


Trends und Herausforderungen bei der Entwicklung von Wasserstoffmotoren

Heiko Kubach*, Manuel Bucherer, David Gerber, Moritz Grüninger, Alexander Heinz, Sebastian Knapp, Thomas Koch, David Leimann, Uwe Wagner und Jonathan Ziegler

DOI: 10.1002/cite.202300119

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Mobilität können Wasserstoffmotoren vor allem im Bereich der Nutzfahrzeuge einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Basistechnologie der Motoren ist bereits vorhanden und kann durch geringe Modifikationen angepasst werden. Der vorliegende Artikel beschreibt Trends bei der Wasserstoffmotorenentwicklung und wie deren Herausforderungen gemeistert werden können. Neben Aspekten der Infrastruktur und des Gesamtfahrzeugkonzepts stehen vor allem die Punkte Gemischbildung, Verbrennung und Emissionen im Fokus.

Schlagwörter: Mobilität, Motorenentwicklung, Verbrennung, Wasserstoff

Eingegangen: 01. August 2023; *revidiert:* 28. September 2023; *akzeptiert:* 27. November 2023

Trends and Challenges in the Development of Hydrogen Engines

On the way to climate-neutral mobility, hydrogen engines can make a decisive contribution, especially in the area of commercial vehicles. The basic technology of the engines is already available and can be adapted through minor modifications. This article describes trends in hydrogen engine development and how their challenges can be overcome. In addition to aspects of infrastructure and the overall vehicle concept, the main focus is on the points of mixture formation, combustion and emissions.


Keywords: Combustion, Engine development, Hydrogen, Mobility

1 Einleitung

Individuelle Mobilität und Gütertransport stellen zwei wichtige Säulen des Wohlstandes einer Gesellschaft dar. Die Energieversorgung dieser Sektoren basiert noch zum größten Teil auf fossilen Quellen. Der damit einhergehende Ausstoß von Kohlendioxid trägt seinen Teil zum Klimawandel bei. Bereits im Jahr 2015 herrschte unter den allermeisten Nationen der Konsens, dass geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssen, um den CO₂-Ausstoß zu reduzieren [1]. Die geplante Nutzung von sogenannten erneuerbaren Energien meist in Form von elektrischer Energie aus Sonnen-, Wind- und Wasserkraft bedingt eine Anpassung der entsprechenden Fahrzeugantriebe. Die direkte Nutzung von elektrischer Energie mittels batteriebasierter, elektromotorischer Antrieben gewinnt zunehmend an Bedeutung vor allem im Segment der Personenkraftwagen und hier speziell im Kurz- und Mittelstreckenbereich. Im schweren Nutzfahrzeug mit hohen Nutzlasten und sehr langen Wegstrecken spielt diese Antriebsart keine wesentliche Rolle. Zu hoch sind die Kosten für die Produktion der Batterie und deren Gewicht. Eine sehr große


Herausforderung würde hier auch die flächendeckende Ladeinfrastruktur darstellen. Ebenfalls nachteilig wäre eine starke Abhängigkeit von China bezüglich der notwendigen Rohstoffversorgung für die Batteriezellen und nicht konkurrenzfähige Energiepreise für die energieintensive Batterieproduktion, was eine Verlagerung von Teilen der Wertschöpfungskette weg von den traditionellen Motorenherstellern bedeuten würde.

Als Alternative stellen sich chemische Energiespeicher dar, allen voran grüner Wasserstoff. Er kann durch Elektrolyse mittels „erneuerbarer“ elektrischer Energie hergestellt

¹Dr. Heiko Kubach  <https://orcid.org/0000-0001-6706-8892> (heiko.kubach@kit.edu),

¹Manuel Bucherer  <https://orcid.org/0009-0006-2636-0268>,

¹David Gerber, ¹Moritz Grüninger

 <https://orcid.org/0000-0002-4837-3151>,

¹Alexander Heinz, ¹Sebastian Knapp, ¹Dr. Thomas Koch,

¹David Leimann, ¹Dr. Uwe Wagner, ¹Jonathan Ziegler

¹Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Kolbenmaschinen, Rintheimer Querallee 2, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

werden. Oft wird die mangelnde Gesamteffizienz angeführt, wenn der Vergleich zur direkten Nutzung der elektrischen Energie per Batterie und Elektromotor hergestellt wird. Hier darf aber die Nutzungseffizienz der Energiewandlung von Primärenergie (Sonne, Wind, Wasser) in elektrische Energie nicht außer Acht gelassen werden. Steht ein Windrad in Deutschland und kann direkt in das hiesige Stromnetz integriert werden, ist der Wirkungsgradvorteil der rein elektrischen Nutzungskette gegeben. In anderen Weltregionen kann das gleiche Windrad allerdings ein Vielfaches an Strom erzeugen, ohne dass dieser hier im Stromnetz genutzt werden kann. Eine chemische Speicherung bietet sich dann an. Ein solcher Vergleich ist in [2] dargestellt. Der Unterschied im Gesamtwirkungsgrad wird dadurch minimiert. Prinzipiell kann der so hergestellte Wasserstoff in einer Brennstoffzelle rückverstromt und in einem elektrischen Antriebstrang verwendet werden. Die Brennstoffzelle besitzt vor allem im mittleren Lastbereich einen sehr guten Wirkungsgrad. Um diesen zu nutzen müssen werden Brennstoffzellenstacks tendenziell etwas überdimensioniert, was zu einer Kostensteigerung führt und eine relativ teure Technologie darstellt [3]. Im hohen Lastbereich stellt die Abfuhr der Verlustwärme auf geringem Temperaturniveau von ca. 100 °C eine Herausforderung dar. Positiv hervorzuheben ist die Schadstofffreiheit des Umwandlungsproduktes. Die zweite Möglichkeit ist die Verbrennung des Wasserstoffs in einem angepassten Verbrennungsmotor. Hier kommen mehrere Vorteile zum Tragen. Der optimale Betriebspunkt des Motors liegt nahe an dem Lastbereich, in dem die Motoren in einer Realfahrt typischerweise betrieben werden. Die Motoren benötigen im Gegensatz zur Brennstoffzelle keine besondere Wasserstoffqualität, was kostendämpfend wirkt. Wasserstoffmotoren können mit vergleichsweise geringen technischen Modifikationen aufbauend auf bestehenden Motoren hergestellt werden. Insgesamt bietet dieser Antrieb also einen deutlichen Kostenvorteil. Bleibt die Frage nach den Schadstoffemissionen. Kohlenstoffhaltige Schadstoffe wie CO, CO₂ oder HC können bei einem Wasserstoffmotor nur aus dem Schmieröl kommen und sind vernachlässigbar [4]. Die wesentlichen Schadstoffe sind hier Stickoxidverbindungen. Auf innermotorischem Wege können die Rohemissionen beispielsweise bereits durch Magerbetrieb oder Abgasrückführung auf ein sehr niedriges Niveau gebracht werden. Wo nötig werden zur Unterschreitung geltender Grenzwerte katalytische Abgasnachbehandlungstechnologien eingesetzt.

2 Herausforderungen und Entwicklungsbedarf

2.1 Motorenentwicklung

Die Energieumsetzung im Wasserstoffmotor basiert auf dem verbrennungsmotorischen Prinzip, welches seit Jahrzehnten optimiert und weiter erforscht wird. Der Entwick-

lung effizienter und robuster Wasserstoffmotoren kommt somit eine über Jahre hinweg gesammelte Expertise zugute. Dies ermöglicht neben der Neuentwicklung von Wasserstoffmotoren eine Umrüstung bestehender Verbrennungsmotoren durch Anpassung einzelner Komponenten mit überschaubarem Aufwand. In beiden Fällen besteht aufgrund der physikalischen und chemischen Eigenschaften von Wasserstoff ein erhöhter Entwicklungsbedarf einzelner Komponenten. Aufgrund des hohen Diffusionsvermögens steht insbesondere die erforderliche Dichtheit wasserstoffführender Bauteile im Vordergrund, um einen sicheren Betrieb zu garantieren. Die im Vergleich zu anderen Gasen geringe Schmierfähigkeit von Wasserstoff erschwert die Entwicklung robuster und langlebiger Injektoren. Einige Hersteller greifen auf eine Fremdschmierung durch Schmieröl in Kleinstmengen zurück, um den Verschleiß der Injektor-nadel und des Nadelsitzes zu verringern. Gleichzeitig ist die Exaktheit der eingebrachten Kraftstoffmasse in jedem Zyklus Voraussetzung für einen kontrollierbaren und zuverlässigen Motorbetrieb. Abhängig vom Einblasezeitpunkt, dem Einblasedruck sowie von der Geometrie, welche beispielsweise mittels strahlformender Blaskappen unterschiedlich realisiert wird, entsteht ein Gemisch mit Luft. Die Homogenisierung des Gemischs steht dabei im Fokus der Injektorentwicklung und wird meist von CFD-Simulationen gestützt. Ebenso ist die Auslegung von Zündsystemen wichtiger Bestandteil der Entwicklung von Wasserstoffmotoren. Ein zuverlässiger Betrieb ohne Zündaussetzer ist notwendig. Dabei müssen Hot Spots vermieden werden, die aufgrund der niedrigen erforderlichen Zündenergie als Vorentflammungsquelle dienen können. Ein besonderes Augenmerk liegt daher auf einem geringen Wärmewert, also einer möglichst kalten Zündkerze.

2.2 Infrastruktur

Um den flächendeckenden Einsatz von Wasserstoffantriebssystemen im Straßenverkehr effizient und nachhaltig zu gestalten, ist neben der erforderlichen Marktreife der Energiewandlungssysteme inklusive aller zugehöriger Komponenten die Verfügbarkeit einer engmaschig ausgebauten Wasserstoff-Infrastruktur entscheidend. Abhängig vom Konzept des jeweiligen Wasserstoff-Antriebssystems und der Tanksysteme, ist bei deren Befüllung neben der erforderlichen Reinheit des Wasserstoffs der Aggregatzustand sowie das Druckniveau des Energieträgers zu berücksichtigen. Je nach Anwendungsfall wird der Wasserstoff meist entweder gasförmig (GH₂, gaseous hydrogen) bei Drücken zwischen 300 bar und 700 bar oder flüssig (LH₂, liquid hydrogen) tiefkalt bei Temperaturen < 20,3 K gespeichert und in entsprechenden Tanksystemen mitgeführt. Die hohen Drücke bei der gasförmigen Speicherung sowie die niedrigen Temperaturen bei der flüssigen Speicherung stellen in Zusammenhang mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Energieträgers Wasserstoff

besondere Herausforderungen an Speichersysteme und Infrastruktur. Insbesondere die Beständigkeit der Materialien gegen Versprödung muss bei gegebener Sicherheit und Systemdichtheit stets garantiert sein. Gleichzeitig müssen Verluste beim Tankvorgang minimiert werden. [5]

Während sich Zulieferer wie Mahle bereit für den Wasserstoffmotor sehen [6] und erste Hersteller bereits eine zeitnahe Serienproduktion von Wasserstoffmotoren planen [7], sind auch Typ 4-GH₂-Druckbehälter (350 bar und 700 bar) bereits kommerziell verfügbar. Der Betankungsvorgang mit GH₂ ist gegenüber der Aufladung einer Batterie kurz. In wenigen Minuten ist der GH₂-Fahrzeugtank gefüllt und die Dauer der Betankung damit vergleichbar mit der Betankung eines herkömmlichen Benzin- oder Dieseltanks. [5]

Die Verfügbarkeit von Wasserstoff-Tankstellen ist jedoch noch ausbaufähig. Neben den derzeit (Stand 12.07.2023) 165 eröffneten 700 bar-GH₂-Tankstellen in Europa befinden sich aktuell 44 weitere in Realisierung, wobei Deutschland mit 91 vorhandenen und 19 geplanten 700 bar-GH₂-Tankstellen Vorreiter in Europa ist. Auch bei den 64 eröffneten und 71 geplanten 350 bar-GH₂-Tankstellen ist Deutschland mit 20 eröffneten bzw. 44 geplanten Tankstellen führend. [8]

Während die Zahlen geplanter GH₂-Tankstellen Hoffnung auf einen schnellen Ausbau des GH₂-Netzes erwecken, besteht bei der Bereitstellung flüssigen Wasserstoffs weiterhin Handlungsbedarf. Neben dem großen Aufwand für die Aufbereitung des LH₂ stellen die niedrigen Temperaturen einen besonderen Entwicklungsbedarf für Kryo-speicher und Infrastruktur (Leitungen, Ventile, Kupplungen) dar. Dabei steht die Minimierung von Verlusten durch Wärmeeintrag, Abdampfen und Kaltfahren (Abkühlung der Leitungen unter den kritischen Punkt) im Vordergrund. [5, 9, 10]

Durch die genannten Herausforderungen ist die Bereitstellung von LH₂ schwierig, sodass derzeit nur an wenigen Standorten LH₂ gespeichert oder direkt vor Ort mittels Elektrolyse erzeugt wird [9].

2.3 Tankanlagen Kryo vs. Hochdruck gasförmig

Bei der Auslegung von Wasserstoffantrieben und deren Tanksystemen ist die Wahl des Aggregatzustands sowie des Druckniveaus in besonderem Maße von der erforderlichen Reichweite bei gegebenem Platzangebot und Fahrzeuggewicht abhängig. Verglichen mit Kohlenwasserstoffen ist die volumetrische Speicherdichte im Allgemeinen niedrig, sodass verhältnismäßig große Tankvolumina erforderlich sind; unabhängig davon, ob GH₂ oder LH₂ mitgeführt wird. Zwar besitzt 1 m³ tiefkalter LH₂ bei -253 °C fast den doppelten Energieinhalt im Vergleich zu 1 m³ GH₂ bei 750 bar und 25 °C, s. Tab. 1. Trotzdem ist der Einsatz von LH₂ im Vergleich zu GH₂ aufgrund des hohen Energiebedarfs in der Aufbereitung nicht immer vorteilhaft und muss mit den Vorteilen von GH₂ abgewogen werden.

Tabelle 1. Eigenschaften von Wasserstoff [5].

Aggregatzustand	gasförmig	flüssig
Druck [bar]	750	1
Volumen [m ³]	1	1
Temperatur [°C]	25	-253
Energiegehalt [MJ]	4276	8495
Energieinhalt [kWh]	1188	2360

2.4 Einsatzfähigkeit und Kraftstoffpreis

Im Rahmen von Testbetrieben wurde die Einsatzfähigkeit unterschiedlicher Fahrzeuge mit Wasserstoffmotor bereits über mehrere Jahre aufgezeigt. So wurden beispielsweise zwischen 2005 und 2010 im Rahmen des Clean Energy Partnerships (CEP) vier Busse mit Wasserstoffmotoren mit je 150 kW auf insgesamt 497 000 km getestet. Als Fazit wurde dabei gezogen, dass Zuverlässigkeit sowie Verfügbarkeit vergleichbar zum Dieselbus sind, Kraftstoffkosten jedoch noch höher sind als beim Diesel-Pendant. [11]

Im April 2023 betrug der Wasserstoffpreis 13,85 € pro kg GH₂ [12]. Unter der Annahme gleicher Wirkungsgrade eines Wasserstoffmotors und eines Dieselmotors sowie einem Dieselpreis von 1,60 € L⁻¹ ≈ 1,92 € kg⁻¹ [13] muss somit der ca. 2,5-fache Preis gezahlt werden, um dieselbe Energiemenge umzusetzen ($H_{u, H_2}/H_{u, Diesel} = 2,817$ [14]). Dabei unberücksichtigt bleibt, dass der Wasserstoff-Drucktank nicht komplett leergefahren werden kann sowie weitere Faktoren, wie zusätzliches Tankgewicht, Steuerung u.v.m.

2.5 Sicherheit

Wasserstoff bildet in einem weiten Konzentrationsbereich ein zündfähiges Gemisch mit Luft und besitzt verglichen mit anderen Luft-Kraftstoffgemischen eine geringe minimale Zündenergie. Aus Brennverfahrensicht bietet dies zahlreiche Vorteile (s.u.), birgt jedoch auch einige sicherheitsrelevante Herausforderungen. So wird Wasserstoff in der sogenannten CLP-Verordnung als extrem entzündbar eingestuft, da er gasförmig gemischt mit Luft bei 20 °C und 101,3 kPa im Explosionsbereich liegt. Durch vorbeugende und schützende Maßnahmen sowie zahlreiche Normen und Richtlinien ist der Umgang mit Wasserstoff und dessen Einsatz im Verbrennungsmotor jedoch beherrschbar. Die Einhaltung des sogenannten primären Explosionsschutzes beinhaltet das Verhindern explosionsfähiger Atmosphären, beispielsweise durch Verwendung angemessener Behälter, Leitungen und Verschlüsse. Ist die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre nicht auszuschließen, greift der sekundäre Explosionsschutz, welcher die Vermeidung von Zündquellen jeglicher Art vorschreibt. Im Falle eines Brandes

sind Notabschaltvorrichtungen, Deflagrationssperren und Absperrschlösser zur Wasserstoffzufuhr nur wenige der zahlreichen Möglichkeiten, um Schäden zu begrenzen. [5]

2.6 Entwicklung auf Basis bestehender Serienkonzepte

Der Einsatz von Wasserstoffmotoren bietet vorrangig in Mobilitätsanwendungen mit hohen Anforderungen an die Reichweite und Betankungszeit, die Kosteneffizienz sowie der Robustheit Vorteile gegenüber alternativen, emissionsfreien Antriebstechnologien. So stehen die Anwendungsfälle des Schwerlastgüterverkehrs im Fokus der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten dieser Technologie. Historisch erwachsen, bilden Dieselmotoren in diesem Marktsegment die dominierende Antriebstechnologie [15]. Entsprechend bilden bestehende Fahrzeugkonzepte mit Dieselmotoren die Abprungbasis für die Entwicklung von moderner Wasserstoff-Nutzfahrzeugmotoren.

Erste veröffentlichte Prototypen mit Wasserstoffmotor zeigen dabei branchenweit das Potential der Integration in bestehende Fahrzeugkonzepte, mit einer sehr hohen Gleichteilquote zum entsprechenden Dieselderivat. Im Gegensatz zu anderen emissionsfreien Antriebstechnologien bietet der Wasserstoffverbrennungsmotor durch seine technologische Nähe zum Dieselmotor das Potential auf etablierte Lieferketten und bestehende Produktionsinfrastruktur zurückgreifen zu können.

Im Gegensatz zum selbstzündenden Diesel-Brennverfahren, ist die Wasserstoffverbrennung ein fremdgezündetes Otto-Brennverfahren. Ausgehend von einem modernen Dieselmotor, leiten sich durch die sich unterscheidenden Brennverfahren entsprechende Anpassungsumfänge und Entwicklungsfelder für die Wasserstoffmotorenentwicklung ab. Dabei ist die Integration eines Zündsystems in den Zylinderkopf eine notwendige Anpassung. Durch Ottomotor (bspw. LNG) sind entsprechende Zündsysteme marktzugänglich, wenngleich die Materialeigenschaften des Wasserstoffs gesteigerte Anforderungen an den Verschleiß der Zündkerzen formulieren und die geringe notwendige Zündenergie von Wasserstoff sehr kalte Kerzen erfordern, um Glühzündungen zu vermeiden.

Ein wesentlicher Unterschied der Wasserstoffverbrennung im Vergleich zum Diesel-Brennverfahren besteht zudem in der Gemischbildung. Das Wasserstoffbrennverfahren basiert im Gegensatz zum Dieselfahren auf einer vorgemischten Verbrennung. In diesem Fall wird die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung maßgeblich durch das Turbulenzniveau und die räumliche Verteilung des Luftverhältnis bestimmt. In Ottomotoren wird durch einen Dachbrennraum meist eine Tumbleströmung generiert, die in der Kompressionsphase in kleine Wirbel zerfällt und damit die turbulente kinetische Energie steigert. Bei einem flachen Zylinderkopf, wie er in Dieselmotoren verwendet wird, besteht diese Möglichkeit nicht, oder

nur in sehr geringem Maß. Daher muss ein besonderes Augenmerk auf Strömung und Gemischbildung gelegt werden. Deren Analyse wird im folgenden Kapitel beschrieben.

Ebenfalls entscheidend für die Gemischbildung ist der große Ladeluftbedarf zur Reduktion der Stickoxidhmissionen [16]. Zur Bereitstellung des erforderlichen Luftmassenstroms, kommt der Entwicklung von geeigneten Turboladern eine große Bedeutung zu.

3 Gemischbildung

Bei Wasserstoff-Verbrennungsmotoren gibt es zwei gängige Verfahren zur Gemischbildung. Die interne Gemischbildung mittels Direkteinblasung in den Brennraum und die externe Gemischbildung in Form einer Saugrohreinblasung. Diese Ansätze unterscheiden sich grundsätzlich in der Art und Weise, wie der Wasserstoff mit der Luft vermischt wird [5, 10, 17, 18].

3.1 Saugrohreinblasung

Die Saugrohreinblasung basiert auf dem Prinzip der externen Gemischbildung und ist typisch für den konventionellen Ottomotor. Bei diesem Verfahren werden Luft und Kraftstoff bereits vor dem Eintritt in den Zylinder vermischt, wobei die Wasserstoffeinblasung meist in der Nähe der Einlassventile erfolgt.

Die Saugrohreinblasung kann nach der Einblasestrategie in kontinuierliche und sequentielle Einblasung unterteilt werden. Die sequentielle Einblasung erfolgt zylinderindividuell und im Idealfall saugsynchron, was jedoch von der Dauer des Einblasfensters abhängt. Die Saugrohreinblasung kann insbesondere bei Nutzfahrzeuganwendungen auch mit mehreren kleineren Injektoren als Mehrpunkteinblasung realisiert werden [5, 10, 19].

Der Vorteil der Saugrohreinblasung liegt vor allem in der Einfachheit des Systems, wodurch es auch sehr kostengünstig ist. Die erforderlichen Wasserstoffdrücke sind deutlich geringer als bei der Direkteinblasung, die Anforderungen an die Einblasventile sind aufgrund des geringeren Druckniveaus sowie der geringeren Beanspruchung durch den Einbau außerhalb des Brennraums deutlich niedriger [5]. Da es für Saugrohreinblasung bereits Injektoren für CNG-Anwendungen gibt und die konstruktiven Änderungen am Motor selbst bei diesem Konzept gering sind, kann die Saugrohreinblasung schnell in vorhandene Motoren integriert werden.

Prinzipbedingt kann bei der Saugrohreinblasung bereits ohne weitere Maßnahmen ein annähernd homogenes Gemisch erzeugt werden, was sich positiv auf die Verbrennung und die Stickoxidemissionen auswirkt [5, 19].

Die Saugrohreinblasung bringt jedoch auch eine Reihe von Nachteilen mit sich, die sich aus der Einleitung des

Wasserstoffs vor dem Zylinder ergeben. Aufgrund des geringen Heizwertes von gasförmigem Wasserstoff wird ein Teil der Frischluft verdrängt, was bei sonst gleichen Randbedingungen bereits im stöchiometrischen Betrieb zu einem Leistungsnachteil von ca. 17 % gegenüber der Direkteinblasung führt. Da Wasserstoffmotoren aufgrund von Emissionsgrenzen oder der Gefahr Verbrennungsanomalien oft nur im mageren Bereich betrieben werden, ist der Leistungsnachteil insbesondere im Vollastbetrieb häufig noch größer [5].

Ein weiterer Nachteil der Saugrohreinblasung ist die Gefahr von Rückzündungen. Diese können durch das zündfähige Luft-Kraftstoff-Gemisch im Saugrohr entstehen, das sich beim Einströmen in den Brennraum an heißen Oberflächen oder auch an heißem Restgas entzünden kann. Auch ein so genannter „Phantomfunken“ an der Zündkerze, verursacht durch eine Restladung der Zündanlage, kann eine Ursache für Rückzündungen sein. Die Neigung zur Rückzündung nimmt mit steigender Motorlast zu. Sie kann durch eine geeignete Einblasestrategie, einen optimierten Ladungswechsel und speziell angepasste Zündsysteme verringert, bei Saugrohreinblasung jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden [5, 10, 17].

3.2 Direkteinblasung

Die Direkteinblasung basiert auf dem Prinzip der inneren Gemischbildung, wobei der Wasserstoff direkt in den Brennraum eingebracht wird. Wird die Einblasung auf einen Zeitpunkt nach dem Schließen der Einlassventile gelegt, kann das Auftreten von Rückzündungen wirksam verhindert werden, was einen entscheidenden Vorteil der Direkteinblasung darstellt. Dies verhindert zusätzlich den Luftverdrängungseffekt im Saugrohr, wodurch die erreichbare Leistungsdichte im Vergleich zur Saugrohreinblasung deutlich steigt [5, 20, 21].

Die Direkteinblasung kann grundsätzlich nach dem verwendeten Druckbereich klassifiziert werden [19–21]. Man unterscheidet die Niederdruck-Direkteinblasung (Low pressure direct injection) mit Drücken von typischerweise bis zu 50 bar und die Hochdruck-Direkteinblasung (High pressure direct injection) mit Drücken zwischen 100 und 300 bar [5, 20].

Bei der Niederdruck-Direkteinblasung muss aufgrund des geringeren Wasserstoffdrucks zu einem früheren Zeitpunkt eingespritzt werden, was aufgrund der längeren Gemischbildungszeit zu einem homogeneren Gemisch führt. Bei diesem Konzept ist darauf zu achten, dass zu jedem Zeitpunkt ein überkritisches Druckverhältnis zwischen Wasserstoffdruck und Zylinderdruck eingehalten wird, um während der Einblasdauer gegendruckunabhängig zu bleiben [5]. Die Niederdruck-Direkteinblasung bietet trotz des niedrigen Druckniveaus bereits die Fähigkeit der Nacheinblasung. Diese bietet die Möglichkeit, transiente Lastsprünge abzubilden und dabei das Luftverhältnis zu

reduzieren, ohne die NO_x -Emissionen exponentiell zu erhöhen [20].

Die Hochdruckeinblasung ermöglicht aufgrund der je nach System höheren Drücke eine Einblasung auch bei fortgeschrittener Verdichtung und während der Verbrennung. Sie bietet damit deutlich mehr Freiheit bei der Wahl des Einspritzbeginns. Dieser ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Gemischbildung und damit für die resultierende Verbrennung und die Emissionen. Durch die Möglichkeit der späten Einblasung kann anstelle eines homogenen Gemisches eine Ladungsschichtung erreicht werden, die sich bei richtiger Auslegung positiv auf die Verbrennung und die Vorentflammungsneigung auswirken kann. Die Ladungsschichtung kann zusätzlich durch eine Mehrfacheinblasung gesteuert werden, bei der der Wasserstoff nicht in einem, sondern in zwei oder mehr Pulsen eingeblasen wird [5, 17].

Die Gemischbildung spielt für den Ablauf der Verbrennung eine entscheidende Rolle. Abb. 1 zeigt den Zylinderdruckverlauf eines Betriebspunktes mit Saugrohreinblasung und entsprechend homogenem Gemisch im Vergleich zu einem Betriebspunkt mit Direkteinblasung und geschichtetem Gemisch. Der größere Druckgradient aufgrund der schnelleren Umsetzung des Gemisches ist bei Direkteinblasung deutlich erkennbar.

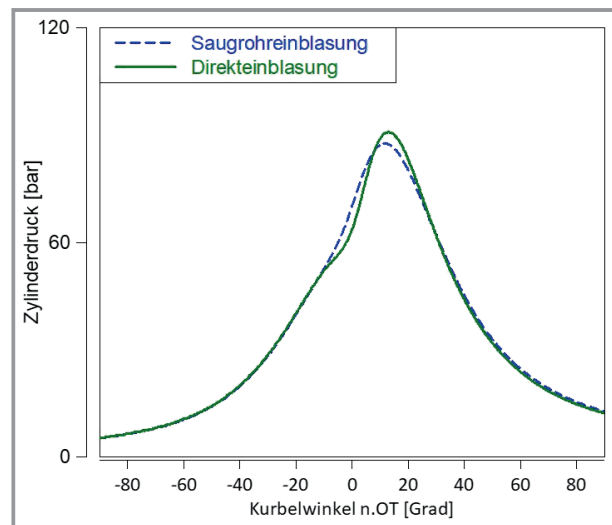


Abbildung 1. Vergleich Druckverlauf Saugrohreinblasung zu Direkteinblasung bei gleichem λ und gleichem Verbrennungsschwerpunkt.

3.3 Design Injektordüse

Die Gemischbildung bei der Direkteinblasung hängt neben dem Einblaszeitpunkt stark von der Form des Einblasstrahls ab. Die genaue Form des Wasserstoffstrahls hängt sowohl vom Druckverhältnis zwischen Injektor und Zylinder als auch von der Düsengeometrie ab. Üblicherweise wird bei Wasserstoffinjektoren für die Direkteinblasung eine nach außen öffnende Düse verwendet [22, 23].

Eine Möglichkeit zur präzisen Strahlformung besteht darin, auf die eigentliche Injektordüse, die den Gasstrahl grundlegend formt, eine zusätzliche Strahlformungskappe aufzusetzen. Die Strahlformungskappe bildet einen sehr großen Gestaltungsspielraum bei der Optimierung der Strahlform und damit der gesamten Gemischbildung im Brennraum [22, 24].

Neben der Strahlform beeinflusst eine Strahlformungskappe ebenfalls die Eindringtiefe und -geschwindigkeit des Wasserstoffs in den Brennraum. Abb. 2 zeigt den Einfluss einer Einloch-Strahlformungskappe auf das Strahlbild einer klassischen A-Düse. Es ist erkennbar, dass die Eindringgeschwindigkeit mit Strahlformungskappe deutlich höher liegt und der Gegendruck einen geringeren Einfluss auf die Eindringgeschwindigkeit des geformten Strahls besitzt [25].

3.5 CFD-Simulation bei Wasserstoffeinblasung

Unter 3D-Computational-Fluid-Dynamics (CFD) versteht man Modelle, in denen die Erhaltungsgleichungen für Masse, Energie und Impuls gelöst werden. Dies geschieht mit Hilfe von Turbulenzmodellen und weiteren physikalischen und chemischen Submodellen [10].

3D-CFD ist ein wichtiges Werkzeug in der Motorenentwicklung. Die Modelldarstellung ist immer eine Näherung und wird nie vollständig mit der Realität übereinstimmen. Sie kann aber helfen, die physikalischen und chemischen Vorgänge im Gesamtprozess zu verstehen. Insbesondere bei der Analyse und Optimierung der Gemischbildung liefert sie wichtige Anhaltspunkte [10, 24].

Abb. 3 zeigt beispielhaft Bilder aus einer 3D-CFD-Simulation, die Aufschluss über die Lambdaverteilung im Brenn-

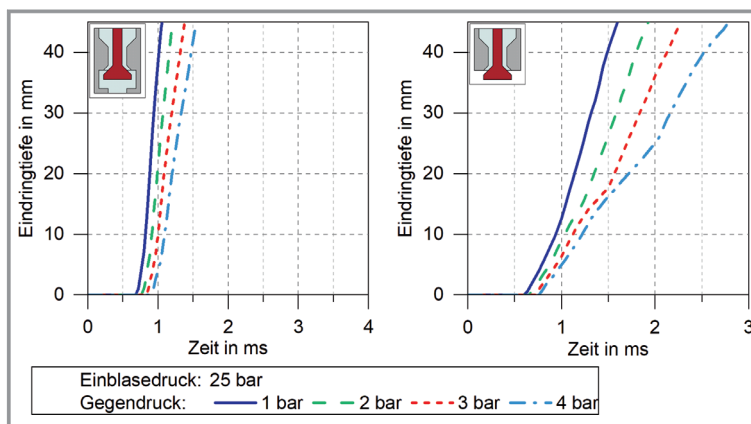


Abbildung 2. Einfluss einer Strahlformungskappe auf die Eindringtiefe bei 25 bar Einblasedruck und verschiedenen Gegendrücken [25].

raum und damit über die Homogenisierung des Gemisches geben. In einer solchen Simulation kann ein kompletter Arbeitstakt inklusive Verbrennung modelliert werden [10]. Zu sehen ist eine typische Lambdaverteilung bei einem Motor mit Direkteinblasung. Messtechnisch ist diese Information nicht, oder nur mit enormem Aufwand zu ermitteln. Die Ladungsschichtung ist klar zu erkennen, wobei insbesondere das Gemisch im Bereich der Zündkerze von Bedeutung für den Ablauf der Verbrennung ist. Zu fette Zonen in einzelnen Brennraumbereichen können das Auftreten von Vorentflammungen begünstigen und sollten vermieden werden.

Eine Validierung des modellierten Einblasstrahls kann mit Hilfe von Schlierenaufnahmen in einer Druckkammer erfolgen. Bei Verwendung eines Transparentaggregates kann die Gemischbildung ebenfalls mit Hilfe von Schlierenfotografie validiert werden, was jedoch mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand verbunden ist [25, 26].

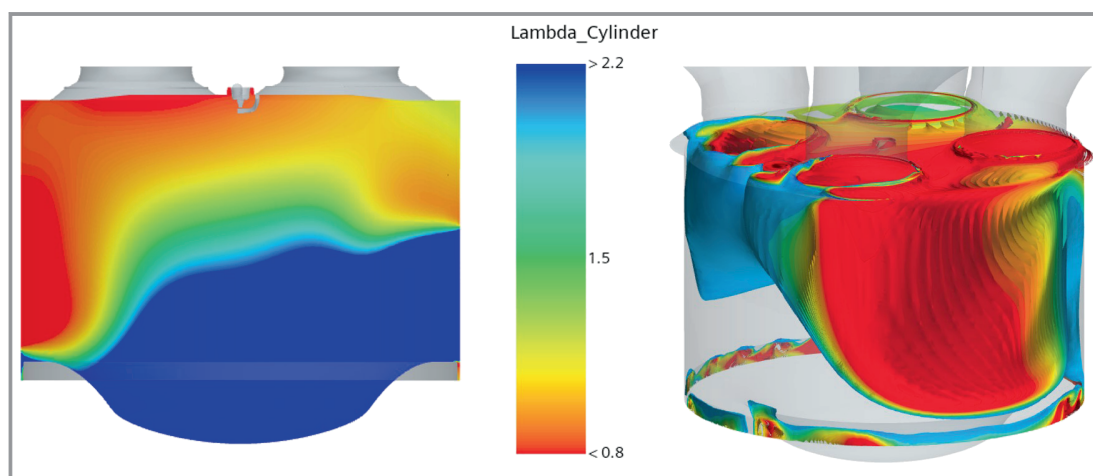


Abbildung 3. Gemischzustand anhand der Lambdaverteilung bei Wasserstoff Direkteinblasung.

4 Verbrennung

4.1 Zündung und reguläre Verbrennung

Die Umsetzung von Wasserstoff in einem Verbrennungsmotor folgt in der Regel einem ottomotorischen Prozess. Abhängig von der Gemischaufbereitung befindet sich im Zylinder – wie im vorherigen Kapitel beschrieben – ein mehr oder weniger homogenes Wasserstoff-Luftgemisch. Das Gemisch wird durch eine Zündkerze entzündet. Trotz der Analogie von Benzin- und Wasserstoffbetrieb sind grundlegende Unterschiede zu berücksichtigen, die vor allem auf den chemisch-physikalischen Eigenschaften des Wasserstoffs basieren.

Wasserstoff weist im Gegensatz zu kohlenstoffbasierten Brennstoffen wie Methan und Propan eine deutlich geringere Zündenergie auf. Abb. 4 zeigt, dass sich diese geringe Zündenergie zusätzlich über einen sehr breiten Konzentrationsbereich in Luft erstreckt.

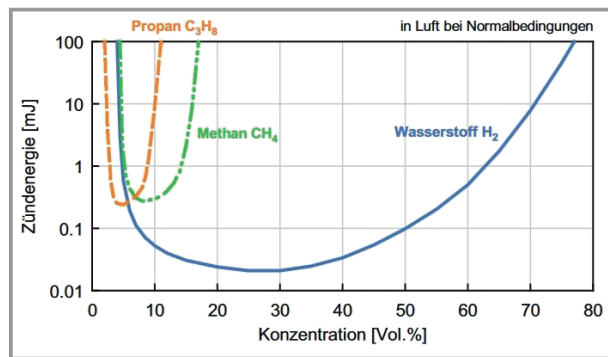


Abbildung 4. Zündenergie von Gasen in Luft [27].

Daraus ergibt sich für den Wasserstoffbetrieb eine deutlich erhöhte Abmagerungsfähigkeit. Die theoretischen Zündgrenzen werden in [28] von $\lambda = 0,13$ bis $\lambda = 10,5$ angegeben. Bei Methan liegen diese lediglich bei $\lambda = 0,6$ bis $\lambda = 2$ [5]. Bei Benzin ist der Bereich noch etwas schmaler. Durch die Abmagerung kann im Teillastbereich die Drosselklappe deutlich weiter geöffnet werden und die Ladungswechselverluste reduzieren sich. Ein höheres Luftverhältnis des Gemischs führt auch zu einem höheren Isentropenexponenten wodurch der thermische Wirkungsgrad des Prozesses gesteigert wird. Beispielfhaft zeigt Abb. 5 den indizierte Mitteldruck p_{mi} und Wirkungsgrad η_i über dem Zündzeitpunkt ZZZ in Abhängigkeit des Luftverhältnisses λ . Die Ergebnisse stammen von einem Forschungseinzyklomotor der 2-Liter-Nutzfahrzeugklasse bei einer Drehzahl von $n = 1200 \text{ min}^{-1}$ und einem Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 12$. Die Abmagerung um 0,2 im Luftverhältnis zeigt den Effekt des verbesserten Wirkungsgrades und damit auch der höheren Last.

Ebenfalls ersichtlich ist der erhöhte Vorzündbedarf bei $\lambda = 2,2$ um die gleichen Werte wie bei dem geringeren λ von 2 zu erreichen.

Durch die Abmagerung wird die Brenngeschwindigkeit reduziert. Prinzipiell ist eine große Brenngeschwindigkeit vorteilhaft für den Wirkungsgrad. Theoretisch optimal ist der Gleichraumprozess mit unendlich schneller Verbrennung. Wasserstoff hat hier gegenüber kohlenstoffbasierten Brennstoffen ebenfalls einen Vorteil. So beträgt die laminare Flammgeschwindigkeit von Wasserstoff bei Umgebungsdruck 230 cm s^{-1} . Bei Methan weist diese lediglich einen Wert von 40 cm s^{-1} auf [5]. Allerdings sind die Vorteile im Realprozess begrenzt. Eine sehr schnelle Umsetzung des Brennstoffes führt zu hohen Druckgradienten mit hohem Verbrennungsgeräusch und hohen Spitzendrücken. Zum einen bedingen die damit einhergehenden hohen Temperaturen einen Anstieg der Wärmeverluste über die Brennraumwände, was einem Wirkungsgradanstieg entgegenwirkt. Zum anderen steigt mit der Temperatur auch die Stickoxidbildung. Des Weiteren wird das Auftreten von Verbrennungsanomalien wie Klopfen und Vorentflammung wahrscheinlicher. Diesen Effekten kann mit einer Spätverschiebung des Zündzeitpunktes entgegengewirkt werden, was dann aber wiederum zu Lasten des Wirkungsgrades geht. Die Brenngeschwindigkeit sinkt mit der Erhöhung des Luftverhältnisses. Aufgrund der sinkenden Temperaturen kann es zu Quenchingeffekten kommen, bei denen die Flamme vor allem in Randbereichen nicht das gesamte Gemisch erfasst. Dann überwiegt dieser negative Effekt den Vorteil des steigenden Isentropenexponenten, der Wirkungsgrad sinkt und die Emission von unverbranntem Wasserstoff steigt. Beispielfhaft ist dies an einem Nutzfahrzeugmotor mit 1,8 L Hubraum pro Zylinder und $\varepsilon = 10$ zu sehen und in Abb. 6 dargestellt. Bei niedriger Last von 25 % liegt dieser Kippunkt bei $\lambda = 2,7$, bei mittlerer Last von 50 % bereits bei $\lambda = 2,2$. Allerdings stellt die Abmagerung, wie im späteren Kapitel Emissionen beschrieben, ein sehr effizientes Mittel zur Absenkung der Stickoxidemissionen dar.

4.2 Verbrennungsanomalien

Der innermotorischen Verbrennung des Wasserstoff-Luft-Gemisches sind Betriebsgrenzen gesetzt. Der Betriebs-

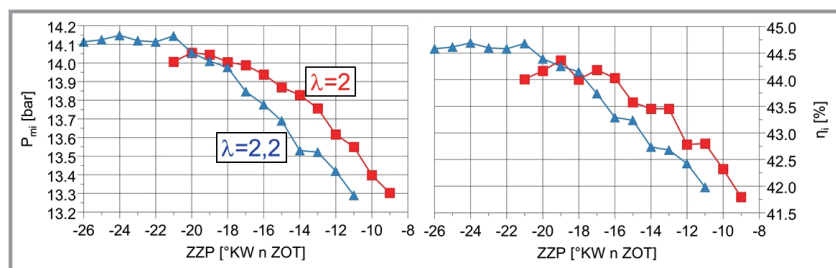


Abbildung 5. Spezifische Last und Wirkungsgrad über dem Zündzeitpunkt als Funktion des Luftverhältnisses [4].

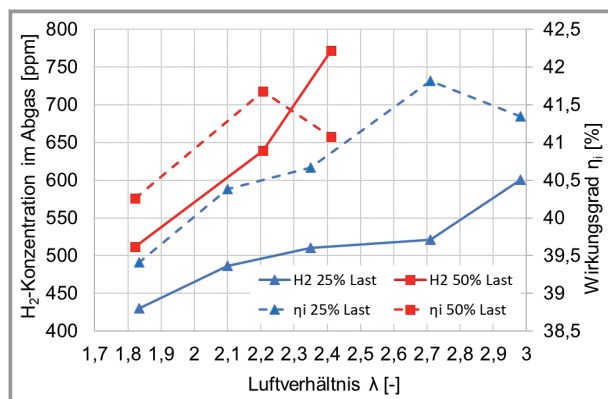


Abbildung 6. Wirkungsgrad und Wasserstoffkonzentration im Abgas über dem Luftverhältnis.

bereich wird eingegrenzt von Verbrennungsaussetzern, Vorentflammungen, Rückzündungen in das Saugrohr (bei äußerer Gemischbildung), dem maximal zulässigen Spitzendruck des Motors, dem maximal möglichen Druckanstieg pro Grad Kurbelwinkel des Motors und klopfender Verbrennung. Für die Verbrennungsanalyse wird ein Indiziersystem verwendet, mit dem der Druckverlauf über Grad Kurbelwinkel dargestellt wird. Durch Analyse des gemessenen Druckverlaufs mittels on-line Auswertungsroutinen, können oben genannte Verbrennungsanomalien erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um Motorschäden zu verhindern.

Bei Verbrennungsaussetzern handelt es sich um ein vollständiges Aussetzen der innermotorischen Verbrennung. Grund hierfür können Zündaussetzer oder auch lokale Gemischinhomogenitäten sein. Das unverbrannte Wasserstoff-Luft-Gemisch kann sich folgend im Abgastrakt entzünden und so zu gefährlichen Druckspitzen in selbigem führen. Eine mildere Form des Verbrennungsaussetzers ist die extrem verschleppte Verbrennung. Abb.7 zeigt den

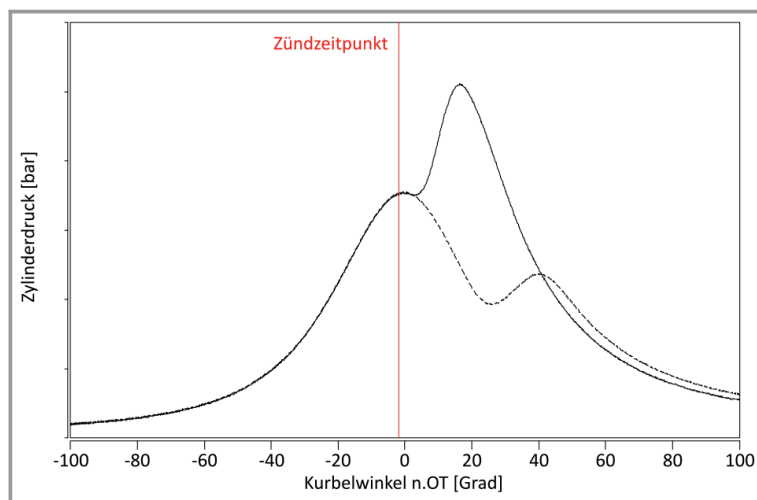


Abbildung 7. Verschleppte Verbrennung (gestrichelte Linie).

Druckverlauf einer verschleppten Verbrennung im Vergleich zu einem regulären Zyklus mit später Verbrennungsschwerpunktlage.

Wie auch bei der Verwendung von Flüssigkraftstoffen in ottomotorischen Brennverfahren, kommt es bei der Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff zu klopfender Verbrennung. Durch Entflammungen im Endgasbereich entstehen durch die hohe Brenngeschwindigkeit von Wasserstoff extreme Druckamplituden, die mitunter mechanische Schäden an Motor und Messtechnik verursachen können. Diese Events treten ohne Vorankündigung auf und überschreiten häufig den zulässigen Maximaldruck des Motors. Da auf eine klopfende Verbrennung oft weitere klopfende Zyklen folgen, ist es wichtig, den Betriebspunkt schnellstmöglich zu verlassen oder zu ändern.

Bei auftretender klopfender Verbrennung wie in Abb.8 links dargestellt, wird als Gegenmaßnahme der Zündzeitpunkt und damit die Verbrennungsschwerpunktlage nach spät verschoben. Durch die Spätverschiebung sinkt die Klopfneigung, jedoch steigt die Gefahr von Verbrennungsaussetzern. Denn bedingt durch einen späteren Zündzeitpunkt steigt der Zylinderinnendruck zum Zeitpunkt der Zündung, was zu höheren energetischen Anforderungen an das Zündsystem führt. Wenn die benötigte Durchschlagsspannung das maximale Spannungsangebot der Zündspule übersteigt, wird kein Funke zwischen den Elektroden ausgebildet. Es kann zu Überschlägen durch die Isolationskeramik der Zündkerze kommen. Die Ausbreitung der Flammfront startet in einem solchen Zyklus nicht direkt mit dem Zündfunken, sondern verzögert. Ursache hierfür kann ein zu mageres Gemisch an der Zündkerze oder eine zu geringe Funkenplasmaenergie (da die Energie der Zündspule fast komplett für den Durchbruch benötigt wurde) sein. Die Ausbreitung des initialen Flammkerns ist verlangsamt. Bei vollständigen Verbrennungsaussetzern wird das Wasserstoff-Luft-Gemisch nicht entzündet und wird unverbrannt wieder ausgestoßen, wobei es zu Reaktionen im heißen Abgastrakt kommen kann.

Bei einer Vorentflammung (s. Abb.8 rechts) kommt es zu einem ohne Vorankündigung auftretendem Umsatz des Wasserstoff-Luft-Gemisches vor dem Zündzeitpunkt. Erkennbar ist die Vorentflammung an einem steigenden Zylinderdruck vor Zündzeitpunkt im Vergleich zum vorherigen Verbrennungszyklus. Diese verfrühte Entflammung bewirkt extrem große Druckgradienten und resultiert häufig in darauffolgenden, klopfenden Zyklen. Mögliche Ursachen für Vorentflammungen sind heiße Restgase der vorangegangenen Verbrennung, heiße Stellen im Brennraum (Hotspots), Inhomogenitäten des Gemischs in Verbindung mit katalytischen Prozessen oder Öltröpfchen im Brennraum [29]. Mit Annäherung an ein stöchiometrisches Gemisch steigt die Neigung zu Vorentflammungen und klopfender Verbrennung. Die Abmagerung

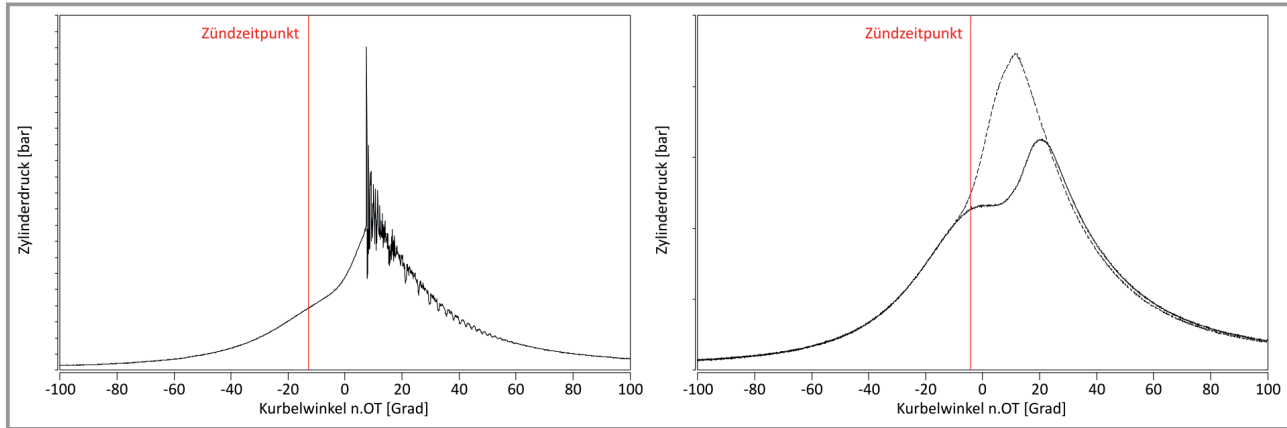


Abbildung 8. Klopfbrennung (links) und Vorentflammung (rechts).

stellt daher ein probates Mittel zur Reduktion dieser Verbrennungsanomalien dar.

Bei äußerer Gemischbildung sind Rückzündungen in den Ansaugtrakt zu beobachten. Dabei entflammt das Gemisch im Brennraum während des Ladungswechsels und brennt in das Saugrohr, wo das vorgelagerte Gemisch entflammt wird. In einem Zyklus mit Rückzündung bleibt der Umsatz im Brennraum nach Zündung aus, da das Gemisch bereits im Saugrohr verbrannt ist. Der Schleppdruck in einem solchen Zyklus sinkt, da heißes Abgas angesaugt wird und somit die Zylinderfüllung geringer ist. Ein weites Rückbrennen in den Ansaugtrakt lässt sich durch Deflagrationssperren im Saugrohr verhindern. In Abb.9 ist ein normal brennender Zyklus (links) und ein Zyklus mit Rückzündung (rechts) zu sehen.

5 Abgasemissionen

Da es sich bei Wasserstoffbrennverfahren in der Regel um vorgemischte homogene fremdgezündete Brennverfahren handelt, stehen die Stickoxidemissionen im Zentrum des Interesses. Weil sich magere Gemischzusammensetzungen

wie oben erwähnt als zielführend und notwendig zeigen, um Verbrennungsanomalien wirksam zu unterbinden, steht für eine Abgasnachbehandlung ein 3-Wege-Katalystor nicht zur Verfügung. Alternativ muss dann hierfür auf eine Stickoxidreduzierung mit zusätzlichem Reduktionsmittel zurückgegriffen werden, z. B. mittels SCR-Katalyse. Um den Bedarf an zusätzlichem Reduktionsmittel möglichst gering zu halten, sind entsprechend niedrige NO_x -Rohemissionen ausgesprochen vorteilhaft. Abb.10 zeigt den Verlauf der Stickoxidrohmissionen in Abhängigkeit der Verbrennungsschwerpunktlage für zwei verschiedene Gemischzusammensetzungen $\lambda = 2$ bzw. $2,1$ und $\lambda = 2,4$. Mit wirkungsgradgünstiger Frühverstellung der Zündung steigen die NO_x -Emissionen kontinuierlich an. Jedoch zeigt sich bei einer Luftverhältniszahl von ca. 2, dass selbst mit wirkungsgradungünstigen Schwerpunktlagen EURO VI-Heavy-Duty-Grenzwerte nicht eingehalten werden. Die Gemischverdünnung durch eine weitere Abmagerung auf $\lambda = 2,4$ erweist sich als äußerst wirksames Mittel zur substanziellen Absenkung der Stickoxidrohmissionen mit Werten deutlich unter den gesetzlichen Grenzwerten von $0,4 \text{ g kWh}^{-1}$ stationär (Worldwide Harmonized Stationary Cycle WHSC) bzw. $0,46 \text{ g kWh}^{-1}$ transient (Worldwide Harmonized

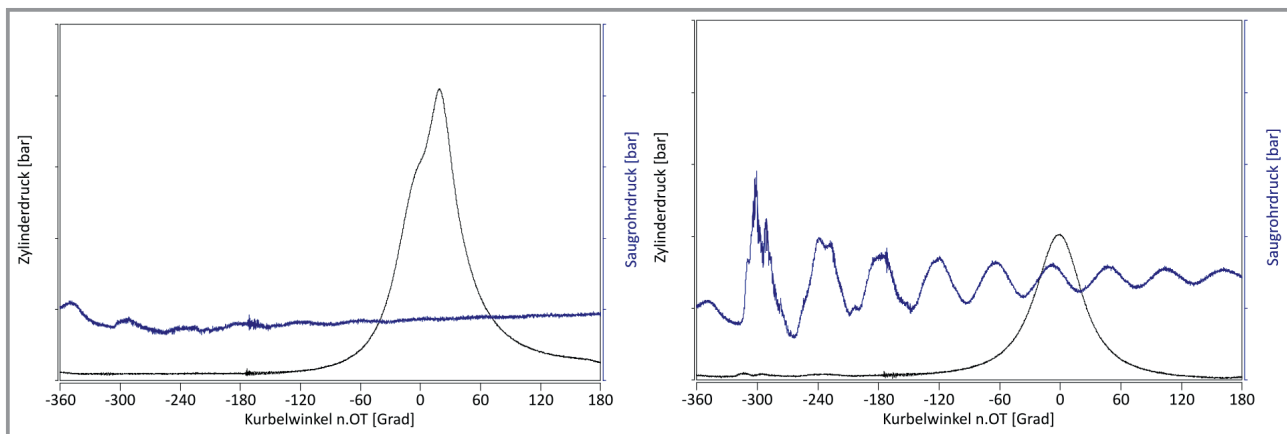


Abbildung 9. Rückzündung bei äußerer Gemischbildung: normaler Zyklus (links), Rückzündung ins Saugrohr (rechts).

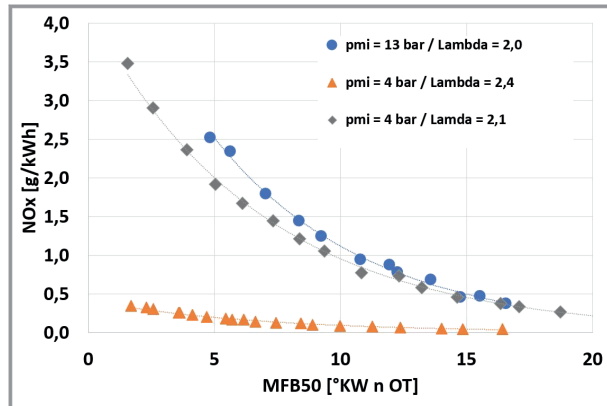


Abbildung 10. Stickoxidemissionen in Abhängigkeit der Verbrennungsschwerpunktlage, dem indizierten Mittelldruck und des Luftverhältnisses.

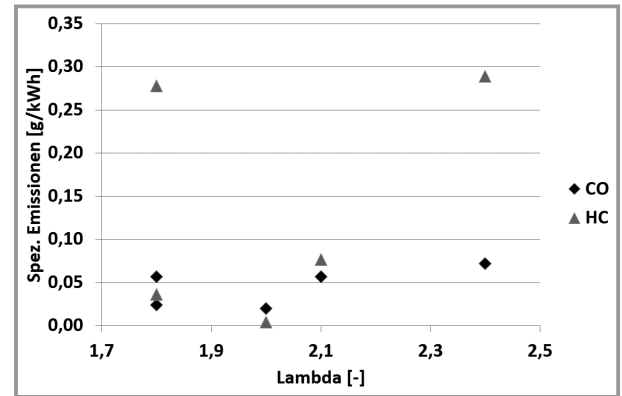


Abbildung 11. Spezifische CO- und HC-Emissionen in Abhängigkeit des Luftverhältnisses λ .

Transient Cycle WHTC) [30,31] selbst für wirkungsoptimale Schwerpunktlagen im Bereich 6 bis 8°KW nach dem oberen Totpunkt.

Während die Stickoxidemissionen brennverfahrensbedingt aus dem Luftstickstoff entstehen, können kraftstoffseitig bei reinem Wasserstoffbetrieb keine weiteren Schadstoffe entstehen. Kohlenstoffhaltige Emissionen wie Kohlenmonoxid CO, Kohlendioxid CO₂ sowie unverbrannte oder teilverbrannte Kohlenwasserstoffe HC dürften im Abgas kraftstoffbedingt nicht detektierbar sein. Jedoch zeigt eine entsprechende Abgasanalyse geringe, aber dennoch messbare Emissionen. In Abb. 11 sind die spezifischen CO- und HC-Emissionen in Abhängigkeit der Luftverhältniszahl λ aufgeführt. Auch unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der Gasanalysatoren und der geringeren Konzentration der beiden Komponenten im einstelligen oder niedrigen zweistelligen ppm-Bereich lassen sich im Abgas diese Schadstoffe detektieren, zeigen aber keine systematische Abhängigkeit vom für Wasserstoffmotoren relevanten λ -Bereich. Die CO₂-Emissionen sind hier aufgrund ihrer geringen Konzentration nicht explizit aufgeführt, da diese

messtechnisch kaum noch mit dem verwendeten Analytator bestimmt werden konnten und zusätzlich noch der CO₂-Gehalt der Ansaugluft überlagert ist.

Auf einen Schmieröleintrag aus dem Kurbelgehäuse als Quelle für diese Emissionen lässt sich indirekt schließen, wenn die Emissionen in Abhängigkeit der Last bzw. des Saugrohrdruckes betrachtet werden (s. Abb. 12). Hier zeigt sich, dass die spezifischen Emissionen mit sinkender Last bzw. sinkendem Saugrohrdruck zunehmen, insbesondere aber erst bei Saugrohrdrücken unterhalb des Umgebungsdrucks. Im gedrosselten Betrieb verhält sich der Wasserstoffmotor kolbenmaschinentypisch und es tritt durch den Unterdruck im Brennraum beim Ansaugen ein erhöhter Schmierölübertritt aus dem Kurbelgehäuse auf. Für diesen Mechanismus des Schmieröleintrags in den Brennraum spricht auch die Menge der beobachteten Emissionen, die größenordnungsmäßig einem erwartbaren Schmierölverbrauch entspricht. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass Wasserstoffmotoren nahezu im gesamten Kennfeld ungedrosselt oder sogar aufgeladen betrieben werden, so dass diese Emissionsquelle im Realbetrieb vernachlässigbar ist.

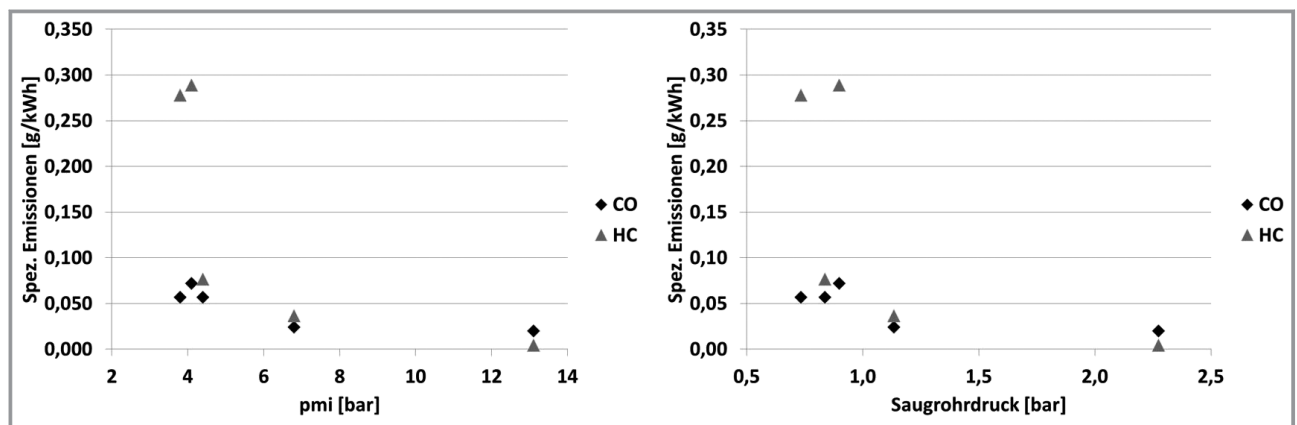


Abbildung 12. Spezifische CO- und HC-Emissionen in Abhängigkeit der Last p_{mi} und des Saugrohrdrucks [32].

6 Reduktion von Stickoxiden

Da Wasserstoff (H_2) keinen Kohlenstoff enthält, entsteht bei der reinen Verbrennung auch kein CO_2 . Die einzig verbleibende, relevante Emission sind wie oben beschrieben die Stickoxide (NO_x), welche bei hohen Verbrennungstemperaturen entstehen. Dabei wird die starke Dreifachverbindung des in der Luft enthaltenen Stickstoffs (N_2) aufgebrochen, welches dann mit dem ebenfalls in der Luft enthaltenen Sauerstoff zu Stickoxiden reagiert. Gegenmaßnahmen zur NO_x -Reduktion können in inner- und außermotorische Maßnahmen eingeteilt werden. Diese werden im Folgenden diskutiert.

6.1 Innermotorische NO_x -Reduktion

Bei der innermotorischen NO_x -Reduktion ist das Ziel, die NO_x -Entstehung während der Verbrennung zu minimieren. Dies geschieht über Maßnahmen zur Absenkung der Verbrennungstemperatur. Die Beherrschung des modernen Wasserstoff-Magerbrennverfahrens geschieht über eine sog. Gemischverdünnung durch Luftüberschuss oder Zugabe von Wasser. Die charakteristischen Eigenschaften des Wasserstoffs lassen eine sehr starke Gemischverdünnung im Vergleich zu Brennverfahren mit Kohlenwasserstoffen zu. Aufgrund dieser Eigenschaften kann der Wasserstoffmotor sowohl in einem weiten Luft-Kraftstoff- als auch Wasser-Kraftstoff-Verhältnis betrieben werden, um stets optimale Wirkungsgrade, hohe Laufruhe und niedrige NO_x -Emissionen zu erzielen.

6.2 Abmagerung

Wie in den bisherigen Kapiteln gezeigt, wird die Verbrennung durch eine Abmagerung des Gemisches verlangsamt, während die Reaktivität und somit das Risiko für Selbstentzündungen sinkt. Dies liegt an der überschüssigen Luft, die, im Vergleich zur eigentlich notwendigen Luft für eine stöchiometrische Verbrennung, nicht an der Reaktion teilnimmt. Die überschüssige Luft fungiert also als Inertgas, welches während der Verbrennung entsprechend ihrer Wärmekapazität Energie aufnimmt und somit die Verbrennungstemperaturen und die NO_x -Emissionen absenkt. Durch die weiten Zündgrenzen des Wasserstoffs kann ein globales Luftverhältnis von weit über 2 eingestellt werden und die Verbrennungstemperaturen sowie die NO_x -Entstehung stark reduziert werden.

6.3 Wassereinspritzung

Als Inertstoff zur Gemischverdünnung kann auch Wasser genutzt werden. Die Auswirkung auf die NO_x -Entstehung ist in Abb. 13 deutlich zu erkennen. Von 0% zu 100%

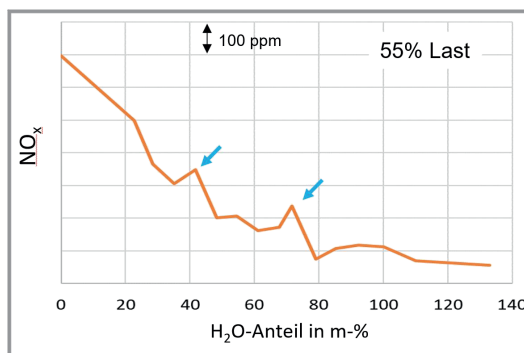


Abbildung 13. Stickoxidreduktion durch Wassereinspritzung [34].

H_2O -Anteil bezogen auf die Kraftstoffmasse können die NO_x -Rohemissionen um 600 ppm gesenkt werden. Die zwei Ausreißer, markiert mit blauen Pfeilen, sind in einer geringen Lambda-Schwankung von 0,01 während der Messung begründet und zeigen die Sensitivität des Brennverfahrens auf den Verdünnungsgrad.

6.4 AGR

Die Abgasrückführung (AGR) ist eine effiziente innermotorische Abgastechnologie moderner Verbrennungsmotoren, die zur Minderung von NO_x -Emissionen in Verbrennungsmotoren eingesetzt wird. Sie basiert auf der Zufuhr von Abgasen zurück in den Brennraum, um die Verbrennungstemperatur zu senken und die Stickoxidbildung zu reduzieren. Es gibt zwei Arten der AGR: die interne AGR, bei der das Abgas durch Anpassung der Ventilsteuerzeiten in den Brennraum zurückgeführt wird, und die externe AGR, bei der das Abgas aus dem Abgastrakt entnommen und dem Ansaugtrakt zugeführt wird. Der Vorteil der externen AGR ist die mögliche Kühlung der rückgeführten Abgase, wodurch die Reaktionsmechanismen optimiert werden können. Die Abgasrückführung ist eine effektive Methode zur Emissionsminderung, die unabhängig von externen Reduktionsmitteln oder katalytischen Systemen eingesetzt werden kann.

Während die AGR in stöchiometrisch betriebenen Motoren hauptsächlich zur Reduzierung der Stickoxidemissionen im Teillastbereich Anwendung findet, kann diese vor allem beim Wasserstoffmotor auch im Hochlastbereich eingesetzt werden. Aufgrund des Luftüberschuss durch das Magerbrennverfahren (Luft kann durch Abgas ersetzt werden) und der hohen Wasserrate im Abgas und dem damit verbundenen Kühleffekt, kann die AGR auch Potenzial zur Leistungssteigerung liefern. Durch die zusätzliche Verdünnung des Gemischs setzen die gleichen Mechanismen ein, wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Der Effekt der Verdünnung kann als Vergleich zur Wassereinspritzung in Abb. 14 entnommen werden. Er liegt in beiden Fällen in etwa der gleichen Größenordnung.

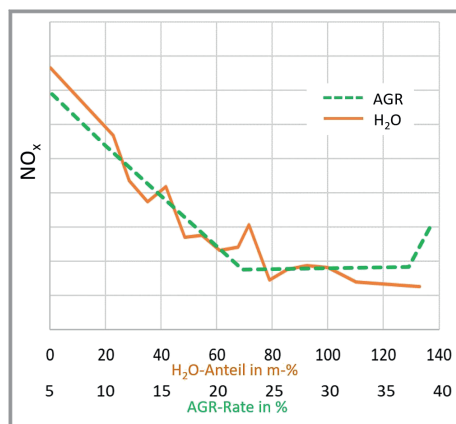


Abbildung 14. Vergleich der Stickoxidabsenkung bei Wassereinspritzung und Abgasrückführung [34].

Insgesamt trägt die AGR als Teil der Abgasnachbehandlungskette zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte bei und bietet Möglichkeiten zur Verbesserung der Leistung und Reduzierung der Schadstoffemissionen von Verbrennungsmotoren.

6.5 DENOX-Katalysator

Der DENOX-Katalysator findet vor allem in Abgasreinigungssystemen von Dieselmotoren Verwendung. Durch den Einsatz eines DENOX-Katalysators können die NO_x-Emissionen erheblich reduziert werden, was zur Einhaltung von Umweltauflagen und auch künftigen Emissionsstandards beiträgt. Wasserstoffverbrennung führt ausschließlich zu Stickoxiden als emissionsrelevante Abgaskomponenten. Diese können durch ein modernes Magerbrennverfahren und Abgasrückführung minimiert werden, jedoch ist eine vollständig NO_x-freie Verbrennung nicht in allen Betriebspunkten des Motors gewährleistet. Aus diesem Grund benötigt es zusätzlich außermotorische Reduktionen mit Hilfe eines Katalysators, der Stickoxide effizient aus dem Abgas entfernt. Dabei kann ein DENOX-Katalysator eingesetzt werden, der für die Abgaszusammensetzung von Wasserstoffmotoren und niedrige NO_x-Gehalte optimiert wurde.



Bei der Reduktion von Stickoxiden (NO_x) ist der DENOX-Katalysator in der Lage, diese in Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O) umzuwandeln. Beim Wasserstoffmotor kann dabei der Kraftstoff (H₂) selbst als Reduktionsmittel für die chemische Reaktion genutzt werden [33]. Dies kann durch eine Nacheinblasung bei geöffnetem Auslassventil oder einem dediziertem H₂-injektor vor Katalysator realisiert werden.

7 Zusammenfassung

Rund um den Wasserstoffmotor haben sich in den letzten Jahren verschiedene Akteure und Initiativen in Forschung und Industrie versammelt. Entwicklungsbedarfe und Potentiale des Wasserstoffmotors wurden identifiziert und bereits sowohl in Modellprojekten als auch konkreter Entwicklungstätigkeit angegangen.

Die Entwicklung der Einspritztechnologie ermöglicht die Verwendung verschiedener Motoren basierend auf vorhandenen Diesel Heavy Duty und Otto Medium Duty Konzepten. Dabei ist die bereits aus der CNG Technik bekannte Saugrohreinblasung eine schnell umzusetzende Möglichkeit. Aufgrund der niedrigeren Drücke ist die Einspritztechnologie weniger komplex. Mehr Potentiale bietet die Niederdruck- und Hochdruckdirekteinblasung. Die Technologie wird im Moment noch entwickelt. Für Wirkungsgrad, transientes Ansprechverhalten und Emissionen lassen sich hierbei gegenüber der äußeren Gemischbildung weitere Potentiale erschließen. Ein weiteres Augenmerk liegt auf der sicheren Zündung des Gemischs. Aufgrund der starken Abmagerung und den schnellen Umsetzungsraten wird bei vergleichsweise hohen Zylinderdrücken gezündet. Das Zündsystem muss auf diese geänderten Randbedingungen angepasst werden.

Ein besonderer Fokus der Brennverfahrensentwicklung liegt auf der Optimierung hinsichtlich Verbrennungsanomalien. Dies betrifft insbesondere Vorentflammungen und Rückzündungen in das Ansaugsystem des Motors. Die Vermeidung von Stickstoffoxiden wird mit unterschiedlichen Technologien von der Abmagerung und der Nutzung des Potentials des Kraftstoffs Wasserstoff selber bis hin zu angepassten und optimierten Katalysatorvarianten, erreicht. Dabei kommen potentiell DENOX-Katalysatoren zum Einsatz, die Wasserstoff als Reduktionsmittel verwenden. Kritische Betriebspunkte, bei denen Reduktionsmethoden wie Abmagerung und Abgasrückführung nicht ausreichend sind, können so gegen übermäßige NO_x-Emission abgesichert werden.

In der Peripherie des Wasserstoffmotors entsteht weiterer Entwicklungsbedarf. In Synergie mit Brennstoffzellenkonzepten werden Tanksysteme und Infrastruktur benötigt, die einen der entscheidenden Schlüssel zur Adaption beider Technologien darstellt. Neben technischen sind dabei auch weitere regulatorische Fragestellungen und Rahmenbedingungen zu klären. Insgesamt bleibt festzustellen, dass der Wasserstoffmotor kurzfristig zur Serienreife geführt werden kann und somit in der Lage ist, bereits in Kürze einen signifikanten Beitrag zur Defossilisierung des Verkehrssektors beizutragen.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.



Heiko Kubach promovierte nach seinem Maschinenbaustudium 2004 im Bereich der Verbrennungsprozessoptimierung von Dieselmotoren und leitete währenddessen die Forschungsgruppe Dieselmotorenentwicklung. Nach der Promotion übernahm er die Leitung der Forschungsgruppe Ottomotoren. Seit 2014 ist er

für die gesamte Brennverfahrensentwicklung und innermotorische Emissionsentstehung verantwortlich. Ein wesentlicher Schwerpunkt seiner Forschung sind Verbrennungsanomalien.



Manuel Bucherer studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit 2019 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) tätig. Im Rahmen verschiedener Projekte beschäftigt er sich intensiv mit der Forschung an Wasserstoff-Brennverfahren für Nutzfahrzeugmotoren.



David Gerber wirkte seit 2020 während und nach seinem Studiengang in Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bei der KEYOU GmbH, einem Wasserstoffmotorenentwickler, in der Versuchsabteilung und Applikation mit. Seit 2022 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolben-

maschinen (IFKM) tätig im Bereich Wasserstoff-Brennverfahrensentwicklung. Seit 2023 bereitet er zusammen mit seinem Kollegen, David Leimann, eine Ausgründung namens REVYVE vor, die als Ingenieursdienstleister für Themen rund um den Wasserstoffmotor fungieren wird.

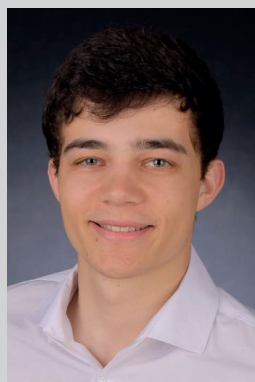


Moritz Grüninger studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit 2016 ist er als Student und seit 2019 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) tätig. Im Rahmen verschiedener Projekte in der Grundlagenforschung und Brennverfahrensentwicklung bearbeitet er unter

anderem Fragestellungen rund um die Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemischs.



Alexander Heinz ist als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen tätig. Zuvor studierte er am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Maschinenbau. Im Rahmen verschiedener Projekte beschäftigt er sich mit Partikelemissionen bei konventionellen Ottomotoren, sowie mit der Nutzung von alternativen und regenerativen Kraftstoffen, darunter auch Wasserstoff, für die CO₂ neutrale Mobilität.



Sebastian Knapp studierte Maschinenbau am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit 2021 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) tätig. Im Rahmen der Brennverfahrensentwicklung am Wasserstoff-Einzylinder-Nutzfahrzeugmotor bearbeitet er Fragestellungen rund um

Ladungsbewegung und Gemischbildung sowie deren Einfluss auf Verbrennungsanomalien und Rohemissionen.



Thomas Koch promovierte nach seinem Maschinenbaustudium 2002 an der ETH Zürich. Nach 10 Jahren bei der Daimler AG in verschiedenen Positionen in der Nutzfahrzeugmotorenentwicklung wurde er 2013 Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen (IFKM) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und ist seither verantwortlich für

verbrennungsmotorische Belange in den Bereichen Forschung, Lehre und Innovation. Die anwendungsorientierte Forschung zu einer weiteren und signifikanten Verbesserung der Eigenschaften von Verbrennungsmotoren gehört dabei zu seinen Tätigkeitsschwerpunkten.



David Leimann wirkte seit 2020 während und nach seinem Maschinenbaustudium am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) bei der KEYOU GmbH, einem Wasserstoffmotorenentwickler, in der Simulationsabteilung mit. Seit 2022 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) tätig im Bereich

Wasserstoff-Brennverfahrensentwicklung. Seit 2023 bereitet er zusammen mit seinem Kollegen, David Gerber, eine Ausgründung namens REVYVE vor, die als Ingenieursdienstleister für Themen rund um den Wasserstoffmotor fungieren wird.



Uwe Wagner promovierte nach seinem Maschinenbaustudium und einer Diplomarbeit bei Ricardo Consulting Engineers Ltd. in Großbritannien 2006 an der Universität Karlsruhe (TH). In wechselnden Funktionen prägte er seither die Forschung am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) des Karlsruher Instituts für Technologie

(KIT) und ist seit 2013 als Forschungsgruppenleiter für die Erforschung und Weiterentwicklung von Motorsystemen, alternativen Kraftstoffen und Konzepten zur Abgasnachbehandlung verantwortlich.



Jonathan Ziegler studierte Wirtschaftsingenieurwesen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Seit 2021 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kolbenmaschinen (IFKM) tätig. Im Rahmen der Brennverfahrensentwicklung am Wasserstoff-Einzylindermotor bearbeitet er Fragestellungen rund um die Entstehungsmechanismen von Verbrennungsanomalien unter dem

Einfluss von Gemischbildung, Ladungsbewegung und Bauteiltemperaturen.

Formelzeichen

ε	[-]	Verdichtungsverhältnis
η_i	[-]	indizierter Wirkungsgrad
H_u	[MJ kg ⁻¹]	unterer Heizwert
λ	[-]	Luftverhältnis
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
p_{mi}	[bar]	indizierter Mitteldruck

Abkürzungen

CEP	Clean Energy Partnership
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLP	Classification, Labelling and Packaging (Chemikalien-Verordnung)
CNG	Compressed Natural Gas

GH ₂	gaseous hydrogen (gasförmiger Wasserstoff)
LH ₂	liquid hydrogen (flüssiger Wasserstoff)
MFB50	Schwerpunktfrage der Verbrennung
SCR	Selektive katalytische Reduktion
ZZP	Zündzeitpunkt

Literatur

- [1] Vereinte Nationen, *Paris Agreement 2015*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (Zugriff am 26. Juli 2023)
- [2] T. Garbe, *Regenerative Kraftstoffe*, Seminar für Verbrennungsmotoren (KIT), Karlsruhe, Juni 2023.
- [3] B. Tanç, H. T. Arat, E. Baltacıoğlu, K. Aydın, *Int. J. Hydrogen Energy* **2019**, *44* (20), 10120–10128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.112>
- [4] U. Wagner, *Emissionsanalyse eines H₂-Motors*, Wasserstoffmotor-Konferenz, Karlsruhe, September 2020.
- [5] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik – Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden 2018.
- [6] www.mahle.com/de/news-and-press/press-releases/mahle-ist-bereit-fur-den-wasserstoffmotor-99200 (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [7] www.deutz.com/media/pressemitteilungen/der-wasserstoffmotor-von-deutz-ist-reif-fuer-den-markt (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [8] <https://h2.live/> (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [9] www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/Wissen_Kompakt_Potenziale_in_der_Wasserstoff-Tankstellentechnologie.pdf (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [10] R. Basshuysen, F. Schäfer, *Handbuch Verbrennungsmotor – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, 7. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden 2015.
- [11] www.pressco.de/wp-content/uploads/2019/11/DNV_001-002_18_53-55_pressco.pdf (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [12] www.toyota.de/elektromobilitaet/laden-tanken/wasserstoff-tankstelle (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [13] www.aral.de/de/global/forschung/faq/faq-kraftstoffe-allgemein.html#accordion_gewicht-benzin-diesel (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [14] www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/b/brennwert.html (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [15] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/468860/umfrage/lkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/> (Zugriff am 18. Juli 2023)
- [16] F. Gerbig, K. Heller, J. Ringler, H. Eichlseder, P. Grabner, in *Proc. 11. Tagung Der Arbeitsprozess des Verbrennungsmotors*, Graz 2007.
- [17] S. Verhelst, T. Wallner, Hydrogen-fueled internal combustion engines, *Prog. Energy Combust. Sci.* **2009**, *35* (6), 490–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- [18] R. Busch, in *Grundlagen Verbrennungsmotoren*, 9. Auflage (Eds: G. Merker, R. Teichmann), Springer Vieweg, Wiesbaden 2019, Kap. 26.
- [19] P. Kapus, B. Raser, in *Proc. of the 43rd International Vienna Motor Symposium* (Eds: B. Geringer, H. P. Lenz), Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, Wien 2022.
- [20] A. Kufferath et al., in *Proc. of the 31st Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR., Aachen 2022.
- [21] A. Kufferath et al., in *Proc. of the International Vienna Motor Symposium 2021*, Bd. 42, 1. Auflage (Ed: B. Geringer), Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, Wien 2021.
- [22] M. Brauer et al., in *Proc. of the 31st Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR., Aachen 2022.
- [23] B. Niethammer, C. Mayer, E. Vogt, M. Poletti, Entwicklung von Hochdruckinjektoren für Gas und Wasserstoff, *MTZ Motortech. Z.* **2023**, *84* (5), 44–49. DOI: <https://doi.org/10.1007/s35146-023-1460-7>
- [24] G. Hoffmann et al., in *Proc. of the 30th Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik GbR., Aachen 2021.
- [25] J. Reimer, M. Bucherer, J. Pfeil, T. Koch, in *Proc. 12. Tagung Einspritzung und Kraftstoffe*, 1. Auflage, Forschungszentrum für Verbrennungsmotoren und Thermodynamik Rostock GmbH, Rostock 2023.
- [26] S. A. Kaiser, V. M. Salazar, A. A. Hoops, Schlieren measurements in the round cylinder of an optically accessible internal combustion engine, *Appl. Opt.* **2013**, *52* (14), 3433–3443. DOI: <https://doi.org/10.1364/AO.52.003433>
- [27] W. Rossegger, U. Posch, Design Criteria and Instrumentation of Hydrogen Test Benches, *1st International Symposium on Hydrogen Internal Combustion Engines*, Mitteilungen des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Technische Universität Graz 2006.
- [28] P. Grabner, A. Wimmer, F. Gerbig, A. Krohmer, in *Proc. of 5th International Colloquium FUELS*, Esslingen 2005.
- [29] T. Kuboyama, Y. Moriyoshi, K. Morikawa, *SAE Int. J. Engines* **2015**, *8* (2), 529–537. DOI: <https://doi.org/10.4271/2015-01-076>
- [30] www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/420/bilder/dateien/5_tab_grenzwerte-lkw.pdf (Zugriff am 12. Juli 2023)
- [31] UNECE, *Global technical regulation No. 4 (GTR 4)*, ECE/TRANS/180/Add.4, 25 January 2007.
- [32] P. Lott, U. Wagner, T. Koch, O. Deutschmann, *Chem. Ing. Tech.* **2022**, *94* (3), 217–229. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.202100155>
- [33] D. Koch et al., *MTZ Worldwide* **2020**, *81*, 30–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s38313-020-0229-3>
- [34] H. Kubach, *Abgasemissionsanalyse von Wasserstoffmotoren*, Wasserstoffmotor-Konferenz, Karlsruhe, September 2021.

DOI: 10.1002/cite.202300119

Trends und Herausforderungen bei der Entwicklung von Wasserstoffmotoren

Heiko Kubach*, Manuel Bucherer, David Gerber, Moritz Grüninger, Alexander Heinz, Sebastian Knapp, Thomas Koch, David Leimann, Uwe Wagner, Jonathan Ziegler

Review Article: Die Verwendung von Wasserstoff als Kraftstoff für Verbrennungsmotoren trägt direkt zur Defossilisierung des Verkehrssektors bei. Es gibt einige Herausforderungen, die auf dem Weg zur Serienanwendung bewältigt werden müssen. Diese beziehen sich nicht nur auf die Beherrschung des Brennverfahrens selbst, sondern auch auf die Herstellung, die Speicherung und die Infrastruktur. Der vorliegende Beitrag enthält eine Übersicht möglicher Lösungsansätze.

