

Keynote: Zur Technik zukünftiger Mobilität

Marcus Bollig

Mit dem Paket „Fit for 55“ will die Europäische Union (EU) ihre Treibhausgasemission bis 2030 um 55 Prozent gegenüber 1990 senken. Dafür wurde in der vergangenen Legislatur eine Vielzahl von Maßnahmen verabschiedet. Aus Sicht der deutschen Automobilindustrie sind dabei vor allem die CO₂-Flottenregulierungen für Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge zentral. Damit die Defossilisierung des Straßenverkehrs gelingen kann, spielen darüber hinaus die „Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe“ (AFIR) und die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) eine entscheidende Rolle. Um die Emissionen im Straßenverkehr zu reduzieren, sieht der VDA den EU-Emissionshandel für Gebäude und Verkehr (ETS-II) als entscheidendes Instrument.

Mit 25 Prozent macht der Verkehrssektor eine erhebliche Menge der CO₂-Emission in der EU aus, wobei davon mehr als zwei Drittel auf den Straßenverkehr entfallen. Rund 60 Prozent der Emissionen im Straßenverkehr werden durch Pkw verursacht, Nutzfahrzeuge sind für 40 Prozent verantwortlich. Diese Zahlen verdeutlichen die Notwendigkeit, den Straßenverkehr zu defossilisieren.

Der VDA betrachtet die E-Mobilität als Technologie der Zukunft. Der in Deutschland (noch) knapp vorhandene Grünstrom ist in der Elektrifizierung deshalb am effizientesten eingesetzt. Doch werden in Deutschland und der EU noch viele Jahre Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor unterwegs sein. Dieser Fahrzeugbestand kann nur mit erneuerbaren Kraftstoffen defossilisiert werden. Diese können synthetisch aus erneuerbarer Elektrizität oder aus biogenen Quellen hergestellt werden.

Die Debatte um erneuerbare Kraftstoffe sollte sich nicht auf E-Fuels beschränken, sondern die Erfüllungsoptionen der RED III berücksichtigen. Dazu zählen auch Biokraftstoffe, die bereits heute verfügbar sind und fossilen Kraftstoffen in wachsendem Verhältnis beigemischt werden können. Die RED III legt für fortschrittliche Biokraftstoffe und RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) bewusst Unterquoten fest, um eine Skalierung zu ermöglichen. Damit eine Skalierung erfolgt, braucht es jedoch einen ambitionierten und langfristigen regulatorischen Rahmen über 2030 hinaus – wie er bereits für den Flug- und Schiffsverkehr verabschiedet wurde. Der VDA spricht sich im Zuge der Umsetzung der RED III in nationales Recht für eine THG-Reduktion von 30 Prozent aus dem Kraftstoffsektor bis 2030 aus.

Insgesamt bietet das Paket „Fit for 55“ einen umfangreichen Rahmen für das Zwischenziel 2030 auf dem Weg zur Klimaneutralität. Die Ziele sind ambitioniert, doch die deutsche Automobilindustrie bekennt sich zu den Klimaschutzzielen der EU sowie des Abkommens von Paris und ist bereit, die gesetzten Ziele mit entsprechenden Investitionen und Innovationen zu erreichen.

Wasserstoff-Technologien für den Antrieb im schweren Fernverkehr

Florian Lindner, Stephan Schraml, Maximilian Weidner, Dominic Hyna,
Daniel Teubner, Stefan Buhl, Andreas Broda

Kurzfassung

Angesichts der dringenden Notwendigkeit, die anthropogen verursachte Klimaerwärmung zu begrenzen, haben zahlreiche Staaten und Unternehmen verbindliche Zusagen zur massiven Reduktion des CO₂-Ausstoßes in den kommenden Jahren gemacht. Der Verkehrssektor, insbesondere der kommerzielle Straßengüterverkehr, spielt eine entscheidende Rolle bei dieser Reduktionsstrategie. Ein technologieoffener Ansatz, der verschiedene klimafreundliche Lösungen gleichzeitig zulässt, bietet das Potential für eine schnelle CO₂-Reduktion, da er eine zügige Markteinführung neuer Technologien ermöglicht.

MAN Truck & Bus SE erforscht in diesem Zusammenhang nicht nur batterieelektrische Antriebe (BEV), sondern auch Wasserstofftechnologien, einschließlich Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) und Brennstoffzellen (FCEV). Der Fokus dieses Beitrags liegt auf einem von MAN entwickelten H₂-ICE Prototypfahrzeug sowie einem Brennstoffzellenkonzeptfahrzeug.

Wasserstoffverbrennungsmotoren bieten Tank-to-Wheel eine CO₂-freie Alternative zu herkömmlichen Dieselmotoren und können in Kombination mit Brennstoffzellen dazu beitragen, die Emissionsziele schneller zu erreichen. Insbesondere aufgrund der EU-Gesetzgebung, die eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 30% auf 45% gegenüber dem Flottenwert von 2019 vorsieht, wird der Einsatz alternativer Antriebe immer dringlicher.

Wasserstoff bietet signifikante Vorteile gegenüber anderen Energiequellen, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit und die Geschwindigkeit der Betankung. Die EU hat in ihrer Strategie für sauberen Wasserstoff, die Teil des Europäischen Grünen Deals ist, das Ziel festgelegt, bis 2024 bis zu 6 GW erneuerbare Wasserstoffelektrolysekapazitäten zu installieren und bis 2030 mindestens 40 GW zu erreichen. Diese Entwicklungen zeigen, dass Wasserstoff eine wichtige Rolle in Europas Energiestrategie und zur Erreichung der CO₂-Reduktionsziele spielen wird.

Der Wasserstoffverbrennungsmotor kann als Brückentechnologie dienen, um den Übergang zu umweltfreundlichen Antrieben zu beschleunigen, und bietet durch die Nutzung bestehender Fahrzeugkonzepte und Infrastrukturen eine schnelle Marktfähigkeit. Zugleich erkundet MAN auch Brennstoffzellen, die langfristig eine noch nachhaltigere Lösung bieten können, jedoch den Aufbau spezifischer Infrastrukturen erfordern.

1. H₂-Verbrennungsmotor als lokal CO₂-freier Antrieb

Die aktuellen Maßnahmen zur Reduktion der CO₂-Emissionen, die im Rahmen des Pariser Klimaabkommens angestrebt werden, liegen deutlich hinter dem vorgesehenen Zeitplan. Insbesondere im Verkehrs- und Gebäudesektor konnten die angestrebten Emissionsreduktionen bislang nicht erreicht werden.

In Reaktion darauf hat die Europäische Kommission strengere CO₂-Ziele festgelegt, um eine beschleunigte Dekarbonisierung des Transportsektors zu fördern und somit die Einhaltung der EU-Klimaziele zu gewährleisten. Der jüngste Vorschlag umfasst eine Verschärfung der CO₂-Reduktionsziele von 30 % auf 45 % im Vergleich zum Flotterwert von 2019.

Es ist klar, dass die notwendigen Einsparungen nicht länger allein durch Effizienzsteigerungen bei den derzeit dominierenden Antriebskonzepten, insbesondere Dieselmotoren, erreicht werden können. Aufgrund ihrer Effizienz und der geltenden Vorschriften setzen die wichtigsten Hersteller von Nutzfahrzeugen auf batterieelektrische Lösungen, die kurz- und mittelfristig durch wasserstoffbasierte Antriebe ergänzt werden. Andere Konzepte wie hydrierte Pflanzenöle (HVO) oder kohlenstoffbasierte synthetische Kraftstoffe bieten zwar ebenfalls Potenzial zur CO₂-Reduktion, werden jedoch aufgrund der geltenden Gesetzgebung, die die Emissionen auf Tank-to-Wheel-Basis bilanziert, nicht als nachhaltige Alternative berücksichtigt.

Mehrere Studien haben gezeigt, dass eine schnelle Dekarbonisierung des Verkehrssektors unter einem technologieexklusiven Ansatz hohe Risiken birgt. Besonders die begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen und der zeitintensive Ausbau der notwendigen Infrastruktur stellen erhebliche Herausforderungen dar. Außerdem gibt es Anwendungen, die nur mit spezifischen Antriebskonzepten realisierbar sind. Ein technologie-offener Ansatz stellt daher die effizienteste Lösung dar, um mögliche Engpässe zu umgehen und zusätzliche Potenziale zur Emissionsreduzierung zu erschließen. Dadurch wird eine Erfüllung der ambitionierten Klimaziele der EU besser gewährleistet.

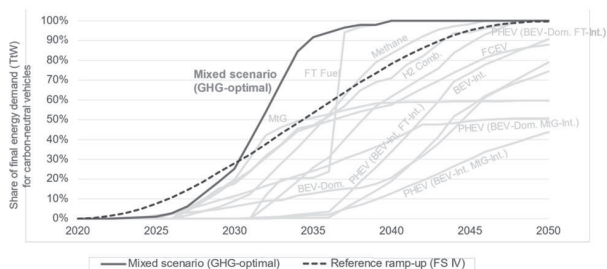


Abbildung 1 : Szenarien für CO₂-freie Mobilität laut FVV Fuel Study IV [1]

In diesem Kontext bietet der Wasserstoffverbrennungsmotor (H₂-ICE) als alternative Antriebstechnologie trotz seiner geringeren Effizienz im Vergleich zu batterieelektrischen oder brennstoffzellenbetriebenen Antrieben bedeutende Vorteile:

- Verwendung anderer, weniger kritischer Rohstoffe im Vergleich zu BEV/FCEV
- Unabhängigkeit von einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur
- Hohe Fahrzeugverfügbarkeit durch effiziente Betankung
- Anwendbarkeit in anspruchsvollen Szenarien mit hohen Lasten
- Marktfähigkeit durch Anpassung bestehender Produktions- und Montagelinien
- Nutzung vorhandener Servicenetzwerke

Der H₂-Verbrennungsmotor kann als Brückentechnologie die Einführung CO₂-neutraler Antriebe beschleunigen und stellt in spezifischen Anwendungsnischen eine effektive Ergänzung zu batterie- und brennstoffzellenbetriebenen Antrieben dar.

2. Design des H4576LF Prototypmotors

Der H4576LF Prototypmotor hat seinen Ursprung in dem bewährten Dieselmotor D38, der 2015 in Serie eingeführt wurde und mit einer Leistung von mindestens 500 PS und einem Drehmoment von 2300 Nm den Anforderungen im Fernverkehr entspricht.

Tabelle 1: Vergleich der Kenngrößen des Dieselaggregats D3876 und des H₂-Versuchsaggregats H4576

	D3876 (Diesel)	H4576 (hydrogen prototype)
Cylinders	6 / inline	6 / inline
Bore/stroke	138 mm / 170 mm	145 mm / 170 mm
Displacement	15.2 L	16.8 L
Compression ratio	1:19	1:11-13
Cylinder peak pressure	250 bar	170 bar
Engine Power	P= 412 kW / 560 hp; Md= 2700 Nm P= 383 kW / 520 hp; Md= 2500 Nm P= 471 kW / 640 hp; Md= 3000 Nm	P _{max} = 382 kW / 520 hp Md _{max} = 2600 Nm
Fuel Injection	common rail / central injection	low pressure direct injection (DI)/ eccentric injection
Maximum fuel pressure	2500 bar	22 bar
Ignition	compression ignition	central cold spark plug
Turbocharging	two-stage	single-stage
Charge air cooling	indirect low temp. cycle	direct air-to-air
Cam shaft	SOHC	SOHC
Exhaust aftertreatment	DOC+DPF+SCR	SCR
EGR	yes	no
Height	720 mm	774 mm
Length	1688 mm	1688 mm
Width	960 mm	950 mm

Aufgrund der geringeren Leistungsdichte von Wasserstoff im Vergleich zu Diesel ist für den H4576LF ein größerer Hubraum notwendig, um äquivalente Leistung und Drehmomente zu erzielen. Die D38-Motorenplattform bot sich daher als idealer Ausgangspunkt für die Entwicklung des H₂-Prototypmotors an.

Der Umbau des D38 zum H4576LF umfasste signifikante Modifikationen im Verbrennungsprozess sowie an den Komponenten für Luft- und Kraftstoffzufuhr, um den Anforderungen eines Wasserstoffbetriebs gerecht zu werden. Die Übernahme zahlreicher Basiskomponenten wie das Kurbelgehäuse, die Kurbelwelle und die Pleuelstangen sowie Teile des Kühl- und Ölkreislaufs ermöglichte eine effiziente Nutzung vorhandener Fertigungsressourcen.

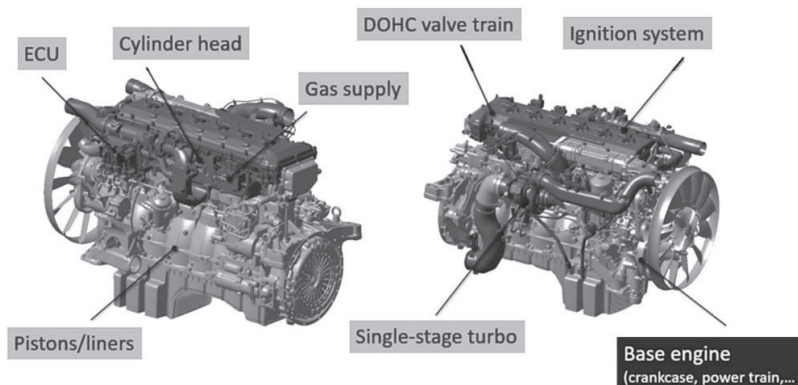


Abbildung 2: Gleichteile und Änderungsumfang (dunkel hervorgehoben) des H₂-Versuchsaggregates zum D38-Dieselmotor

Der modifizierte Motor verfügt über eine neue Motorsteuerungseinheit (ECU), die speziell auf die Anforderungen des Wasserstoffbetriebs abgestimmt ist. Der H4576LF wird als Magergasmotor betrieben, was zu deutlich niedrigeren Abgastemperaturen im Vergleich zu Dieselmotoren führt. Um die Herausforderungen durch Fehlzündungen, die zu schweren Motorschäden führen können, zu bewältigen, ist der Motor mit einem innovativen System für direkte Wasserstoffeinspritzung ausgestattet. Dieses System ermöglicht verbesserte Lastwechselreaktionen und multiple Einspritzvorgänge pro Zyklus, was die Homogenisierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und eine effiziente Verbrennung unterstützt.

Anpassungen an Zylinderkopf und Ventiltrieb waren erforderlich, um zusätzlichen Raum für das Zünd- und Einspritzsystem zu schaffen. Trotz dieser Modifikationen bleibt das SOHC-Design (Single Overhead Camshaft) erhalten, was eine maximale Teilekompatibilität mit dem ursprünglichen Dieselmotor sicherstellt. Dies minimiert die Komplexität und Kosten des Übergangs zu Wasserstoffantrieben.

Zur Unterstützung der Leistung des Motors wurde ein neuer, hocheffizienter, einstufiger Wastegate-Turbolader eingeführt. Die Anpassungen an Luft- und Abgasführungskomponenten ermöglichen eine Vereinfachung im Vergleich zum zweistufig aufgeladenen Dieselmotormodell, wodurch Gewicht und Komplexität reduziert werden.

In der Entwicklung des H4576LF hat MAN auch auf innovative Wasserstoffspeichertechnologien gesetzt. Ein 700-bar-Druckgasspeicher ermöglicht eine hohe Speicherdichte und maximale Reichweite des Fahrzeugs. Das nachfolgende Diagramm zeigt die Dichte von Wasserstoff abhängig von Druck und Temperatur. Die Nutzung sowohl von verflüssigtem (LH_2) als auch kryokomprimiertem Wasserstoff (CGH_2) wird evaluiert, wobei jedes System spezifische technische Vor- und Nachteile aufweist. Zurzeit scheitert es jedoch an der Verfügbarkeit der kryogenen Medien. Bei zukünftiger breiter Verfügbarkeit wären beide Wasserstoffantriebssysteme (ICE & FC) zur Nutzung in der Lage. Der Ausbau der aktuellen Tankinfrastruktur weist jedoch in die Richtung der Nutzung von 700 bar Druckgas, so dass die aktuellen H_2 -Fahrzeuge der MAN damit ausgestattet sind.

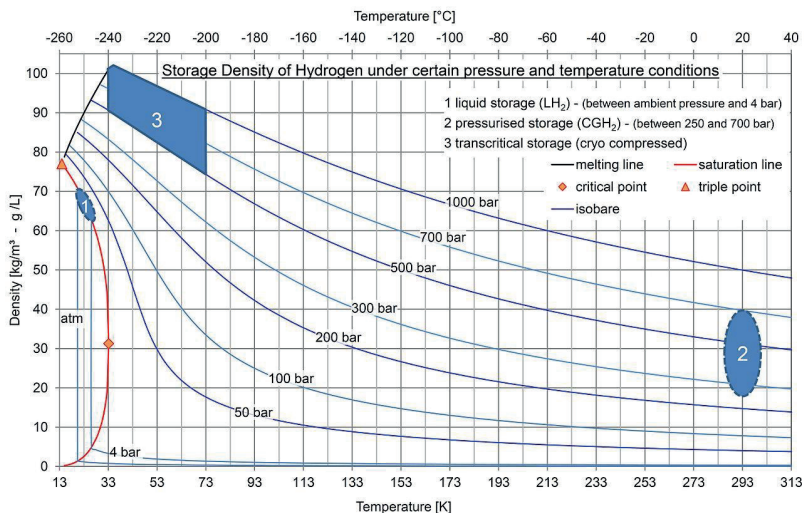


Abbildung 3: H_2 - Speicherstrategien [ILK Dresden]

Die Gastanks befinden sich hinter der Fahrzeugkabine. Das Gasversorgungssystem enthält einen Hochdruckkreis (700 bar) und einen Niederdruckkreis (30 bar). Nachdem der Wasserstoff auf das geringere Druckniveau entspannt ist, wird das Gas zum Motor geleitet. Am Motor selbst wird der Druck mit zwei parallelen, variablen Druckreglern eingeregelt. Der Wasserstoff wird an zwei Stellen in den Zylinderkopf eingeleitet, über ein Rail im gesamten Zylinderkopf verteilt und über eine Seiteneinspeisung den Injektoren zugeführt. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass der Bereich des Ventiltriebs frei von H_2 -Versorgungsteilen ist.

3. Abgasnachbehandlung für H_2 -Verbrennungsmotoren

Ein magerbetriebener Wasserstoffverbrennungsmotor (H_2 -ICE) emittiert signifikant niedrigere Schadstoffmengen als ein vergleichbarer Dieselmotor. Insbesondere sind die Emissionen von Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid minimal, da diese

hauptsächlich aus dem Motoröl stammen und nicht aus dem Kraftstoff selbst. Stickoxide (NO_x) sind die vorrangigen Emissionen, die in beachtlichen, aber im Vergleich zu Diesel deutlich reduzierten Mengen auftreten. Partikelemissionen sind in der Regel gering und treten hauptsächlich bei abnormen Verbrennungseignissen auf.

Die Frage der Notwendigkeit einer Abgasnachbehandlung bei H_2 -ICE stellt sich angesichts dieser niedrigen Emissionswerte. Untersuchungen bei MAN haben gezeigt, dass das Emissionsniveau nach Euro VIe auch ohne Abgasnachbehandlung erreichbar ist. Allerdings kann eine moderate Erhöhung des NO_x -Rohemissionsniveaus Vorteile bringen, insbesondere in Bezug auf die Fahrbarkeit. Diese Verbesserung des Ansprechverhaltens ist darauf zurückzuführen, dass bei schneller Lastaufschaltung kurzzeitig nicht genügend Luftüberschuss im Brennraum zur Verfügung steht, was zu kurzfristigen, aber signifikanten Emissionspeaks führt. Auch unter stationären Bedingungen mit niedriger Drehzahl und hoher Last kann durch den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen die Einhaltung der Emissionsstandards auch ohne komplexes Aufladesystem gewährleistet werden.

In Anbetracht strengerer zukünftiger Abgasnormen, wie etwa der geplanten Euro VII, wird der Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen unumgänglich, um sowohl die Einhaltung der Emissionsvorschriften als auch ein zufriedenstellendes Fahrverhalten sicherzustellen. Der Einsatz eines Partikelfilters kann insbesondere unter kritischen Betriebsbedingungen die Emissionssicherheit deutlich erhöhen.

Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz eines ergänzenden Abgasnachbehandlungssystems die bereits niedrigen Rohemissionen weiter signifikant bis an die Nachweisgrenze zu reduzieren. Dies trägt zur Vision eines „Zero-Emission-Vehicle“ bei, indem es die Umweltbelastung weiter minimiert und die Luftqualität verbessert.

4. Eingesetztes AGN-System

Im Rahmen des ersten Entwicklungsansatzes bei MAN wurde das aktuelle EuroVIe-Abgasnachbehandlungssystem (AGN) der Serienproduktion beibehalten, um einen hohen Anteil an Gleichteilen für einen möglichen späteren Serieneinsatz sicherzustellen. Aufgrund des geringen Potentials für CO- und HC-Emissionen wurde der Dieseloxydationskatalysator (DOC) entfernt. Ebenso wurde auf den Dieselpartikelfilter (DPF) verzichtet, da bei einem kohlenstofffreien Kraftstoff keine messbare Rußbildung auftritt. Das SCR-System (selektive katalytische Reduktion) und der Ammoniak-Schlupfkatalysator (ASC) wurden direkt aus der Seriedieselskonfiguration übernommen, obwohl ihr Volumen ursprünglich für höhere Rohemissionen ausgelegt ist.

Das System zeigte eine ausgezeichnete Leistung in Bezug auf die NO_x -Reduktion. Allerdings wurde bei den ersten Partikelanzahlmessungen (PN) festgestellt, dass die Emissionen teilweise vergleichbar mit denen eines Dieselmotors waren. Diese Beobachtung lässt sich auf zwei Hauptursachen zurückführen:

Abnormale Verbrennungseignisse: Diese treten sporadisch auf und führen zu kurzen, aber intensiven Spitzenwerten in der Partikelanzahl, die das normalerweise niedrige PN-Rohemissionsniveau des Motors weit übersteigen. Es wird vermutet, dass diese Partikel ähnlich wie bei klopfenden Gasmotoren durch das Abplatzen des Ölfilms

von der Brennraumwand entstehen. Verschiedene Ursachen für diese Ereignisse wurden bereits im Verlauf der Motorentwicklung identifiziert, und durch Optimierungen im Brennraumdesign und in der Applikation konnten diese erheblich reduziert werden. Eine vollständige Eliminierung bleibt jedoch unter extremen Bedingungen eine Herausforderung.

AdBlue-Dosierung: Die Dosierung von AdBlue ist eine dominante Quelle für Partikelemissionen. Bereits die Aktivierung der Dosierung erzeugt PN_{10} -Werte, die den von der EU-Kommission für die Emissionsstufe EuroVII vorgeschlagenen Grenzwerten entsprechen. Ein direkter Zusammenhang zwischen Dosiermenge und Partikelanzahl ist feststellbar, und trotz der geringeren AdBlue-Mengen im Vergleich zur Dieselausgasnachbehandlung werden ähnlich hohe Partikelzahlen produziert. Dies liegt möglicherweise an der Kombination aus kleinen Dosiermengen, abweichenden Abgastemperaturen und einer veränderten Abgaszusammensetzung.

Durch die Integration des ursprünglich entfernten DPFs könnten die motorseitigen Partikelemissionen nahezu vollständig eliminiert werden. Die Reduzierung der AdBlue-basierten Partikelemissionen bleibt jedoch eine Herausforderung, da die Geometrie des AGN-Systems im Sinne der Gleichteilestrategie unverändert bleiben soll. Daher ist eine filternde Komponente stromabwärts der Dosierstelle erforderlich. Als effiziente und platzsparende Lösung wurde der SCR-Katalysator durch einen SDPF (SCR-DPF) ersetzt. So bleiben alle Hauptkomponenten und Prozesse erhalten, lediglich eine katalytische Komponente im System wird ersetzt. Diese Änderung führt zu einem leicht erhöhten Gegendruck, was zu einem geringen Mehrverbrauch führen kann.

5. Emissionen am Motorprüfstand

Sowohl im WHSC als auch im WHTC kann durch den Einsatz eines SDPF (SCR-beschichteter Dieselpartikelfilter) die erhoffte Reduktion der Partikelanzahl um bis zu 95% erzielt werden. Diese Effizienz des SDPF ist auch unter extremen Betriebsbedingungen, wie sie durch eine Motoreinstellung zur Simulation häufiger Klopfereignisse erzeugt werden, erhalten geblieben. Durch solche Anpassungen lässt sich das dynamische Verhalten des Motors unter variierenden Belastungen und während typischer Betriebszyklen untersuchen, wobei die Emissionen stets deutlich unter den strengsten Emissionsnormen gehalten werden können.

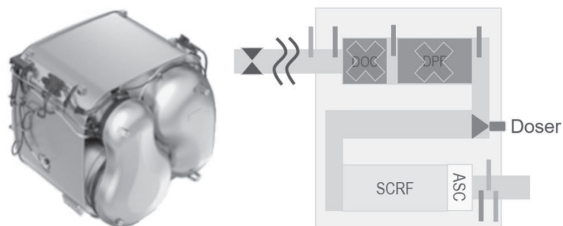


Abbildung 4: Layout AGN-Konzept ohne DOC/DPF und mit SCR in Serienschalldämpfer

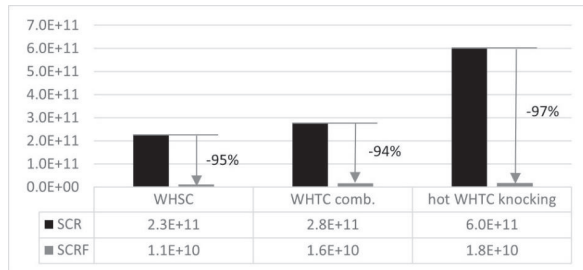


Abbildung 5: Reduzierung von PN10 durch SDPF in ausgewählten Zyklen

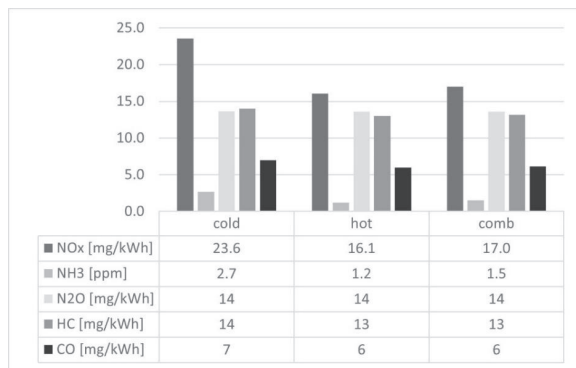


Abbildung 6: Gasförmige Emissionen im kalt/heiß WHTC

6. Emissionen im realen Fahrbetrieb

Die Evaluierung des SCR-Systems ohne Integration eines Diesel-Partikelfilters (DPF) wurde mittels PEMS (Portable Emission Measurement Systems) im Einklang mit den EuroVIe-Standards durchgeführt. Die bisherigen Messungen liefern jedoch keine Daten für zukünftig relevante Emissionskomponenten wie Ammoniak (NH₃), Lachgas (N₂O) und ultrafeine Partikel (PN₁₀). Ergänzende Untersuchungen auf dem Motorprüfstand zeigen, dass eine Reduktion der Partikelzählgrenze von 23 nm auf 10 nm zu einer Verdopplung, bis Verdreifachung der PN-Werte führt.

Obwohl zwischen den Konzepten mit SCR und SDPF auf dem Prüfstand keine Performance Nachteile festgestellt wurden, zeigen diese Messungen, dass das SDPF-System repräsentativ für den geplanten realen Einsatz ist. Es wird erwartet, dass die Partikelanzahl (PN) im realen Straßenbetrieb ähnlich stark reduziert wird.

Die Emissionsergebnisse, die während einer konformen EuroVIe-Messfahrt gesammelt wurden, sind in Tabelle 2 dargestellt und werden den Vorschlägen der Europäischen Kommission für die zukünftige EuroVII-Norm gegenübergestellt. Diese Daten

verdeutlichen das Potenzial des H₂-ICE (Wasserstoff-Verbrennungsmotor) zur Erfüllung strengerer Emissionsstandards.

Tabelle 2: PEMS-Messung ausgewertet nach EUVIe und EUVII.

** Hier noch PN₂₃ statt PN₁₀*

[mg/ kWh]	Cold	Hot	combined	EU VII RDE-limit
NO _x	13,42	17,04	16,53	260
PN ₂₃	1,54x10¹¹	1,86x10¹¹	1,81x10¹¹	9x10¹¹
CO	0	0	0	1950
THC	3,23	2,16	2,31	755

7. H₂-FC Truck „Bayernflotte“

Im Rahmen der Vorentwicklungsprojekte untersucht MAN neben den Wasserstoffverbrennungsmotoren auch den Einsatz von Brennstoffzellen in verschiedenen Fahrzeuganwendungen. Diese Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zielen darauf ab, maximale Synergien mit batterieelektrischen Sattelzugmaschinen zu erreichen, insbesondere durch die Ausrichtung auf den schweren Fernverkehr. Die Brennstoffzellensysteme (BZ-Systeme) weisen eine hohe Leistung von 240 kW auf und bieten im Batterieverbund eine für den Fernverkehr typische Antriebsleistung von über 300 kW. Das H₂-Speichersystem ist darauf ausgelegt, typische Fernverkehrsreichweiten von über 500 km abzudecken und maximiert die Synergien zum Tanksystem der H₂-ICE-Fahrzeuge.

Ein Hauptaugenmerk liegt auf der Entwicklung einer innovativen Betriebsstrategie, die eine optimale Kombination von Batterie- und Brennstoffzellenkapazitäten ermöglicht. Weiterhin wird an einem modularen und zukunftsfähigen Kühlkonzept gearbeitet, das eine hohe funktionale Integration verschiedener Komponenten und Subsysteme ermöglicht. Das Thermomanagement von Brennstoffzellen-betriebenen Fahrzeugen stellt eine der größten Herausforderungen für die Kundenakzeptanz und die Serienreife dar. Brennstoffzellen haben zwar grundsätzlich einen hohen Wirkungsgrad, die Verlustleistung wird jedoch größtenteils über die Fahrzeugkühlung bei niedrigen Temperaturen (80 bis 90°C) abgeführt. Dies stellt höhere Anforderungen an die Kühlleistung des Fahrzeugs im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor, dessen Kühlmitteltemperaturen bis zu 120°C erreichen können.

Die Begrenzung durch europäische Regelungen zu Fahrzeugdimensionen schränkt die mögliche Erweiterung der Kühlflächen ebenfalls ein. Auch eine Erhöhung der Lüfterleistung ist nur bedingt möglich, da dies zu parasitären Verlusten führt, die die Effizienz des Gesamtfahrzeugs signifikant reduzieren können. Als Lösung wurde ein spezifischer „Kühlturm“ entwickelt, in dem die Hoch- und Niedertemperaturkühlkreisläufe integriert sind. Für zukünftige Serienanwendungen ist es denkbar, abhängig von der Performance der Brennstoffzellen, Fahrzeuge ohne Kühlturm zu realisieren, die trotz geringfügiger Leistungseinbußen Kosten- und Packagevorteile bieten.