor-Antrieb scheint für solche Anwendungen nicht die erste Wahl zu sein, insbesondere auch aufgrund der nicht vollständigen Emissionsfreiheit. Für solche Anwendungen ist demnach

Kriterien	Mittelschwerer Verteilerverkehr	Leichter Verteilerverkehr	Schwertransport	Landwirtschaftliche Traktoren	Bagger
Hoher Wirkungsgrad	Gering	Gering	Gering	Gering	Gering
Niedrige Anschaffungskosten	Hoch	Hoch	Gering	Mittel	Mittel
Geringer/kein Lärm und geringe/keine Emissionen	Eher hoch	Hoch	Gering	Gering (im landwirtschaftlichen Einsatz)	Von gering bis hoch (z. B. Stadtbaustelle)
(Quasi)stationäre Anwendung	Nein	Nein	Nein	Eher ja	Ja

Tabelle 17: Kriterien für den Einsatz in anderen Anwendungen

Quelle: AVL

aus heutiger Sicht der BZ-Antrieb geeigneter, sofern er in den Anwendungsfeldern mit batterieelektrischen Antrieben konkurrieren kann.

Für den Schwertransport scheinen beide Wasserstoffalternativen gute Möglichkeiten zu haben. Tendenziell würde der H₂-Motor-Antrieb die Kriterien eher besser erfüllen (Wirkungsgradvorteile im Hochlastbereich, geringere Anschaffungskosten). Allerdings gibt es weder für noch gegen einen der beiden Antriebe Ausschlusskriterien.

Zitat eines Interviewteilnehmers:

... Wasserstoffmotor ist als Spezialanwendung denkbar, wo Kühlung ein unlösbares Thema ist, z. B. Baumaschinen und Kräne, Landmaschinen und Minen. Hier Brennstoffzelle wegen Kühlung und kaum vorhandenem Fahrtwind schwierig ...

Bei mobilen Arbeitsmaschinen – wie beispielsweise Baggern und landwirtschaftlichen Traktoren – sieht die Sache anders aus. Besonders der fehlende Fahrtwind ist ein wesentliches Kriterium, das für den H₂-Motor-Antrieb spricht. Zusätzlich spielen die kurz- und mittelfristig niedrigeren Anschaffungskosten eine Rolle. Für solche Anwendungen scheint daher der H₂-Motor-Antrieb besser geeignet zu sein. Allerdings ist hier festzuhalten, dass es einen Wettbewerb mit batterieelektrischen Antrieben gibt (je nach Leistungsklasse), und derzeit bereits Anwendungen mit BZ-Antrieben

getestet werden (beispielsweise Bagger von Hyundai oder der JCB-Bagger 220X).

Auch das Betrachten anderer Anwendungen neben dem Fernverkehr zeigt, dass sich aus heutiger Sicht kein klarer Favorit aus den beiden betrachteten Wasserstoffalternativen herausbildet. Besonders im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen sind Entwicklungen erst im Teststadium, weshalb eine Vielzahl von Daten noch nicht vorliegt. Auch in straßengebundenen leichteren Anwendungen gibt es noch nicht viele Erfahrungen mit Wasserstoff – der derzeitige Fokus liegt hier eher auf batterieelektrischen Antrieben. Vor diesem Hintergrund sind auch die folgenden Handlungsempfehlungen zu verstehen, die für Technologieoffenheit und Planbarkeit plädieren, um Anwendern und Herstellern die Möglichkeit zu geben, die für sie am besten umsetzbare Wasserstoffantriebsstrategie gestalten zu können.



09

Zusammenfassung

09

Zusammenfassung

9.1 Fazit

Hintergrund

Die vorliegende Studie vergleicht zwei wasserstoffbetriebene Antriebsarten für schwere Nutzfahrzeuge, den Wasserstoffmotor (H₂-Motor) und die Wasserstoff-Brennstoffzelle (H₂-BZ) im Kontext der Frage, welche Alternativen im Rahmen der zunehmenden Verschärfung der Klimagesetzgebung für den Schwerlastverkehr zur Verfügung stehen können. Batterieelektrische Antriebe, Oberleitungs-LKW oder der Einsatz synthetischer Kraftstoffe sind hierbei nicht Gegenstand der Analyse. Der Untersuchungsfokus liegt auf dem Einsatz von Wasserstoff im schweren Nutzfahrzeug für Fernverkehrsanwendungen am Beispiel des 40-Tonnen-Sattelzugs, da dieser den größten Anteil im Marktsegment der schweren Nutzfahrzeuge hat.

Für die beiden Alternativen H₂-Motor und H₂-BZ wurden im Rahmen der Studie mögliche technische Auslegungen identifiziert, die einen adäquaten Ersatz für das heutige Einsatzspektrum des Diesel-LKW bieten. Diese Auslegungsoptionen wurden hinsichtlich verschiedener Aspekte miteinander verglichen. Wasserstofftanksysteme im Fahrzeug wurden dabei nicht detailliert untersucht, weil es diesbezüglich zwischen beiden Antriebsvarianten keine Unterschiede gibt. Gleiches gilt für die Tankstelleninfrastruktur. Die Studienergebnisse werden in den nachfolgenden Ausführungen zusammengefasst.

Betrachtete Alternative Brennstoffzellenantrieb

Die für eine LKW-Anwendung erforderliche Leistung ist mit den derzeit verfügbaren Leistungsdichten von Brennstoffzellen auf Stapel- und Systemebene darstellbar. Im H₂-BZ-Fahrzeug ist das BZ-System auf die elektrische Dauerleistung ausgelegt. Die Energiemenge wird lediglich begrenzt von der Menge an mitgeführtem Wasserstoff (Tankkapazität).

Die Batterie liefert darüber hinaus die erforderliche Spitzenleistung. Diese BZ-Batterie-Hybridisierung bietet den Vorteil einer sehr hohen Flexibilität der Systemauslegung in Bezug auf unterschiedliche Nutzungsprofile (Use Cases). Die aktuell größte Herausforderung für die Umsetzung von Brennstoffzellenantrieben liegt in der Kühlung, da Brennstoffzellenantriebe unter Umständen eine vollständig neue Architektur des Kühlsystems im LKW erfordern. Für die Auswahl der im Rahmen der Studie untersuchten Varianten des Brennstoffzellensystems war zudem die Erfüllung der Anforderungen an die Dauer-Steigfähigkeit im Betrieb ein wesentliches Kriterium.

Für die im Kontext der TCO-Berechnung erforderliche Systemsimulation wurden zwei Varianten identifiziert. Variante I weist eine BZ-Systemleistung von 150 kW und eine Batteriekapazität von 140 kWh bei einer Motorleistung von 330 kW kontinuierlicher und 530 kW Spitzenleistung (30 sec) auf. Variante II verfügt über eine BZ-Systemleistung von 300 kW und eine Batteriekapazität von 70 kWh bei der gleichen Motorleistung wie Variante I. Bezüglich des Wirkungsgrads hat Variante II Vorteile gegenüber Variante I und ist bei entsprechenden Entwicklungsfortschritten der Brennstoffzellensysteme und den resultierenden Kostensenkungen das zukünftig zu bevorzugende Konzept. Für die Umsetzung in der kürzeren Frist bis 2025 erscheint Variante I aufgrund der geringeren Kosten wahrscheinlicher. In der TCO-Betrachtung wurden beide Konzepte für die Stichjahre 2025 und 2030 herangezogen.

Betrachtete Alternative Wasserstoffmotor

Bislang gibt es den H₂-Motor zwar nicht in Serie, er kann aber in verschiedenen Konstellationen die geforderte Leistungs- und Drehmomentcharakteristik bereitstellen. Die erste Generation von Wasserstoffmotoren im schweren Nutzfahrzeug in Europa würde dabei mit höchster Wahrscheinlichkeit ein zündkerzengezündetes Magerkonzept mit

niedrigem H₂-Einblasedruck darstellen, wobei die Integration von Zündkerze und Direkteinspritzung in das jeweilige Motorkonzept noch zu leisten ist. Die Umsetzung eines solchen Konzepts ist in der TCO-Betrachtung für das Jahr 2025 angenommen. Mittelfristig werden aufgrund der Anforderungen an Effizienz, Leistungsdichte und das transiente Ansprechverhalten voraussichtlich Verbrennungskonzepte mit nicht vorgemischter Verbrennung („Diffusionsverbrennung“) in den Fokus rücken. Eine baldige Serienfertigung könnte in Verbindung mit einer Diesel-Piloteinspritzung erfolgen, die im weiteren Verlauf in eine Wasserstoff-Hochdruck-Direkteinspritzung überführt werden müsste. Dies ist im Rahmen der TCO-Betrachtung für das Jahr 2030 unterstellt. Im Rahmen der TCO-Betrachtung wird zudem ein Hybridkonzept aus dem jeweiligen H₂-Motorkonzept in Kombination mit einer Batterie und einem E-Motor zur Verringerung des Verbrauchs mit Hilfe der Rekuperation analysiert.

Ergebnisse des alternativen Vergleichs

Technisch erscheinen beide wasserstoffbasierten Optionen für schwere Nutzfahrzeuge in einem Zeitraum bis 2025 realisierbar. Sowohl der H₂-Motor als auch die H₂-BZ weisen jedoch noch Entwicklungsrisiken auf. Beim H₂-Motor bestehen diese auf kurze Sicht vorrangig in der derzeit noch limitierten Anzahl an Zulieferern für Kernkomponenten wie Einspritzsysteme. Für den Zeitraum 2030+ liegt die Herausforderung insbesondere in der Umsetzung der Wasserstoff-Hochdruck-Direkteinspritzung, die erhebliche Effizienzverbesserungen verspricht, aber H₂-Hochdruckverdichter oder H₂-Kryogenpumpen erfordert, die heute für den mobilen Einsatz nicht vorhanden sind. Bei der H₂-BZ liegen die größten Risiken bis 2025 ebenso wie für den Zeitraum 2030+ in der Entwicklung einer adäquaten Kühlarchitektur und der raschen Realisierung von Kostensenkungen für die Brennstoffzellensysteme durch Skalierung, Industrialisierung der Fertigung und die Realisierung entsprechender Stückzahlen.

1) Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele

Vor dem Hintergrund der erforderlichen Beiträge zum Erreichen der Klimaschutzziele **weisen beide Konzepte ein sehr hohes CO₂-Reduktionspotenzial auf.** Die H₂-BZ ist diesbezüglich als vollständig emissionsfrei einzustufen, während beim H₂-Motor geringe Restemissionen verbleiben. Unter Berücksichtigung heute üblicher Schmierstoffverbräuche und moderater AdBlue-Verbräuche in der Abgas-

nachbehandlung des Verbrennungsprozesses ergeben sich für den H₂-Motor CO₂-Einsparungen von >98 % im Vergleich zum Dieselfahrzeug, selbst mit einer Diesel-Piloteinspritzung. **Auch bezüglich weiterer Emissionen ist die H₂-BZ im Vorteil, da sie lokal vollständig ohne die Freisetzung von Luftschadstoffen betrieben werden kann.** Beim H₂-Motor werden dagegen im Verbrennungsprozess weiterhin Luftschadstoffe wie Stickoxide (NO_x) freigesetzt, die allerdings durch eine Abgasnachbehandlung auf das gesetzlich geforderte Niveau reduziert werden können. Kohlenwasserstoff-, Kohlenmonoxid- und Partikelemissionen sind zwar nachweisbar, bleiben aber deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten.

2) Total Cost of Ownership

Der TCO-Vergleich der beiden Wasserstoffkonzepte sieht leichte Vorteile für die H₂-BZ, zeigt insgesamt jedoch lediglich geringe Unterschiede zwischen den beiden Technologien. Dabei weisen die Ergebnisse insbesondere kurzfristig für das Jahr 2025 eine starke Variabilität in Abhängigkeit von den Fahrzeuganschaffungskosten auf. Durch die erhebliche Schwankungsbreite der Angaben der zu erwartenden Kostenentwicklungen bei den Brennstoffzellen von 130 bis 750 EUR/kWh führt die TCO-Betrachtung zu keinem klaren Ergebnis. Werden für die Brennstoffzellenantriebe Kosten am unteren Ende der Bandbreite unterstellt, weisen die H₂-BZ mit ca. 717.000 EUR bzw. 718.000 EUR bereits 2025 günstigere TCO als die H₂-Motoren mit ca. 728.000 bzw. 738.000 EUR auf. Betrachtet man allerdings Werte am oberen Ende der Bandbreite, liegen die TCO der H₂-BZ mit ca. 824.000 EUR bzw. 916.000 EUR sehr deutlich über den TCO der H₂-Motoren mit 735.000 EUR bzw. 746.000 EUR, jeweils für das günstigste Wasserstoffkosten-Szenario. Die Schwankungsbreite der Anschaffungskosten für die H₂-Motoren ist wesentlich geringer, weil die Motorkomponenten weitgehend bekannt und die Entwicklungsrisiken somit als niedriger einzustufen sind. Daher kann man hier in puncto Planbarkeit der Kosten in der kurzen Frist bis 2025 Vorteile bei der H₂-Motor-Technologie sehen. Für die Betrachtung 2030+ weisen die H₂-BZ-Varianten sowohl bei der niedrigsten als auch bei der höchsten Kostenvariante niedrigere TCO auf als die beiden H₂-Motor-Varianten. Dies setzt allerdings voraus, dass die den angenommenen Kostensenkungen zugrundeliegenden Entwicklungs-, Skalierungs- und Industrialisierungsfortschritte realisiert werden können. Des Weiteren gelten die geringen Vorteile der H₂-BZ nur unter der Voraussetzung, dass auch der H₂-Motor bezüglich der Maut-

verpflichtung mit der H₂-BZ gleichgestellt wird und eine vollständige Mautbefreiung erhält. Sonst verschiebt sich das Verhältnis zu Ungunsten des H₂-Motors. Auch längere Fahrzeughaltedauern (zehn statt fünf Jahre) führen aufgrund der geringeren Wartungskosten der H₂-BZ zu einer Verschiebung zu deren Gunsten.

Im Vergleich zum Dieselmotor sind beide Wasserstoff-Konzepte kurzfristig in der TCO-Betrachtung nur wettbewerbsfähig, wenn ein Dieselpreis von mindestens 1,50 EUR pro Liter erreicht wird, gleichzeitig die Anschaffungskosten für die Wasserstoff-Konzepte am unteren Ende der Bandbreite liegen und die geringstmöglichen Wasserstoffkosten realisiert werden. Dies erscheint nur durch erhebliche politische Intervention, Fördermaßnahmen und eine entsprechende Marktentwicklung für Wasserstoff gesichert möglich. **Mittelfristig bis zum Jahr 2030 können sich über die avisierte Kostendegression bei den Wasserstoffantrieben Vorteile gegenüber dem Dieselantrieb einstellen, wenn entsprechend flankierende Rahmenbedingungen** wie eine weitere Verteuerung des Dieselmotors beispielsweise über eine CO₂-Bepreisung, die Freistellung der alternativen Antriebe von der Maut etc. gegeben sind. Wichtig für einen Markthochlauf der Wasserstoffantriebe ist darüber hinaus der Aufbau und die Verfügbarkeit einer flächendeckenden Tankinfrastruktur für Wasserstoff sowie die Verfügbarkeit von kostengünstigem, klimaneutralem Wasserstoff. Dies sind Grundvoraussetzungen für Investitionsentscheidungen zugunsten von Wasserstofftechnologien auf Seiten der Flottenbetreiber. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass in der TCO-Berechnung keine Restwerte berücksichtigt wurden, da für die beiden Wasserstoff-Varianten hierzu keine Erfahrungswerte vorliegen und aufgrund der aktuell nicht vorhandenen Zweitmärkte für den Weiterverkauf zudem keine seriösen Abschätzungen vorgenommen werden können.

Dies führte in der Betrachtung auch zu Haltedauern, welche die in der Praxis üblichen Haltedauern für Diesel-LKW von etwa drei Jahren mit anschließendem Wiederverkauf überschreiten. In diesem Kontext ist entscheidend, dass sich mindestens mittelfristig auch in Zweitmärkten Wasserstoffinfrastrukturen etablieren, damit erfolgreiche Weiterverkäufe von Fahrzeugen mit Wasserstoffantrieben in diese Zweitmärkte erfolgen können. Solange dies nicht der Fall ist, müssen etwaige Nachteile gegenüber der aktuell üblichen Fahrzeugnutzung mit sehr langen Reichweiten ohne Zwischentanken und kurzen Haltedauern mit raschem Wiederverkauf ausgeglichen werden, um den Umstieg auf die neu-

en Technologien zu erleichtern und gleichzeitig eine Schwächung der Wettbewerbsfähigkeit der Transporteure zu vermeiden, die neue Technologien einsetzen. Ein entsprechender Infrastrukturaufbau in Zweitmärkten ist auch deshalb essentiell, weil ein, insbesondere für den Wasserstoffmotor prinzipiell möglicher, Rückbau von Fahrzeugen zum konventionellen Dieselantrieb mit hohem Aufwand verbunden und ökonomisch aller Voraussicht nach nicht sinnvoll wäre.

3) Zuverlässigkeit

Für den Fahrzeugbetreiber stehen neben der reinen Kostenbetrachtung im Rahmen der TCO aufgrund des Einsatzzwecks und der damit verbundenen Laufleistung des Fahrzeugs auch die Kriterien maximaler Zuverlässigkeit im Vordergrund; nicht zuletzt aufgrund der erforderlichen Liefertreue innerhalb stark globalisierter Lieferketten. **Bezüglich der Zuverlässigkeit ist davon auszugehen, dass sowohl die H₂-BZ als auch der H₂-Motor den Kundenanforderungen genügen werden.** Die H₂-BZ punktet mit ihrer deutlich geringeren mechanischen Komplexität, muss aber zunächst noch in das Fahrzeug integriert werden. Die höhere Komplexität des H₂-Motors sollte durch die Verfügbarkeit der Komponenten und die Übertragbarkeit der Erkennungsmethodiken für Fehlermodi vom konventionellen Verbrennungsmotor kompensiert werden.

4) Änderungsbedarf bezüglich bestehender Fahrzeuge

Für den Fahrzeughersteller, der über seine Neufahrzeugflotte die gesetzlich geforderte Minderung der CO₂-Emissionen erreichen muss, steht einerseits das Emissionsverhalten des Fahrzeugs im Fokus. Andererseits sind auch **die Verfügbarkeit der Technologie, der Entwicklungsaufwand und die mögliche Auswirkungen der neuen Technologie auf die aktuellen Abläufe im Unternehmen** wichtige Aspekte. **Hier kann für Fahrzeughersteller der H₂-Motor klare Vorteile aufweisen**, da außer dem Tanksystem keine großen Veränderungen im Vergleich zum bisherigen Fahrzeug erforderlich sind. Der Antriebsstrang bedarf keiner wesentlichen Veränderungen, die bestehenden Zulieferstrukturen der Fahrzeughersteller können weitestgehend aufrechterhalten werden und es ist kein vollständig neues Know-how erforderlich.

Die höheren Anforderungen des H₂-BZ-Antriebsstrangs an die Fahrzeugkühlung und die Integration des elektrischen Antriebsstrangs erfordern einen deutlich größeren Änderungsbedarf bestehender Fahrzeugkonzepte als beim H₂-Motor.

5) Übertragbarkeit auf andere Anwendungen

Ebenfalls ein wichtiges Kriterium für Fahrzeughersteller ist die **Übertragbarkeit der Antriebskonzepte auf andere Fahrzeugtypen/-klassen**. Im Verteilerverkehr könnte der BZ-Antrieb seine Stärken wie höherer Wirkungsgrad, geringerer Lärm sowie lokale Emissionsfreiheit ausspielen, wobei er sich hier dem Wettbewerb mit batterieelektrischen Antrieben stellen muss, die diese Applikationen heute schon größtenteils abdecken können. Ein ähnlicher Wettbewerb ist auch hinsichtlich mobiler Arbeitsmaschinen, wie beispielsweise Bagger und landwirtschaftliche Traktoren, zu erwarten, wobei von den beiden betrachteten Alternativen der BZ-Antrieb aufgrund der fehlenden beziehungsweise zumindest begrenzten Kühlungsmöglichkeit durch Fahrtwind gegenüber dem H₂-Motor eher im Nachteil ist. **Für den Schwertransport weisen beide Wasserstoffalternativen Potenzial auf, wobei der H₂-Motor tendenziell Vorteile haben könnte**, falls er die Kriterien wie Wirkungsgrade im Hochlastbereich oder geringere Anschaffungskosten dauerhaft besser erfüllen kann als die H₂-BZ. Allerdings gibt es für keinen der beiden Antriebe strikte Ausschlusskriterien.

6) Vorteilhaftigkeit für Fahrzeugbetreiber

Stellt man beide Antriebskonzepte hinsichtlich ihrer Vorteilhaftigkeit aus Sicht des Fahrzeugbetreibers gegenüber, überwiegen die **Vorteile der H₂-BZ beim Fahrzeugbetreiber bzw. Kunden** insbesondere wegen der – durch den elektrischen Antriebsstrang bedingten – deutlich höheren dynamischen Fahrleistung, Emissionsfreiheit bezüglich Luftschadstoffemissionen und CO₂, geringeren Lärmemissionen sowie der geringeren Wartungskosten.

9.2 Handlungsempfehlungen

Vor dem Hintergrund des Pariser Klimaschutzabkommens, der Spürbarkeit erster Auswirkungen des Klimawandels und der daraus erwachsenen Dringlichkeit, erkennbare Fortschritte beim Klimaschutz zu erzielen, hat die EU sich zum Ziel gesetzt, bis spätestens 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Als erste Schritte wurden der europäische Green Deal verabschiedet und ein europäisches Klimagesetz entworfen. Zudem wurde eine Verschärfung des Treibhausgasminderungsziels für 2030 von aktuell –40 % auf –55 % (jeweils gegenüber 1990) vorgeschlagen. Diese angestrebte Zielverschärfung wird weitreichende Folgen für die Energiebereitstellung ebenso wie für alle energiever-

brauchenden Sektoren haben. Die derzeit für schwere Nutzfahrzeuge in der Europäischen Union geltende Richtlinie EU 2019/1242, die eine Reduktion der CO₂-Emissionen neu zugelassener Fahrzeuge von 15 % für das Jahr 2025 und von 30 % für das Jahr 2030 vorschreibt [EU 2019/1242], könnte hier zeitnah eine restriktive Erhöhung der gesetzlichen Anforderungen an das Emissionsverhalten der Fahrzeuge zur Folge haben. Dies wird den Druck auf die Fahrzeughersteller weiter erhöhen, eine raschere Diffusion CO₂-freier bzw. -armer alternativer Antriebe zu erreichen.

So verlangen die CO₂-Grenzwerte für schwere Nutzfahrzeuge nach heutigem Stand bis 2025 einen maximalen Anteil CO₂-emissionsfreier Fahrzeuge an den Neuzulassungen im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Bis 2030 kann der Anteil auf 20 % steigen. Vor dem Hintergrund der zu erwartenden weiteren Verschärfung der Grenzwerte, steigender Wettbewerbsfähigkeit und Nachfrage könnte dieser Anteil bis 2030 auf Werte bis 40 % steigen. Dies bedeutet, dass die Nachfrage nach klimaneutralen Antriebsalternativen dynamisch wachsen muss, ohne dass bislang eine klare Technologiepräferenz erkennbar wäre.

Hinzu kommt, dass die vielschichtigen kundenseitigen Einsatzszenarien für schwere Nutzfahrzeuge, die damit verbundenen unterschiedlichsten Transportaufgaben und die hieraus resultierenden stark variierenden Anforderungen an die Fahrzeuge eine hohe Zahl an Fahrzeugvarianten im Nutzfahrzeugmarkt erfordern. Diese notwendige Vielfalt legt derzeit das Verfolgen mehrerer alternativer Technologiepfade nahe, da alle ihre Stärken für spezielle Anwendungen aufweisen.

Mit Blick auf die hier diskutierten wasserstoffbasierten Antriebsoptionen der H₂-BZ und des H₂-Motors ist festzuhalten, dass beide Technologieoptionen noch Entwicklungsbedarf aufweisen. Keine der beiden Technologien ist bislang marktreif, so dass noch keine Marktentscheidung bezüglich des dominanten Designs möglich ist. Es erscheint daher zielführend, zunächst die Entwicklung beider Technologieoptionen gleichermaßen ohne Vorfestlegung zu unterstützen. Denn das frühe Entwicklungsstadium beider Technologieoptionen erfordert eine offene Förderung, die es den Herstellern ermöglicht, den für sie jeweils besten Pfad zu CO₂-neutralen Antrieben zu beschreiten bzw. die für sie vielversprechendste Technologie zur Marktreife zu führen. Die im Folgenden formulierten Handlungsempfehlungen fokussieren, dem Auftrag der Studie entsprechend, ausschließlich auf die beiden untersuchten wasserstoffbasierten Konzepte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass der Wasserstoffmotor gerade in der kurzen und mittleren Frist bis 2025 bzw. 2030, aber auch darüber hinaus eine sinnvolle Ergänzung zum Brennstoffzellenantrieb im schweren Nutzfahrzeug darstellen kann. Die deutlich höheren Entwicklungsrisiken bei der Brennstoffzelle rechtfertigen die parallele Entwicklung beider Technologien, auch wenn langfristig die Brennstoffzelle eher das Potenzial hat, sich zur führenden (Wasserstoff-)Technologie im Güterverkehr zu entwickeln. Die Brennstoffzelle weist geringere Wartungskosten, eine hohe Effizienz und hohe Kostensenkungspotenziale auf, sofern sie die industrielle Serienfertigung erreicht. So kann sie die niedrigeren Total Cost of Ownership erreichen, vorausgesetzt ihr Entwicklungspotenzial kann voll ausgeschöpft werden. Dies ist aber angesichts der prognostizierten Marktdurchdringung emissionsfreier bzw. -armer Fahrzeuge nicht als gesichert anzusehen. Da der H₂-Motor herstellerseitig gegebenenfalls leichter und schneller in größerer Stückzahl umsetzbar ist und geringere Unsicherheiten bezüglich der Kostenentwicklung bestehen, sollte er dem Wasserstoff den Weg in die Anwendung im Güterverkehr (mit)ebnen. Die kurzfristig deutlich geringeren Entwicklungsrisiken erlauben hier ggf. einen schnellen Markteinstieg für die Wasserstofftechnologien.

Sollte die H₂-Brennstoffzelle die Erwartungen hinsichtlich der technischen Integration ins Fahrzeug, der Entwicklung, Skalierung und Industrialisierung der Fertigungsprozesse und der Realisierung der hierdurch erzielbaren Kostensenkungspotenziale vollständig erfüllen können, wird sie dem H₂-Motor langfristig überlegen sein. Da Forschungs- und Entwicklungsbudgets sowohl bei den Fahrzeugherstellern als auch auf staatlicher Seite begrenzt sind, drängt sich die Frage auf, ob eine parallele Förderung beider Technologien tatsächlich zielführend erscheint oder ob eine Fokussierung auf die langfristig aussichtsreichere Technologie – die H₂-Brennstoffzelle – erfolgen sollte. Mit Blick auf das frühe Entwicklungsstadium und die hierdurch verbleibenden Realisierungsrisiken bei gleichzeitig hohem Erfolgsdruck bis 2030 erscheint der Zeitpunkt für eine Fokussierung jedoch zu früh. Keine der beiden Technologien hat bislang Marktreife erreicht, geschweige denn eine ausreichende Erprobung in der Praxis erfahren.

Auf Seiten der Hersteller zeichnet sich ebenfalls noch keine klare Technologieentscheidung ab. Beide Technologiestränge, H₂-Motor und H₂-Brennstoffzelle, werden aktuell parallel verfolgt. Je nach Hersteller liegt dabei der Fokus eher auf

der einen oder auf der anderen Technologie, wobei mehr Aktivitäten bei der Brennstoffzelle zu verzeichnen sind. Ein Grund dafür könnte der noch deutlich höhere fahrzeugseitige Anpassungsbedarf für den Brennstoffzellenantrieb im schweren Nutzfahrzeug sein.

Eine einseitige Fokussierung auf die Brennstoffzelle könnte jedoch die Gefahr bergen, dass bei verzögerter Erschließung der Kostensenkungspotenziale der Brennstoffzellen-Technologie die Diffusion der Fahrzeuge in den Markt zu langsam stattfindet, weil die Fahrzeugbetreiber aufgrund der hohen Total Cost of Ownership einem Technologiewechsel gegenüber zurückhaltend bleiben. Um diese Situation aufzulösen, bedürfte es im schlechtesten Fall hoher Fördermittel über einen längeren Zeitraum. Der Einsatz des H₂-Motors als Brückentechnologie könnte die benötigten Mittel dagegen deutlich verringern.

Für eine erfolgreiche Umsetzung ist zudem eine eindeutige Festlegung der Speichertechnologie für Wasserstoff in den Nutzfahrzeugen des Fernverkehrs erforderlich, die gleichermaßen für Brennstoffzellenanwendungen und Wasserstoff im Verbrennungsmotor zur Anwendung kommen muss. Gleichzeitig ist eine den Anforderungen beider Technologien genügende Wasserstoffreinheit als Mindeststandard erforderlich.

Damit sich Wasserstoff im Güterverkehr – unabhängig vom umgesetzten Antriebskonzept – als klimaneutraler Energieträger der Zukunft etablieren kann, sind von der Politik über ihre Rahmensetzung einige wichtige Grundvoraussetzungen zu schaffen. An erster Stelle steht der Aufbau einer flächendeckenden Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff in schweren Nutzfahrzeugen. Dies gilt im ersten Schritt für Deutschland und die europäischen Nachbarstaaten als mögliche Zielländer im Rahmen der zu bewältigenden Transportaufgaben der Fahrzeuge in ihrer Erstanwendung. Hier gilt es, Zielsetzungen zu formulieren und deren Umsetzung durch die Schaffung von Anreizen über Fördermittel oder die Festlegung des gesetzlichen Rahmens zu sichern. Um den Infrastrukturaufbau rechtfertigen zu können, sollte das verbleibende Entwicklungsrisiko der Technologien möglichst gering sein. Da beide Wasserstoffantriebskonzepte noch Risiken aufweisen, diese jedoch unterschiedlicher Art sind, erscheint es auch vor diesem Hintergrund zielführend, beide Technologien parallel zu entwickeln.

Um eine langfristige Diffusion von Wasserstoffantrieben zu ermöglichen, ist es zudem im zweiten Schritt möglichst zeitnah erforderlich, entsprechende Wasserstoff-Versorgungsinfrastrukturen auch in den Ländern zu etablieren, die als typische Zweitmärkte für Fernverkehrsfahrzeuge aus Westeuropa fungieren. Hier könnte die Initiierung länderübergreifender Initiativen helfen, den Infrastrukturaufbau voranzutreiben. Erfolgt dies nicht, erscheint es zumindest vor dem Hintergrund der heute üblichen kurzen Fahrzeughaltedauern von ca. drei Jahren und des anschließenden Weiterverkaufs in Zweitmärkte fraglich, ob Fuhrparkbetreiber und Logistikunternehmen kurzfristig zu einem Technologieumstieg bereit sind, der deutliche Verhaltensänderungen erfordert.

Neben dem Infrastrukturaufbau ist die Verfügbarkeit von klimaneutralem Wasserstoff zu günstigen Kosten ein entscheidendes Kriterium für die Investitionsentscheidung von Fahrzeugbetreibern. Solange diese Verfügbarkeit in ausreichender Menge nicht gesichert scheint, werden sich wasserstoffbetriebene Antriebskonzepte nicht etablieren. Dabei ist es für die Fahrzeugbetreiber zunächst nicht ausschlaggebend, ob es sich bei dem an der Tankstelle bereitgestellten Wasserstoff um grünen, blauen oder grauen, CO₂-freien, CO₂-armen oder CO₂-behafteten Wasserstoff handelt, solange er zu planbaren Kosten in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht. Hier ist es Aufgabe der Politik, beispielsweise über die Umsetzung der nationalen Wasserstoff-Strategie, die Schaffung eines verlässlichen Rechtsrahmens für Wasserstoffproduzenten, die Ausweitung der Ziele und Ausschreibungsmengen für die erneuerbare Stromerzeugung und weitere politische Rahmensetzungen die Bereitstellung von klimaneutralem Wasserstoff in ausreichenden Mengen zu wettbewerbsfähigen Kosten in Deutschland zu ermöglichen.

Da die TCO-Analysen sehr deutlich zeigen, dass die Wasserstoff-Konzepte mit dem konventionellen Dieselfahrzeug nur unter entsprechend günstigen Randbedingungen konkurrenzfähig sein werden, ist es zudem erforderlich, diese günstigen Randbedingungen zu etablieren. Zentral ist hier die Befreiung von der Mautverpflichtung für beide wasserstoffbetriebenen Antriebsalternativen.

Auf Seiten der Fahrzeugbetreiber könnten zudem Förderinstrumente wie Zuschüsse zu den Anschaffungskosten die Investitionsentscheidung positiv beeinflussen. Um hier gleichzeitig die erforderlichen Verhaltensänderungen im Hinblick auf längere Haltedauern anzureizen, könnte eine solche Förderung in Abhängigkeit von einer Mindesthaltedauer gewährt

werden. Dies könnte, gerade auch im Hinblick auf die steigenden Anforderungen an eine klimaneutrale Logistikkette, den Transporteuren den Einstieg in die wasserstoffbasierte Logistik ermöglichen, erfordert aber ggf. die Abkehr von etablierten Verhaltensweisen und typischen Nutzungsprofilen. Denn einerseits wird aktuell auf kurze Fahrzeughaltedauern und raschen Weiterverkauf fokussiert, während andererseits sehr große Fahrzeugreichweiten mit hohen Tankvolumina verlangt werden, um ein kraftstoffpreisoptimiertes Tanken zu erlauben, um nur einige Beispiele zu nennen. Um hier Verhaltensänderungen zu ermöglichen, sind ggf. weiterführende Maßnahmen auf nationaler und/oder europäischer Ebene erforderlich, die die aktuell bestehenden Nachteile für alternative Antriebe ausgleichen.

Neben Förderinstrumenten zur Unterstützung der Marktdiffusion sollte auch der weitere technologische Fortschritt gezielt durch Forschungs- und Entwicklungsförderung unterstützt werden. So sollten sowohl die offenen Fragen bezüglich der Skalierung und Industrialisierung der Fertigung für Brennstoffzellenfahrzeuge und der Kühlarchitektur als auch die Herausforderungen des Wasserstoffmotors, insbesondere die Umsetzung der Wasserstoff-Hochdruck-Direkteinspritzung und die Verfügbarkeit und technische Umsetzung von H₂-Hochdruckverdichter oder H₂-Kryogenpumpen für den mobilen Einsatz, gezielt adressiert werden.

Literaturverzeichnis

- [ACEA 2020]
ACEA Paper: CO₂ emissions from heavy-duty vehicles – Preliminary CO₂ baseline (Q3–Q4 2019), März 2020
- [ACEA_2 2020]
ACEA Position Paper: Views on proposals for Euro 7 emission standard; Dezember 2020
- [ACEA 2021]
<https://www.acea.be/publications/article/factsheet-trucks>, Zugriff am 19.04.2021
- [ANL 2018]
Technology Assessment of a Fuel Cell Vehicle: 2017 Toyota Mirai, Aragon National Lab, Januar 2018
- [APCUK 2021]
Advanced Propulsion Center United Kingdom (APCUK) and Automotive Council United Kingdom, Fuel Cell Roadmap 2020, Februar 2021
- [ARNBERGER 2018]
Arnberger, A. et al.; Commercial Natural Gas Vehicles: Tomorrow's Engine Technologies for most stringent NO_x and CO₂ Targets; ATZ, MTZ Conference; 2018, Baden Baden
- [ARNBERGER 2021]
Arnberger et al.; Der Wasserstoffmotor im Nfz: Brückentechnologie oder langfristige Lösung?; ATZ/MTZ Konferenz, 2021, Baden Baden
- [ATZ 2020]
ATZheavy duty; Ausgabe 01/2020; Technologieszenarien zur Erfüllung der kommenden EU-CO₂-Nutzfahrzeugflottenziele
- [AUTOMI 2021]
<https://www.automobil-industrie.vogel.de/wasserstoff-im-lkw-man-plant-praxistests-ab-2023-a-972891/>; Zugriff am 19.04.2021
- [BARNSTEDT 2015]
Barnstedt, D., Eichlseder, H., Schaffer, K., Fasch, S., Lepik, L.; Entwicklung eines Wasserstoff/Diesel DualFuel-Motors für den Einsatz in Nahverkehrs-Nutzfahrzeugen; 10. Tagung Gasfahrzeuge, Stuttgart, 2015
- [DAI 2020]
Daimler Trucks präsentiert Technologiestrategie für Elektrifizierung – Weltpremiere des Mercedes-Benz Brennstoffzellen-Konzept-Lkw, abgerufen von www.daimler-truck-fuelcell.com am 27.02.2020
- [DOE 2017]
Department of Energy (DOE), Fuel Cell System Cost – 2017, November 2017
- [DOE 2019]
Department of Energy (DOE), program review presentation "Fuel cell systems analysis", Mai 2019
- [DOE, 2020]
<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/doe-technical-targets-fuel-cell-systems-and-stacks-transportation-applications>, Zugriff am 19.04.2021
- [DOE 2021]
Vehicle Technologies office of the US Department of Energy, <https://www.energy.gov/eere/vehicles/vehicle-technologies-office>, Zugriff am 27.01.2021
- [E4tech, 2019]
FUEL CELL INDUSTRY REVIEW 2019, E4tech
- [EICHLSEDER 2010]
Eichlseder H. et al.; Konzepte für dieselähnliche Wasserstoffverbrennung; MTZ Motortechnische Zeitschrift; 71, S 60–66 (2010)
- [EICHLSEDER, KLELL 2010]
Eichlseder, H., Klell, M.; Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik; 2. Auflage, 2010, Wiesbaden, S. 152 f.
- [ENKE 2007]
Enke, W., Gruber, M., Hecht, L. et al.; Der bivalente V12-Motor des BMW Hydrogen 7. MTZ Motortech Z 68, 446–453 (2007). <https://doi.org/10.1007/BF03227411>
- [EPA 2016]
EPA, Final Rule for Phase 2 Greenhouse Gas Emissions Standards and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-duty Engines and Vehicles, 2016; Zugriff am 27.01.2021
- [EU 1222/2009]
Verordnung (EG) Nr. 1222/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter
- [EU 2017/2400]
Verordnung (EU) 2017/2400 der Kommission vom 12. Dezember 2017 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen
- [EU 2018/956]
Verordnung (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Juni 2018 über die Überwachung und Meldung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs neuer schwerer Nutzfahrzeuge
- [EU 2019/318]
Verordnung (EU) 2019/318 der Kommission vom 19. Februar 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/2400 sowie der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen
- [EU 2019/1242]
Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge
- [EU 2020]
EU, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, Juli 2020, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5602f358-c136-11ea-b3a4-01aa75ed71a1/language-en>; Zugriff am 19.04.2021
- [EUP2 2020]
<https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20190412IPR39009/parlament-bestatigt-neue-CO2-emissionsgrenzwerte-fur-lkws>; Zugriff am 15.12.2020
- [FCH, 2020]
FCH Study report Fuel Cell Hydrogen Trucks, Dezember 2020, <https://www.fch.europa.eu/publications/study-fuel-cells-hydrogen-trucks>; Zugriff am 19.04.2021
- [GRABNER 2009]
Grabner, P.; Potentiale eines Wasserstoffmotors mit innerer Gemischbildung hinsichtlich Wirkungsgrad, Emissionen und Leistung. Doctoral Thesis, Graz University of Technology, 2009
- [GREENCAR 2021]
https://www.greencarcongress.com/2006/06/shell_man_and_c.html; Zugriff am 28.01.2021
- [H2.live, 2020]
<https://H2.live/wasserstoffautos>; Zugriff am 27.11.2020
- [Hoepke und Breuer 2013]
Hoepke, Erich, Breuer, Stefan; Nutzfahrzeugtechnik; Grundlagen, Systeme, Komponenten; Springer Verlag; 2013
- [HYUNDAI 2021]
<https://hyundai-hm.com/>, Zugriff am 01.02.2021
- [ICCT 2017]
Fuel efficiency technology in European heavy-duty vehicles: Baseline and potential for the 2020–2030 time frame, published by ICCT; Juli 2017
- [ICCT 2018]
Policy Update, Certification of CO₂ Emissions and Fuel Consumption of On-Road Heavy-Duty Vehicles in the European Union, Februar 2018
- [ICCT 2019]
INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION, CO₂ standards for HDV in the EU, April 2019

[IEA 2019]
The Future of Hydrogen, Report prepared by the IEA for the G20, Japan, Juni 2019

[IRENA 2020]
IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, 2020

[JRC, 2014]
WELL-TO-WHEELS Report Version 4.a,
JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS, JRC 2014

[JRC, 2020]
JEC Tank-To-Wheels report v5: Heavy duty vehicles,
JRC 2020

[LBST 2020]
LBST, INTERNATIONAL HYDROGEN STRATEGIES,
A study commissioned by and in cooperation with the
World Energy Council Germany, September 2020

[LO 2016]
lastauto omnibus, Praxistest bei der Spedition
Fehrenkötter, Ausgabe 12/2016

[LOK 2016]
lastauto omnibus Katalog 2016, Nr. 45

[MAN 2020]
<https://press.mantruckandbus.com/corporate/zero-emission-roadmap-vorgestellt/>; Zugriff am 11.09.2020

[MAZDA 2020]
<https://www.mazda.com/en/innovation/technology/env/hre/>;
Zugriff am 15.12.2020

[MCTAGGERT 2019]
McTaggart-Cowan G. et al.; Evaluation of a Hot-Surface Ignition System for a Direct-Injection of Natural Gas Engine; ICEF2018-9734, V001T03A027; Westport Fuel Systems, BC, Canada; 2019

[NATKIN 2007]
Natkin, R., Denlinger, A., Younkins, M., Weimer, A. et al.; "Ford 6.8L Hydrogen IC Engine for the E-450 Shuttle Van", SAE Technical Paper 2007-01-4096, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-4096>.

[ÖAMTC 2021]
<https://www.oeamtc.at/poi/tollroad/sm-05>; Zugriff am 09.03.2021

[PAUER 2020]
Pauer, T. at al; H₂ ICE für zukünftige PKWs und leichte Nutzfahrzeuge; 41. Wiener Motorsymposium, Wien, 2020

[RICARDO 2019]
Heavy Duty Truck Cooling Challenges, Fuel Cell Seminar & Energy Exposition, November 2019

[SCANIA 2021]
Scania and Westport Fuel Systems will cooperate in hydrogen research project; Zugriff am 21.01.2021

[Spiegel, 2020]
<https://www.spiegel.de/auto/deutsche-bahn-kuendigt-probebetrieb-mit-wasserstoffzug-fuer-2024-an-a-2992c027-1129-4890-8899-4103849f31d9>,
Zugriff am 27.11.2020

[TESLA 2020]
<https://www.tesla.com/semi>; Zugriff am 11.09.2020

[UBA 2020]
Homepage des Umweltbundesamtes, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/verkehrs-laerm/strassenverkehrs-laerm#welche-faktoren-haben-einen-einfluss-auf-den-strassenverkehrslarm> und https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/position_kurzfristig_kaum_laermminderung_im_verkehr.pdf, abgerufen am 03.03.2021

[VECTO 2019]
https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en; Zugriff am 19.04.2021

[VECTO 3.3.9.2175]
User Manual VECTO Tool, Release date 15th of December, 2020; Version 3.3.9.2175

[VOLVO 2021]
<https://www.volvotrucks.de/de-de/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-Ing.html>; Zugriff am 03.03.2021

[WESTERKAMP 1939]
Westerkamp, L.; Der Erren-Wasserstoffmotor, in: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Heft 19, 1939, S. 523–524

[WFSINC 2021]
<https://wfsinc.com/our-solutions/hpdi-2.0#section2>;
Zugriff am 12.01.2021

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schrittweises Vorgehen und Aufbau der Studie	14
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges	15
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines H ₂ -Motor-Antriebsstranges	15
Abbildung 4: Fahrzeuguntergruppen gemäß der CO ₂ -Gesetzgebung	19
Abbildung 5: Anteil von Luftwiderstand und Rollwiderstand am Gesamtfahrwiderstand eines 40-t-Sattelzugs mit 410 PS ..	21
Abbildung 6: Beispiel für Kundenanforderungen an ein Fernverkehrsfahrzeug	22
Abbildung 7: Energieaufteilung im Antriebsstrang	23
Abbildung 8: Reichweite eines schweren Nutzfahrzeugs in Abhängigkeit vom Netto-Tankvolumen	26
Abbildung 9: Erhebungen von [E4tech, 2019]	31
Abbildung 10: Darstellung PEM-Brennstoffzelle	31
Abbildung 11: Übersicht eines Brennstoffzellensystems (BZ-Stapel und BoP-Komponenten)	33
Abbildung 12: Brennstoffzellen-Wirkungsgrad-Kennlinie (Netto-Systemwirkungsgrad vs. Netto-Systemleistung)	34
Abbildung 13: Wirkungsgrad-Kennlinien (konservativ und zukünftig) des BZ-Systems	38
Abbildung 14: Rohemissionsverhalten des Wasserstoffmotors: vorgemischte Verbrennung	40
Abbildung 15: Rohemissionsverhalten des Wasserstoffmotors: frühe (blau) und späte (rot) Einblaselage (EB)	41
Abbildung 16: Spezifische NO _x -Rohemission über Motordrehzahl und effektivem Mitteldruck	42
Abbildung 17: Spezifische HC- und CO-Emissionen über Motordrehzahl und effektivem Mitteldruck	43
Abbildung 18: Übersicht ottomotorischer Magerkonzepte	44
Abbildung 19: Übersicht der Eigenschaften der Direkteinblasung (Fokus: Übernahme bestehender Motorkomponenten)	45
Abbildung 20: Konzepte mit Selbst- oder Dieselizeündung	45
Abbildung 21: Abgasnachbehandlung zur Erfüllung der aktuellen Emissionsgesetzgebung (Euro VI)	48
Abbildung 22: Mögliche Abgasnachbehandlungskonzepte zur Erfüllung künftiger Anforderungen an niedrigste NO _x -Emissionen	48
Abbildung 23: MAN sieht H ₂ -BZ und H ₂ -Motor im Portfolio vor, wobei der H ₂ -Motor als „die schneller verfügbare und robuste Lösung“ gesehen wird	49
Abbildung 24: Wirkungsgradkennfeld (basierend auf einem Deutz 7,8-l-Motor) und Bild eines Wasserstoffmotors mit hervorgehobenen Keyou-Komponenten	50
Abbildung 25: Spezifische NO _x -Rohemission über Motordrehzahl und effektivem Mitteldruck	51
Abbildung 26: Effektiver Wirkungsgrad eines H ₂ -HP-DI Wasserstoffmotors in Abhängigkeit vom aktuellen Tankdruck unter Berücksichtigung der Kompressorarbeit	52
Abbildung 27: Westport-HP-DI-System. Für die Erdgas-Hochdruckversorgung sorgt eine LNG-Pumpe, die im LNG-Tank integriert ist	53
Abbildung 28: Fahrzeugpreise für die Jahre 2025 und 2030+ für unterschiedliche Varianten	59
Abbildung 29: Fahrzyklus VECTO Regional Delivery (RD)	61
Abbildung 30: Fahrzyklus VECTO Long Haul (LH)	61
Abbildung 31: Vergleich des Energieverbrauchs für unterschiedliche Antriebsstrang-Varianten	62
Abbildung 32: Wasserstoffpreise für unterschiedliche Treibstoffkostenentwicklungsszenarien	63
Abbildung 33: Spezifische Wasserstoffpreise für unterschiedliche Treibstoffkostenentwicklungsszenarien	63
Abbildung 34: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2025	66
Abbildung 35: TCO-Entwicklung der Alternativen mit Bezugsjahr 2025 und einer Haltedauer von fünf Jahren	67
Abbildung 36: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2030+	68
Abbildung 37: TCO-Entwicklung der Alternativen mit Bezugsjahr 2030 und einer Haltedauer von fünf Jahren	69
Abbildung 38: TCO für Anschaffung im Jahr 2025, Haltedauer zehn Jahre	70
Abbildung 39: TCO für Anschaffung im Jahr 2030, Haltedauer zehn Jahre	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkaufszahlen gemäß ACEA-Erhebung	19
Tabelle 2: Technische Daten eines typischen Fernverkehr-LKWs	20
Tabelle 3: Übersicht europäischer Fernverkehrsfahrzeuge	20
Tabelle 4: Übersicht der Energieverbräuche exemplarisch für das Modelljahr 2025 auf unterschiedlichen Fahrzyklen	24
Tabelle 5: Übersicht laufender H ₂ -BZ-Projekte mit schweren Nutzfahrzeugen	37
Tabelle 6: Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Diesel und Methan	39
Tabelle 7: Arbeitsprinzipien und effektive Wirkungsgrade der beiden in der TCO-Rechnung verwendeten Wasserstoffmotorkonzepte	47
Tabelle 8: Annahmen zur Definition der Anschaffungskosten	58
Tabelle 9: Gewichtung und Nutzlastfaktoren der vier Fahrprofile der Fahrzeuguntergruppe 5-LH	60
Tabelle 10: Ausgaben für Reparaturen, Service, Instandhaltung, Prüfungskosten, Schmierstoffe/Öle, Reinigung, Kommunikation (zwischen Fahrer, Spedition, Kunden ...) sowie Ausfallkosten	64
Tabelle 11: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2025	65
Tabelle 12: Ergebnisse der TCO-Rechnung für unterschiedliche Varianten für 2030+	67
Tabelle 13: TCO für Anschaffung im Jahr 2025, Haltedauer zehn Jahre	69
Tabelle 14: TCO für die Anschaffung im Jahr 2030, Haltedauer zehn Jahre	70
Tabelle 15: TCO-Ergebnisse für Dieselfahrzeuge für Anschaffung im Jahr 2025, verschiedene Dieselpreise, eine Haltedauer von fünf Jahren sowie 100 % Maut	71
Tabelle 16: Fazit aus Kunden- und Herstellersicht	77
Tabelle 17: Kriterien für den Einsatz in anderen Anwendungen	81

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
AMS	Air Management System
AMT	Automatisiertes Handschaltgetriebe (Automated Manual Transmission)
ARB	Anodenrezirkulationsgebläse (Anode Recirculation Blower)
BMEP	Effektiver Mitteldruck (Brake Mean Effective Pressure)
BOL	Anfang Lebensdauer (Beginning of Life)
BoP	Balance of Plant (periphere Nebenaggregate, z. B. im BZ-System)
BZ	Brennstoffzelle
CAPEX	Investitionskosten (Capital Expenditures)
CCS	Carbon Capture and Storage
CO	Kohlenmonoxidemissionen
DEF	Diesel Exhaust Fluid (wie AdBlue)
DOC	Diesel-Oxidation-Katalysator
DPF	Diesel Partikel Filter
EB _{DI}	Einspritzbeginn Direkteinspritzung
EOL	Ende der Nutzungs- oder Betriebsdauer in einer Anwendung (End of Life)
ESS	Energiesparsystem
EU	Europäische Union
H ₂ -Motor	Wasserstoffverbrennungsmotor (Verbrennungskraftmaschine)
HC	Kohlenwasserstoffemissionen
HP-DI	Hochdruck-Direkteinblasung (High Pressure Direct Injection)
ICCT	International Council on Clean Transportation
LH (-Truck)	Fernverkehr(-LKW) (Long Haul)
LNT	Lean NO _x Trap
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier
LP-DI	Niederdruck-Direkteinblasung (Low Pressure Direct Injection)
MJ/MY	Modelljahr (Model Year)
NFZ	Nutzfahrzeug
NO _x	Stickoxide (NO, NO ₂)
N ₂ O	Lachgasemissionen
NT-PEMFC	Niedertemperatur-PEMFC
OPEX	Betriebskosten (Operational Expenditures)
PEMFC	Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)
PM	Partikelmasse (Particulate Matter)
PN	Partikelanzahl (Particulate Number)
PTO	Power take-off
ROI	Return on Investment
ROZ	Research-Oktanzahl
SCR	Selektive katalytische Reduktion (Selective Catalytic Reduction)
TCO	Gesamtbetriebskosten (Total Cost Of Ownership)
TTW	Tank zu Rad (Tank to Wheel)
VECTO	Fahrzeugsimulations-Tools zur Verbrauchsermittlung (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool)
WHTC	World Harmonized Transient Test Cycle
WTW	Quelle zu Rad (Well to Wheel)
ZEV	Null-Emissions-Fahrzeug (Zero Emission Vehicle)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht
ZLEV	Zero and Low Emission Vehicle

Anhang – Experteninterviews

Zielsetzung

Ein wesentlicher Punkt in der Studie ist der Vergleich zwischen einem Wasserstoffmotor und einer Brennstoffzelle, wobei auch die „Basis“, also ein LKW mit einem herkömmlichen Antrieb als Referenz berücksichtigt werden soll. Um hierfür sicherzustellen, dass alle wesentlichen Kriterien berücksichtigt und entsprechend gewichtet sind, wurden Experteninterviews geplant.

Auswahl der Interviewpartner

Die Interviewpartner wurden gemeinsam mit der e-mobil BW ausgewählt, um eine möglichst ausgewogene Rückmeldung zum Technologievergleich H₂-BZ und H₂-Motor zu erhalten. Aus den Bereichen Hersteller, Zulieferer, Forschung und Entwicklung und Nutzer wurden jeweils mehrere Firmen und Ansprechpartner über ein mit der e-mobil BW gemeinsam formuliertes Anschreiben zur Interviewteilnahme angefragt. Die Bereitschaft zur Teilnahme an dem Telefon-Interview war erfreulich hoch, weshalb im Dezember 2020 und im Januar 2021 insgesamt 20 Interviews durchgeführt werden konnten. Bei manchen Firmen wurden zwei Interviews durchgeführt, um die jeweilige Sicht der Experten für beide Konzepte abbilden zu können.

Die wenigsten Interviewpartner waren mit einer namentlichen Nennung einverstanden. Aus Vertraulichkeitsgründen vor allem bei den interviewten Firmen wurde mehrheitlich lediglich die Nennung der Branche zugestanden. Aus diesem Grund wurde entschieden, generell auf eine Namensnennung von Interviewpartnern zu verzichten, auch wenn diese die Aussagekraft der Interview-Ergebnisse natürlich stark verbessern würde. Aus nachvollziehbaren Gründen der Vertraulichkeit geht das leider nicht. Dennoch kann festgehalten werden, dass die Interviewpartner durchweg anerkannte Experten auf ihrem Gebiet sind beziehungsweise als Geschäftsführer oder mindestens in leitender Management-Funktion die Interessen der jeweiligen Firmen nach außen vertreten.

Die Interviews teilen sich wie folgt auf die jeweiligen Branchen auf

Zulieferer bzw. Komponentenhersteller: 5 Unternehmen
Fahrzeughersteller: 4 Unternehmen und 1 Autohaus (einige mit 2 Interviews)
Nutzer: 2 Speditionen
Politik und Forschung: 5 Teilnehmer
Infrastruktur: 2 Teilnehmer

Fragen an die Interviewpartner

Einige Fragen an die Interviewpartner waren im Vorfeld abgestimmt und gaben damit den groben Ablauf des Interviews vor.

Allgemein

- Vorstellung der Teilnehmer
- Vertraulichkeit der Informationen – dürfen Details genannt werden, wenn ja, welche (Name/Firma/Branche ...)?

Inhaltlich

- Wann erwarten Sie den technischen Reifegrad von Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle auf einem vergleichbaren Niveau zum Dieselfahrzeug?
- Wie sehen Sie TCO (OPEX und CAPEX) von Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle (vgl. hydrogenouncil.com)?
- Welche Erwartung haben Sie in Bezug auf die Erfüllung der Gesetzgebung (Emissionen, CO₂)?
- Welche Auswirkungen sehen Sie auf Zuverlässigkeit, Lebensdauer oder Lärm?
- Welche möglichen Auswirkungen auf das Fahrzeug erwarten Sie (Bauraum wegen anderer Komponenten, Kühlung (!), Kabinenheizung und -kühlung etc.)?

In dieser Interview-Agenda wurden je nach Interviewpartner unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt. Bei allen Interviews entstand eine über die eigentlichen Fragen hinausge-

hende angeregte Diskussion. Die Dauer der Telefoninterviews war auf 30 Minuten angesetzt, alle Interviews dauerten aber mindestens eine Stunde, einige sogar noch länger. Allein dies zeigt schon sehr deutlich das große Interesse der Interviewpartner an diesem Thema.

Ergebnisse der Interviews

Wie nicht anders zu erwarten, ergaben sich je nach Interviewpartner sehr unterschiedliche Bewertungen der beiden Antriebsvarianten Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle. Und um dies gleich vorwegzunehmen: Es gab auch nach den durchgeführten Interviews keinen klaren Favoriten.

Technischer Reifegrad

Auf die Frage nach dem technischen Reifegrad der beiden Technologien Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle im Vergleich zueinander, aber auch im Vergleich zu Diesel ergab sich kein klarer Sieger. Je nach Betrachtung sah der eine oder andere Interviewpartner den Wasserstoffmotor oder die Brennstoffzelle auf einem aktuell höheren technischen Reifegrad.

Von besonderem Interesse sind hier eventuell die Rückmeldungen der Interviewpartner, die sich entweder persönlich mit beiden oder allen drei Technologien gut auskennen oder deren Häuser sich mit allen Technologien intensiver befassen. Interessanterweise ergab aber auch das keinen klaren Favoriten.

Beide Technologien werden einen annähernd vergleichbaren technischen Reifegrad etwa um 2025 erreichen. Etwa um 2030 wird der technische Reifegrad des Diesels erreicht werden können. Immer unter der Voraussetzung, dass sich die Entwicklungen Stand heute auch industrialisieren lassen und keine aus heutiger Sicht unvorhersehbaren unlösbaren Herausforderungen auftreten.

Dass die Entwicklungsbudgets in einigen Häusern für Wasserstoffmotor und Brennstoffzelle unterschiedlich hoch sind, kann als Hinweis in Bezug auf die Erwartungen in diese oder jene Technologie gewertet werden.

TCO-Betrachtung

Die TCO-Betrachtung geht in der Regel von mehr oder weniger belastbaren Annahmen aus. Einige dieser Annahmen wären eine eigene Studie wert. Daher ist es interessant zu sehen, welche Annahmen mit welchem Gewicht in die

TCO-Betrachtung mit eingehen.

Ausschlaggebend ist beispielsweise der Durchrechnungszeitraum für die TCO-Ergebnisse. Bei schweren Fernverkehrsfahrzeugen werden TCO-Betrachtungen heutzutage für eine kurze (typischerweise dreijährige) Haltedauer und einen hohen Weiterverkaufswert (mindestens 1/3 der CAPEX) durchgeführt. Ein solcher Zeitraum führt dazu, dass hohe CAPEX und unsichere Weiterverkaufswerte stark ins Gewicht fallen, wohingegen sehr effiziente Antriebe mit niedrigeren OPEX nur einen kurzen Zeitraum haben, um zum Tragen zu kommen. Für neue Technologien mit anfangs hohen Anschaffungskosten stellt dieser Zusammenhang eine Hürde dar.

Einige Interviewpartner sehen ein erhebliches Risiko bei den häufig optimistischen Annahmen zur Kostenentwicklung der Brennstoffzelle. Gleichzeitig weiß man aber, dass zum Beispiel die Batteriekosten sich auch in den letzten Jahren sehr deutlich reduziert haben, obwohl diese zu einem Großteil von den Materialkosten abhängen, die bei der BZ zweitrangig sind. Eine Analogie muss nicht zwangsläufig für die Brennstoffzelle gelten, ist aber auch nicht unrealistisch.

Maßgeblichen Einfluss auf die TCO-Betrachtung im Vergleich zum Diesel haben die jeweiligen politischen Rahmenbedingungen, z. B. CO₂-Bepreisung (Einfluss auf Dieselpreis), Befreiung von Mautgebühr etc. Vor allem auch die Kosten für Wasserstoff spielen an dieser Stelle eine wesentliche Rolle.

Erwartung zur Erfüllung der Gesetzgebung

Der Verbrennungsmotor allgemein hat (u. a. wegen des Dieselskandals) nach Meinung der Interviewpartner in der Politik einen schlechten Ruf; das gilt auch für den Wasserstoffmotor. Die zentrale Frage scheint daher zu sein, wie der Wasserstoffmotor in Bezug auf Zero-Emission bewertet werden wird. Die Brennstoffzelle hat in der Politik ein positives Image in Bezug auf Zero-Emission-Technologie.

EURO VII wird nach Meinung der meisten Interviewpartner mit beiden Wasserstofftechnologien zu erreichen sein. Der Wasserstoffmotor erzeugt immer mehr Schadstoff-Emissionen als die Brennstoffzelle, aber nach aktuell möglicher Abgasnachbehandlung in kaum messbaren Mengen.

Der Gesetzgebung wird eine entscheidende Rolle zugeschrieben, explizit auch in Bezug auf die Mautbefreiung, die

Kraftstoffsteuer und die CO₂-Bepreisung bei Diesel und Wasserstoff (sofern nicht komplett CO₂-neutral hergestellt).

Auswirkungen auf Zuverlässigkeit, Lebensdauer oder Lärm

Die Zuverlässigkeit der Wasserstoff-Technologien wird im Vergleich zum Diesel unterschiedlich bewertet. Stand heute fehlt es noch an Langzeiterfahrungen für beide alternativen Antriebsstrangtechnologien. Es wird aber davon ausgegangen, dass sowohl der Wasserstoffmotor als auch die Brennstoffzelle die Zuverlässigkeit von Diesel erreichen können. Einige Interviewpartner trauen der Brennstoffzelle wegen der reduzierten Anzahl beweglicher Teile in Zukunft eine höhere Zuverlässigkeit zu als Diesel- oder Wasserstoffmotor. Beim Thema Lebensdauer ergibt sich ein uneinheitliches Bild innerhalb der Interviews. Einige sehen das Thema Lebensdauer bei der H₂-BZ als fast unlösbare Herausforderung, andere dagegen wiederum beim H₂-Motor. Viele BZ-Experten sehen das Thema Lebensdauer als durchaus lösbare Herausforderung für die H₂-BZ; umgekehrt aber genauso auch die H₂-Motor-Experten.

Lärm ist bei der H₂-BZ ohnehin kein Thema. Bei Fahrten mit niedriger Geschwindigkeit ist ein Brennstoffzellen-Antriebsstrang sehr leise. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt die Lautstärke zwar deutlich zu, hier dominieren dann aber auch die sonstigen Fahrgeräusche. Bei nächtlicher Anlieferung ist nach Meinung vieler Interviewpartner die H₂-BZ klar im Vorteil gegenüber dem H₂-Motor. Im Vergleich zu Diesel ist der H₂-Motor in Bezug auf Lärm etwa gleichauf.

Auswirkungen auf das Fahrzeug

Die Kühlung ist im H₂-BZ-Antriebsstrang eine der zentralen Herausforderungen. Der im LKW zur Verfügung stehende Einbaureaum für den Kühler ist begrenzt und limitiert daher die Dauerlastfähigkeit des BZ-Systems. Neue Kühlkonzepte werden intensiv erprobt, allerdings wird es laut eines Interviewteilmehrs wohl beim klassischen Kühlkonzept auch bei der H₂-BZ bleiben. Ein BZ-Experte ist der Meinung, dass die Batterie die Kühlproblematik der H₂-BZ lösen kann und muss. Damit kommt wieder der Hybridisierungsstrategie eine besondere Bedeutung zu.

Kabinenheizung und -kühlung waren in keinem der Interviews ein größeres Thema.

Wasserstoff-Infrastruktur

Bei fast allen Interviews war auch die Wasserstoff-Infrastruktur ein großes Thema. Weil beide wasserstoffbasierten Technologien hiervon betroffen sind, scheint dies allerdings ein eher geringes Unterscheidungsmerkmal zu sein. Dennoch ist die Meinung der Interviewteilnehmer hierzu durchaus interessant.

Nach wie vor unklar zu sein scheint, in welcher Form (Aggregatzustand, Druckstufe, chemisch gebunden etc.) der Kraftstoff H₂ verteilt, vertrieben und im Fahrzeug gespeichert wird. Die 700-bar-Technologie hat sich für PKW wegen der zunehmenden Verfügbarkeit von Tankstellen quasi etabliert, auch wenn sie nach Meinung einiger Interviewpartner nicht optimal ist. Die bei weitem häufigsten Probleme bei 700-bar-Tankstellen bereitet die Kühlung auf ca. minus 40 °C. Auch die Kosten für Tanksysteme sind für die 700-bar-Technologie am höchsten; einige Interviewteilnehmer sehen auch wenig Potenzial für eine deutliche Kostenreduktion (EUR pro kg gespeichertem H₂).

Lediglich eine Handvoll der aktuell knapp 100 Wasserstoff-Tankstellen in Deutschland ist derzeit in der Lage, einen LKW mit 350 bar zu betanken. Die aktuellen 700 bar-Betankungsprotokolle sehen maximal 10 kg pro Tankvorgang vor und auch die Hochdruck-Zwischenspeicher (ca. 900 bar) hätten nicht die Kapazität für einen LKW-Betankungsvorgang von mehr als 30 kg.

Flüssigwasserstoff (LH₂) ist nach Meinung einiger Interviewpartner wegen hoher Kosten durch Verflüssigung aus Sicht der Tankstellen-Infrastruktur nicht optimal. Etwa 30 % des Energieinhalts von H₂ sind für die Verflüssigung aufzuwenden (siehe auch Kapitel 6.3.1). Für einen Interviewteilmehrer ist dies gar ein „Showstopper“ für LH₂ wegen des Wirkungsgrads. Aus Fahrzeugsicht dagegen punktet LH₂ wegen deutlich geringerer Tankkosten im Vergleich zu 700-bar-Tanksystemen (nur etwa 1/3 nach Meinung einiger Interviewpartner).

Ein Interviewpartner ist der Meinung, dass LH₂ bei Verteilung und Vertrieb hingegen dauerhaft teurer ist im Vergleich zu einer flächendeckenden Druck-H₂-Pipeline-Infrastruktur.

Einige Interviewpartner sehen Druck-H₂ bei 500 bar als Optimum in Bezug auf H₂-Kosten, Tankkosten und Reichweite der Fahrzeuge.

Impressum

Herausgeber

e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue
Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg

Autoren

AVL
Dipl.-Ing. Kerstin Mayr, Dr. Franz Hofer,
Dipl.-Ing. (FH) Gilbert Ragowsky,
Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Gruber, Dipl.-Ing. Anton Arnberger

ZSW

Dr. Alexander Kabza, M. Sc. Patrick Wolf,
Dipl.-Ing. Maike Schmidt, Dr. Ludwig Jörissen

Redaktion und Koordination der Studie

e-mobil BW GmbH
Dr. Manuel C. Schaloske

Layout/Satz/Illustration

markentrieb
Die Kraft für Marketing und Vertrieb

Fotos

Umschlag: AVL
Die Quellennachweise aller weiteren Bilder befinden
sich auf der jeweiligen Seite.

Druck

Karl Elser Druck GmbH
Kißlingweg 35
75417 Mühlacker

Auslieferung und Vertrieb

e-mobil BW GmbH
Leuschnerstraße 45
70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0
Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de
www.e-mobilbw.de

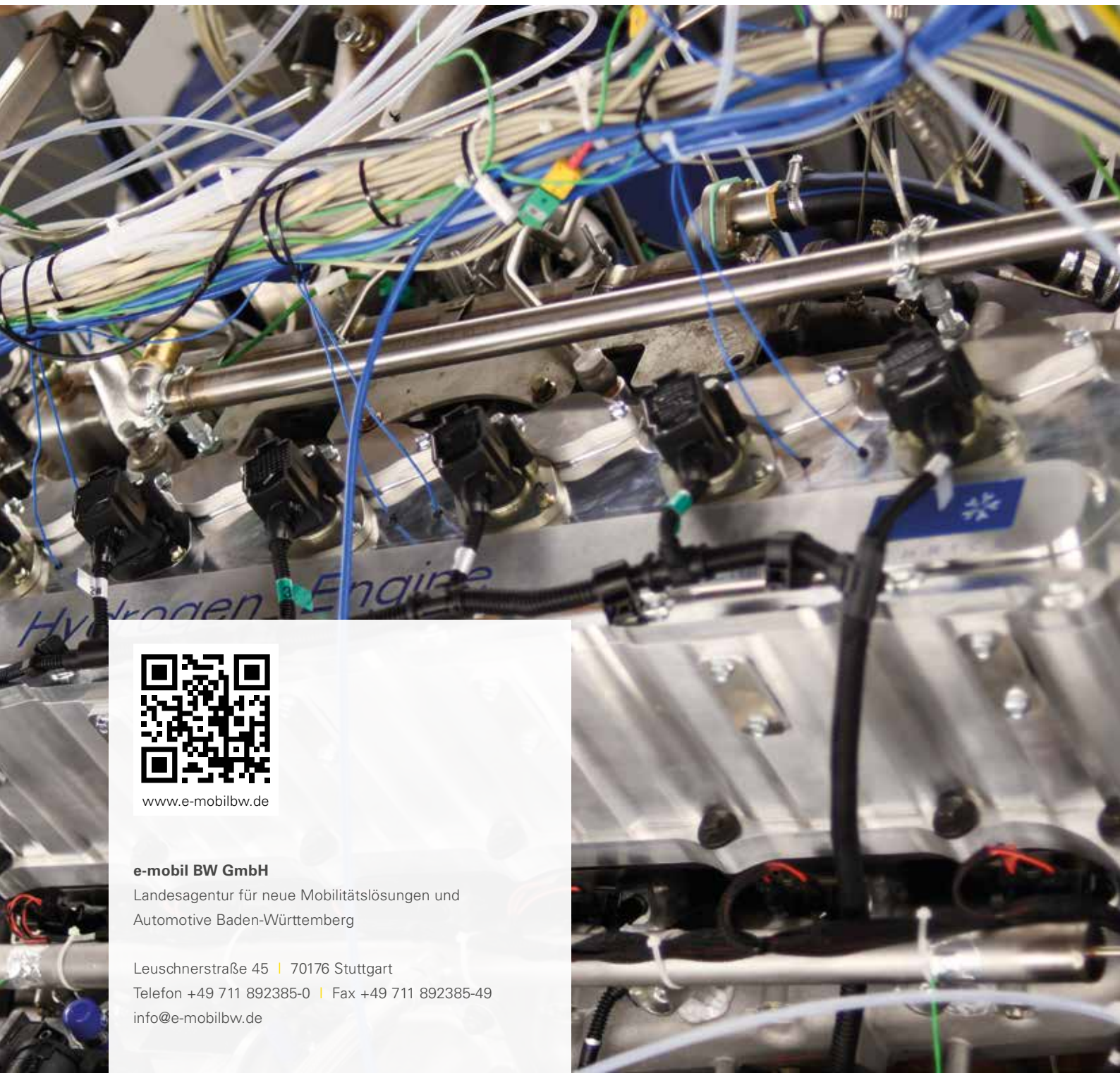
Genereller Hinweis

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei
Personenbezeichnungen und personenbezogenen
Hauptwörtern in dieser Studie die männliche Form
verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne
der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter.
Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe
und beinhaltet keine Wertung.

Juli 2021

© Copyright liegt bei den Herausgebern

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk ist einschließlich seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Herausgebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Für die Richtigkeit der Herstellerangaben wird keine Gewähr übernommen.



www.e-mobilbw.de

e-mobil BW GmbH

Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und
Automotive Baden-Württemberg

Leuschnerstraße 45 | 70176 Stuttgart
Telefon +49 711 892385-0 | Fax +49 711 892385-49
info@e-mobilbw.de