



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



**Fachworkshop im Rahmen der
Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie
der Bundesregierung (MKS)**

**„LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr – Entwicklungspotenziale der
Motorentechnologien“**

am 15. Oktober 2015

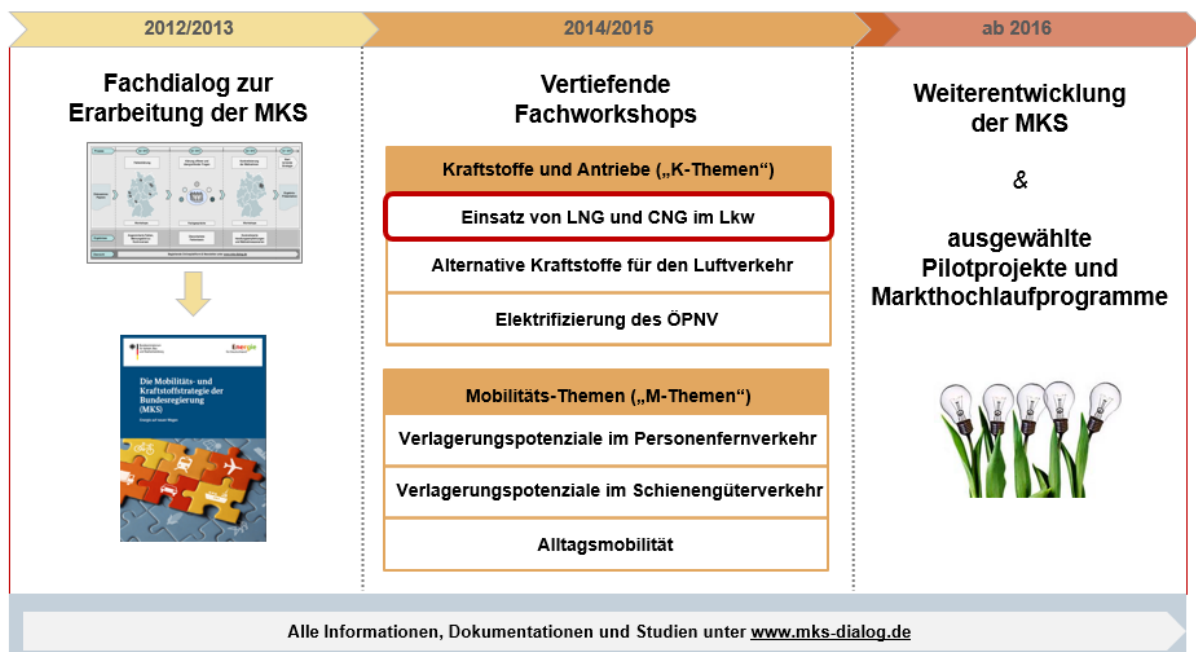
Berlin, 22. Januar 2016

Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie für Deutschland (MKS)

Im Rahmen der Energiewende steht auch der Verkehrssektor vor der Aufgabe, seine Energiebasis zu verändern und Treibhausgasemissionen einzusparen. Heute hat der Verkehrssektor einen Anteil von rund 30 Prozent am Endenergieverbrauch und ist für etwa 18 Prozent der CO₂-Emissionen in Deutschland verantwortlich. Zudem ist der Verkehr zu 95 Prozent von fossilen Energieträgern abhängig. In ihrem Energiekonzept hat sich die Bundesregierung deshalb das ambitionierte Ziel gesetzt, 40 Prozent des Endenergieverbrauchs im Verkehr bis 2050 gegenüber 2005 einzusparen.

Die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS) ist der konkrete Beitrag zur Gestaltung der Energiewende im Verkehrssektor und damit zur Erreichung der übergeordneten umwelt- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung (Klimaschutz, Sicherung der Energieversorgung und der internationalen Wettbewerbsfähigkeit). Damit besteht eine verkehrsträgerübergreifende Informations- und Orientierungsgrundlage über Technologien sowie Energie- und Kraftstoffoptionen. Sie bildet zudem den Ausgangspunkt, die Wissensbasis über Energie- und Technologiefragen zu verbreitern, um Rahmenbedingungen zu analysieren und darauf aufbauend Ziele und Maßnahmen zu priorisieren.

Da sich die Rahmenbedingungen (neue Technologien und Erkenntnisse zur Verfügbarkeit von Rohstoffen) in den Bereichen Verkehr und Energie ständig verändern und auch die Akteurskonstellationen einem stetigen Wandel unterliegen, hat die Bundesregierung beschlossen, die MKS stetig fortzuschreiben und konkrete Maßnahmen (z.B. Pilotprojekte und Markthochlaufprogramme) zu geeigneten Themen voranzutreiben. Für diese Weiterentwicklung wurde das wissenschaftliche Konsortium der MKS mit Untersuchungen zu zentralen Aspekten der MKS beauftragt. Um in den Untersuchungen auch die Perspektiven der Praktiker mit einzubeziehen und relevante Entwicklungen frühzeitig berücksichtigen zu können, werden zu geeigneten Zeitpunkten Fachworkshops mit zentralen Akteuren der Themenfelder umgesetzt.



Der Prozess zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung

Der Fachworkshop am 15. Oktober 2015

Im Fachworkshop „LNG und CNG im schweren Lkw-Verkehr– Entwicklungspotenziale der Motorentechnologien“ am 15. Oktober 2015 wurden die verschiedenen Technologieoptionen der Motorenentwicklung diskutiert, welche die Nutzung von Erdgas im schweren Lkw-Verkehr ermöglichen. Nach der Begrüßung durch Dr. Joachim Hugo vom BMVI stellten Herr Andreas Lischke vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und Herr Reinhold Wurster von der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) die in der wissenschaftlichen Begleitstudie identifizierten Motorentechnologien vor, die zur Weiterentwicklung und zur Nutzung im schweren Lkw-Verkehr geeignet sind. Im Anschluss daran hatten die Hersteller die Möglichkeit, ihre Einschätzungen zu den verschiedenen Entwicklungspfaden der einzelnen Technologie-Optionen zu erläutern. In der zweiten Diskussionsrunde standen mit der Perspektive der Nutzer deren Erwartungen an zukünftige Gas-Motoren im Vordergrund.

Ablauf des Fachworkshops

Uhrzeit	Programmpunkt
10.00 Uhr	Begrüßung und inhaltliche Einführung <ul style="list-style-type: none">• <i>Dr. Joachim Hugo, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)</i>
10.05 Uhr	Einordnung der Veranstaltung in die Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie und Vorstellung des Tagesablaufs <ul style="list-style-type: none">• <i>Christian Klasen, IFOK GmbH</i>
10.10 Uhr	Thematische Einführung und Vorstellung der wissenschaftlichen Untersuchung <ul style="list-style-type: none">• <i>Andreas Lischke, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)</i>• <i>Reinhold Wurster, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)</i>
10.30 Uhr	Diskussionsrunde 1: Hersteller-Pfade und Technologie-Potenziale <u>Referenten:</u> <ul style="list-style-type: none">• <i>Anders Edström, Scania Deutschland Österreich</i>• <i>Christian Gruber, MAN Truck & Bus AG</i>• <i>Manfred Kuchlmayr, Iveco Magirus AG</i>• <i>Olaf Röhl, Daimler AG</i>
12.15 Uhr	<i>Mittagspause</i>
12.45 Uhr	Diskussionsrunde 2: Anforderungen der Nutzer an die stärkere Nutzung von Erdgas im schweren LKW-Verkehr <ul style="list-style-type: none">• <i>Prof. Dr. Karlheinz Schmidt, Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V.</i>
14.15 Uhr	Verabschiedung <ul style="list-style-type: none">• <i>Dr. Joachim Hugo, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)</i>
14.30 Uhr	Ende des Fachworkshops

Moderation: *Christian Klasen, IFOK GmbH*

Thematische Einführung durch die wissenschaftliche Begleitung

Andreas Lischke (DLR) und Reinhold Wurster (LBST)

- Die Untersuchung befasst sich mit der Analyse von Hemmnissen bei der zukünftigen Nutzung von CNG und LNG als Kraftstoff für schwere Lkw sowie mit der Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Überwindung dieser. Im Gegensatz zum Pkw-Verkehr nahmen der Lkw-Verkehr und dessen Treibhausgasemissionen in Deutschland zuletzt zu. Um die Minderungsziele der Bundesregierung dennoch erreichen zu können, scheint die Verwendung alternativer, kohlenstoffarmer Kraftstoffe unvermeidbar. Diese Möglichkeit bieten unter anderem Erdgas/Methan und erneuerbares Methan.
- In der Untersuchung werden verschiedene Motorenkonzepte betrachtet, die für die Nutzung von Erdgas im schweren Lkw-Verkehr geeignet sind: den **Monofuel-Motor im stöchiometrischen Betrieb** sowie im **Magerbetrieb**, den **Dual-Fuel-Motor** sowie den **HPDI-Motor**, eine Abwandlung des Dual-Fuel-Motors mit Hochdruck-Direkteinspritzung. Monofuel-Motoren sind auf reines Erdgas optimiert, wohingegen Dual-Fuel- und HPDI-Motoren mit unterschiedlichen Zumischungen von Erdgas zu Diesel laufen. Der HPDI-Motor kann dabei Substitutionsraten von über 90% erreichen.
- Eine deutliche Emissionsreduktion mit geringem technischem und finanziellem Aufwand ist vom stöchiometrischen Monofuel-Otto-Motor zu erwarten. Vor allem die Abgasnachbehandlung mit 3-Wege-Katalysator zur Einhaltung des Euro-VI-Standards gestaltet sich hier relativ einfach. Für den Monofuel-Motor im Magerbetrieb liegen bisher noch keine ausreichenden Daten zur Emissionsreduktion vor. Dieses Konzept benötigt aber analog zum Dieselmotor voraussichtlich eine Abgasnachbehandlung mit SCR. Der Dual-Fuel-Motor hingegen zeigt Schwierigkeiten bei der Abgasnachbehandlung und kann die neuen Euro-VI-Abgasnormen bisher noch nicht einhalten. Der HPDI-Motor hingegen ist inzwischen so weit entwickelt und zulassungsfähig, dass er die Euro-VI und die EPA 2014-Kriterien erreichen kann. Sowohl Dual-Fuel als auch HPDI-Motoren benötigen voraussichtlich SCR-System mit Adblue und Partikelfilter, um Euro-VI einzuhalten. Beide Konzepte haben höhere Schallemissionen als Monofuel-Otto-Motoren.
- Den **Endenergiebedarf** des Diesels erreicht bei einer Tank-to-Wheel Betrachtung (TTW) aus heutiger Sicht nur der HPDI-Motor. Der Dual-Fuel ist mit dem Diesel unter Betrachtung der Euro-V Anforderungen vergleichbar, für Euro-VI liegen jedoch noch keine Daten vor. Die Ottomotoren schneiden beim Endenergievergleich zum Diesel noch schlechter ab. Der stöchiometrische Monofuel-Otto-Motor verbraucht in der Tank-to-Wheel Betrachtung gegenüber Dieselmotoren ca. 24% mehr Endenergie. Dieser Mehrbedarf könnte bis 2030 auf etwa 10% abgesenkt werden. Für den Monofuel-Motor im Magerbetrieb sind bislang keine validen Zahlen vorhanden.
- Hinsichtlich des **Primärenergiebedarfs** (Well-to-Wheel Betrachtung; WTW) ergeben sich ähnliche Verhältnisse wie bei der Endenergie. Einzig der HPDI-Motor erreicht im Jahre 2030 beim Einsatz von CNG 3% weniger Primärenergie als der Dieselmotor. Beim Einsatz von LNG im HPDI im Jahr 2030 wird hingegen 3% mehr Primärenergie benötigt. Beim Dual-Fuel gilt wie beim Endenergiebedarf, dass er unter Betrachtung der Euro-V Anforderungen mit einem Dieselmotor vergleichbar ist; Daten für die Euro-VI Anforderungen liegen hingegen auch hier noch nicht vor. Bei den Otto-Motoren liegen ebenfalls Daten für einen Motor vor. So ergibt sich beim stöchiometrischen Monofuel-Motor heute ein Mehrbedarf an Primärenergie von 20% für CNG und 28% für LNG. Bis 2030 lassen sich diese Mehrbedarfe auf 7% (CNG) bzw. 14% (LNG) reduzieren.
- Einen wesentlichen Vorteil gegenüber dem Dieselmotor erzielen die Motoren bei der Betrachtung der **Treibhausgasemissionen**. Bei der TTW-Betrachtung kann der HPDI demnach im Jahr 2030 21% THG-Emissionen einsparen; bei der WTT-Betrachtung erreicht er immerhin noch 19% bei CNG und 11% bei LNG. Der Dual-Fuel wird erneut nach der Euro-V Norm betrachtet und schafft bei der WTW-Betrachtung eine Einsparung von 25% bei CNG, kommt bei LNG jedoch auf +5%.

- Für den Monofuel-Ottomotor im Magerbetrieb liegen auch hier keine validen Daten vor. Der stöchiometrische Motor kann die heutigen 5% THG-Emissionseinsparung bei der TTW-Betrachtung bis 2030 noch auf 16% ausbauen. Bei der WTW-Betrachtung liegen die Daten für CNG im Jahr 2030 bei 13% Einsparung (heute -2%) und für LNG bei 5% (heute +7%).

Diese Angaben sind in der folgenden Tabelle übersichtlich zusammengefasst:

	Monofuel – Stöchiometrisch ($\lambda=1$)	Monofuel – Magerbetrieb ($\lambda>1$)	Dual-Fuel	HPDI (High Pressure Direct Injection)
Zündung	Fremdzündung		Kompressionszündung mit Diesel	
Substitution mit Erdgas und Betriebsweise	100 % (reiner Gasbetrieb)		< 70 % (kein reiner Gasbetrieb möglich)	< 95 % (kein reiner Diesel- oder Gasbetrieb möglich)
Motorleistung	Heute ca. 340 PS Bis 2030 >400 PS möglich		>450 PS möglich	
Abgasminderung Euro VI	3-Wege-Katalysator	SCR	SCR + DPF	SCR + DPF
Schadstoff-/ Schallemission (Lärm)	PM, NOx: mindestens -50 % gegenüber Diesel Euro VI; Motorschall ca. -10 % gegenüber Diesel	Konkrete Zahlen nicht vorhanden	Heute: keine Einhaltung Euro VI; Motorschall wie Diesel	zulassungsfähig („designed to meet“) Euro VI und EPA 2014; Motorschall wie Diesel
Primärenergie (WTW)	Heute: CNG +20 %, , LNG +28% 2030: CNG +7 % , LNG +14 % gegenüber Diesel	Konkrete Zahlen nicht vorhanden	Euro V wie Diesel, keine Daten für Euro VI vorhanden	Heute: keine Daten vorhanden 2030: CNG -3 % , LNG +3 % gegenüber Diesel
Endenergiebedarf (TTW)	Heute +24 %, 2030 +10 % gegenüber Diesel	Konkrete Zahlen nicht vorhanden	Euro V wie Diesel, keine Daten für Euro VI vorhanden	wie Diesel
THG-Emissionen (WTW) pro km	Heute: CNG -2 %, LNG +7 %; 2030 CNG -13 %, LNG -5 % gegenüber Diesel	Konkrete Zahlen nicht vorhanden	Heute (Euro V): CNG bis -25 %, LNG bis +5 % gegenüber Diesel 2030 unverändert zu heute	Heute: keine Daten vorhanden 2030: CNG: -19 %, LNG: -11 % gegenüber Diesel
THG-Emissionen (TTW) pro km	Heute:-5 % 2030: -16 % gegenüber Diesel	Konkrete Zahlen nicht vorhanden	Nicht zulassungsfähig, daher nicht weiter verfolgt	Heute: keine Daten vorhanden 2030: -21 % gegenüber Diesel
Entwicklungsstand	Ausgereift, bereits im Einsatz	Herausfordernd	Euro V ausgereift Euro VI in Entwicklung	in Erprobung

Quellen: [Daimler AG 2014, 2015], [Westport 2015a,b], [dena 2014a] und eigene Berechnungen.
Erläuterung: λ (Lamda) = Verbrennungsluftverhältnis, das die beim Verbrennungsprozess verfügbare Luftmasse im Verhältnis zur für eine vollständige Verbrennung nötige Luftmasse beschreibt ($\lambda > 1$ = Magerbetrieb = Luftüberschuss)

Übersicht zu Motorenkonzepten und deren technischen Eigenschaften

- Die wissenschaftliche Begleitung spricht sich dafür aus, die Entwicklung energieeffizienterer Erdgas-Motoren für Lkw technologieneutral anzugehen. Es sollten Rahmenbedingungen geschaffen werden, die die Nutzung von CNG und LNG im Vergleich zu Diesel wirtschaftlich attraktiv gestalten. Die Formulierung von Treibhausgaszielen für schwere Lkw könnte Anreize schaffen, auf Erdgas als Kraftstoff umzusteigen.
- Zur deutlichen Reduzierung von THG-Emissionen im Lkw-Fernverkehr sei die Verwendung von Biomethan und synthetischem EE-Methan unbedingt notwendig. Daher sollte der Anteil erneuerbaren Kraftstoffs von der Politik reguliert werden. So können Klimaschutzpolitische Aspekte einer Umstellung von Diesel auf CNG, LNG sowie Bio-Methan, EE-Methan oder EE-Diesel honoriert und wirtschaftlich gestaltet werden. Dabei müssen die Unterschiede der Kraftstoffbereitstellungskosten zwischen erneuerbarem und fossilem Kraftstoff bedacht werden. Der Mehrpreis für LNG-Fahrzeuge sei bei dem heutigen, reduzierten Steuersatz nach ca. vier Jahren über geringere Kraftstoffkosten amortisierbar. Für die Planungssicherheit der Nutzer sei die Fortführung einer Steuerermäßigung dringend notwendig.

Die Präsentation der wissenschaftlichen Begleitung ist unter diesem [Link](#) abrufbar.

Diskussionsrunde 1 - Hersteller-Pfade und Technologie-Potenziale

In der ersten Diskussionsrunde stellen die anwesenden Hersteller ihre Sichtweisen zu verschiedenen Pfaden der Motorenentwicklung vor und diskutierten diese mit den weiteren Teilnehmenden. Die zentralen Ergebnisse sind im Folgenden aufgeführt.

Motorentechnologie

Alle Hersteller wollen das Konzept der Lambda-1-Motoren weiterverfolgen, doch sollen je nach Hersteller auch die anderen Technologien kontinuierlich weiterentwickelt werden. Hinsichtlich der Zeiträume für die Entwicklungen und möglicher Zulassungen wurde darauf verwiesen, dass genaue Einschätzungen aufgrund der Forschungsintensität noch nicht gemacht werden können.

- Der **stöchiometrisch verbrennende Monofuel-Ottomotor ($\lambda = 1$)** kann schon heute – abhängig vom Betriebspunkt – Wirkungsgrade von bis zu 41% erreichen (Diesel: 43%). Die Nutzung eines 3-Wege-Katalysators ist günstig, technisch einfach umzusetzen und ermöglicht eine Reduktion der Schadstoffemissionen (Stickoxide, Schwefeloxide, Feinstaub) und somit die Einhaltung der Euro-VI-Normen. Reduktionen im Endenergieverbrauch seien ebenfalls möglich, jedoch in kleinerem Umfang. Dabei sei zu bedenken, dass auch die Dieselmotoren weiterentwickelt werden würden. Der Monofuel-Ottomotor ist bereits am Markt verfügbar und auch für den Heavy-Duty-Bereich zu verwenden. Zurzeit fahren diese Lkw mit Motoren mit bis zu 340 PS, auf den Prüfständen auch bereits mit bis zu 400 PS; die Marktzulassung für diese wird jedoch noch mindestens zwei Jahre dauern. Der Vorteil ist die vergleichsweise einfache Technologie, die sie wenig störanfällig und in der Produktion kostengünstiger macht. Nachteil gegenüber dem klassischen Dieselmotor ist hingegen der Bedarf an Zündkerzen und die höheren Verbrennungstemperaturen, wodurch sich der Wartungsaufwand erhöht (hier besteht evtl. noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Haltbarkeit der Motoren). Bei dieser bereits recht ausgereiften Motorenvariante wäre die weitere Forschung und Entwicklung vor allem auf die Motorsteuerung zu konzentrieren. Der Motor kann sowohl mit LNG als auch mit CNG als Kraftstoff betrieben werden.
- Der **Monofuel-Ottomotor mit magerer Verbrennung ($\lambda > 1$)**, also mit Luftüberschuss, funktioniert ähnlich wie der oben genannte Lambda-1-Motor. Er benötigt jedoch ein komplexeres System der Abgasnachbehandlung. Dazu gehört neben einem SCR-System mit Adblue auch ein Oxidationskatalysator, um den Methangrenzwert einhalten zu können.

- Auch der Magermotor ist kraftstoffunabhängig und kann sowohl mit LNG als auch mit CNG betrieben werden. Eine Weiterentwicklung dieses Motors kann in Betracht bezogen werden, weil die im Motorprozess ablaufenden thermodynamischen Vorgänge vorteilhaft sind. Forschungsbedarf besteht evtl. hinsichtlich der Abgasnachbehandlung. Aufgrund der Komplexität der für den Magermotor notwendigen Entwicklungen wird empfohlen, eher auf den bereits etablierten Lambda-1-Motor zu setzen.
- Der **Dual-Fuel-Motor** ist ein Motorsystem, bei dem der Diesel mit unterschiedlich hohen Anteilen durch Erdgas substituiert wird. Der Dual-Fuel zeichnet sich durch eine externe Gemischbildung und Selbstzündung aus. Vorteile besitzt er vor allem bezüglich der Kraftstoffversorgung über die bestehenden Infrastrukturen, da er auch nur mit Diesel betrieben werden kann. Dies führt zu einer verstärkten Geruchsentwicklung. Zudem bedeutet es, dass ein relativ großer Diesel-Tank vorhanden sein muss, wodurch das Fahrzeuggewicht erhöht wird. Auch ist die Abgasnachbehandlung, wie beim Dieselmotor, komplex. Es muss neben einem SCR-Filter mit Adblue auch ein Oxidationskatalysator verbaut werden, um die Methangrenzwerte einhalten zu können. Bisher kann der Dual-Fuel die Euro-VI-Grenzwerte nicht einhalten. Das heißt, die Schadstoffemissionen sind bisher nicht ausreichend reduzierbar. Ein Hersteller sah einen besonderen Vorteil bei Dual-Fuel-Lkw in deren Wiederverkaufswert (i.d.R. in Größenordnungen von ca. 10% des Neupreises nach ca. 700.000 km), da die Kraftstoffflexibilität einen breiteren Gebrauchtmärkte eröffnet.
- Der **HPDI-Motor** ist ein Dual-Fuel-Motor, bei dem gleichzeitig Gas und Diesel unter Hochdruck über einen Injektor eingespritzt werden. Die Abgasnachbehandlung umfasst wie beim Dieselmotor einen SCR-Filter mit Adblue, einen Partikelfilter und einen Oxidationskatalysator. Damit wird es dem HPDI-Motor möglich sein, die Euro-VI und die EPA 2014 (USA)-Emissionsgrenzwerte für Luftschadstoffe einzuhalten. Auch die Effizienz und Fahrbarkeit betreffend ähnelt der HPDI dem Dieselmotor. Dennoch fehlt bisher die technische Reife für eine Serienproduktion, da die Motorenkomponenten noch recht störanfällig sind. So ist der Injektor sehr filigran und auch die Kraftstoffaufbereitung ist noch wartungsintensiv und fehleranfällig. Herausfordernd ist auch die Druckerzeugung für die Einspritzung mithilfe einer LNG-Hochdruckpumpe, für die 300-500 bar notwendig sind. Da CNG-Tanks nur auf 200 bar ausgelegt sind, wird die Verdichtung mittels einer Kryopumpe bzw. mittels Gashochdruckeinblasung bevorzugt. Der einzige HPDI-Motor auf dem Markt kommt von Westport. Die anderen Hersteller gehen noch von notwendigen Weiterentwicklungen aus. Beim HPDI-Motor wird zurzeit aus Kosten- und Effizienzgründen die Nutzung von LNG als Kraftstoff als der zu präferierende Weg betrachtet.

Leistung und Endenergieverbrauch

- Kein Gasmotorenkonzept kann den Dieselmotor heute in Effizienz und Leistung übertreffen. Der HPDI-Motor hat jedoch das Potenzial, perspektivisch die Leistung des Dieselmotors zu erreichen. Damit stimmen die Teilnehmenden mit der Ansicht der wissenschaftlichen Begleitung überein, dass Gasmotoren auch in Zukunft den Endenergieverbrauch von Dieselmotoren nicht unterbieten können.
- Gegenüber Gasfahrzeugen bestehen oft Bedenken, dass sie wegen der Tanks schwerer als Dieselfahrzeuge seien. Dabei sollte jedoch auch die Gewichtsbelastung durch den Kraftstoff mit einbezogen werden. Da Erdgas bezogen auf seinen Energiegehalt leichter ist als Diesel, gleicht dies den Gewichtsaspekt aus. Bei Dual-Fuel Motoren wird aber das Eigengewicht und somit der Energieverbrauch des Fahrzeugs durch das Vorhandensein von zwei Tanks deutlich erhöht.

Treibhausgas-Emissionen

Zur Erreichung langfristiger Reduktionsziele von Treibhausgasemissionen aus dem Lkw-Verkehr ist eine Betrachtung der Vorkette des Kraftstoffes unumgänglich. Auch die Hersteller bestätigen, dass hier ein wesentlicher Ansatzpunkt liegt. So kann ein Fahrzeugkonzept möglicherweise durch geringe Tank-to-Wheel-Emissionen überzeugen, die tatsächlichen Emissionen sowie der Energieverbrauch werden jedoch nur in einer Well-to-Wheel-Analyse deutlich. Wird beispielsweise über einen langen Transportweg importiertes LNG verwendet oder Gas, welches aus nicht-EE-Strom erzeugt wurde, so sind die Emissionen, welche durch eine Well-to-Wheel-Analyse berechnet werden, deutlich höher. Es ist davon auszugehen, dass im Laufe der Entwicklung immer größere Anteile des CNG/LNG-Kraftstoffs aus Biomasse oder EE-Strom erzeugt werden können. Wenngleich wesentlich sauberer, bedarf es für die verstärkte Nutzung von nachhaltigem Methan der gezielten Anpassung der Rahmenbedingungen. Nur so kann der erneuerbare Kraftstoff in absehbarer Zeit preislich mit fossilem Erdgas konkurrieren. Auch muss eine Diskussion über die Verfügbarkeit entsprechender Mengen Biomasse beziehungsweise EE-Strom geführt werden, da die Ausweitung auf den gesamten Lkw-Verkehr enorme Mengen Rohstoffe erfordern würde.

- Der stöchiometrisch verbrennende Otto-Motor ($\lambda=1$) mit 3-Wege-Katalysator hat das größte Potential zur Reduktion von Schadstoffemissionen. HPDI/Dual-Fuel-Motoren benötigen hingegen Partikelfilter sowie SCR mit Adblue und unterscheiden sich bezüglich ihrer Stickoxide und Partikelemissionen nicht wesentlich vom konventionellen Dieselmotor. Dies gilt auch für die Lärmemissionen, bei denen ebenfalls der Lambda-1-Motor die höchsten Reduktionspotenziale hat. Eine Fokussierung auf die Reduktion von Lärmemissionen könnte den Gasmotor fördern.
- Die Teilnehmenden (insb. Industrievertreter und Forschungseinrichtungen) bewerten eine Erhöhung der Grenzwerte für Luftschadstoffe nicht als geeignete Maßnahme, um Erdgas-Lkw weiter zu fördern. Bei den meisten Abgaskomponenten sei man inzwischen an der Nachweisgrenze angelangt, wofür enorme Entwicklungsaufwände seitens der Industrie für die Einhaltung des Euro-VI Standards geleistet wurden. Bei verschärften Grenzwerten für Schadstoffe und CO₂ oder der Durchsetzung von Null-Emissions-Zonen in Städten, werden auch Gasantriebe die Anforderungen nicht erfüllen können.

Kraftstoffart und Reichweite

- Die gegenwärtige Reichweite bei Diesel-Lkw von etwa 2.000 km stellt keinen geeigneten Maßstab dar, da aufgrund der Lenkzeitbeschränkung nur ca. 700 km gefahren werden können und diese Reichweiten auch mit Gas-Lkw erreicht werden. Zudem würden die hohen geforderten Reichweiten den „Tanktourismus“ fördern. Jedoch ist die Reichweite dahingehend relevant, als dass sie den Fahrern ermöglicht, regional und temporär günstige Kraftstoffpreise auszunutzen. Zur Reichweitenerhöhung ist daher grundsätzlich die Erhöhung der Tankmengen geeignet. Größere Tanks und/oder längere Fahrzeuge führen jedoch zu einer Gewichtserhöhung der Fahrzeuge und des zulässigen Achsgewichtes.
- LNG hat gegenüber CNG den Vorteil, mehr Energie in geringerem Volumen speichern zu können. Mit großen Tanks können sehr hohe Reichweiten ermöglicht werden. Nachteilig wirkt sich bei beiden Speichersystemen das bisher in Deutschland schlecht oder gar nicht ausgebaute Tankstellennetz aus. Die Integration großer CNG-Speichermodule ist in Europa gegenwärtig ohne eine Änderung des Regelwerks (Länge der Lkw-Zugmaschine) nicht möglich. Zudem könne CNG nur mit sehr großen und schweren Tanks relevante Reichweiten erzielen.
→ **Nachrichtliche Anmerkung von LBST:** Unter Verwendung aktueller Datenblätter von Tankherstellern nähern sich die Tanksystemgewichte für CNG und LNG bezogen auf die gleiche Betankungsmasse einander an. Das Volumen des CNG-Speichersystems ist nichtsdestoweniger ca. Faktor 2,5 bis 3 größer gegenüber einem gleichwertigen LNG-Speichersystem.

- Gegenwärtig haben auch LNG-Fahrzeuge teilweise noch einen zusätzlichen CNG-Tank.

Aus Sicht einer LNG-Lösung ist die Kombination von CNG- und LNG-Tanks bis zur Bereitstellung einer ausreichenden LNG-Infrastruktur höchstens als Brückenlösung zu sehen, da die Nutzung zweier Kraftstoffe aufwändig in der Umsetzung sei.

Kosten

- Da der Dieselmotor bezüglich seiner Leistung perspektivisch nicht übertroffen werden kann, müssen Gasmotoren durch Kostenargumente überzeugen. Dazu zählen neben den Kraftstoffkosten, je nach Motorenmodell, auch die Preise für AdBlue, Komponenten, Ersatzteile und Service- sowie Wartungskosten. Ein Nachteil von Gasmotoren gegenüber konventionellen Dieselmotoren sind die längeren Wartungsintervalle, die jedoch schrittweise angeglichen werden sollen. Auch störanfällige Teile wie die Zündkerzen im Monofuel-Motor oder der Injektor im HPDI-Motor sind noch herausfordernd.
- Für die Förderung von Erdgasmotoren ist auch der Preisunterschied zwischen Erdgas und Diesel relevant. Dementsprechend wirken sich die Entwicklung des Erdölpreises und die Kraftstoffsteuer stark auf die Nachfrage nach Gas-Lkw aus.
- Ein Grund für die aktuell noch hohen Kosten für Gas-Lkw ist der geringe Marktanteil. Die Reduzierung der Herstellungskosten kann entsprechend über erhöhte Stückzahlen erfolgen. Um eigene Linien zu produzieren, werden von Herstellerseite Anteile von ca. 20 Prozent der verkauften Lkw genannt.
- Ein Hindernis für den Gas-Lkw besteht darin, dass für ihn noch kein Zweitmarkt besteht. So hat ein Dieselmotor generell das Potenzial für ein „zweites Leben“, da er auf Grund der vorhandenen Kraftstoffinfrastruktur überall hin verkauft werden kann. Hier hat das Dual-Fuel-Aggregat einen Vorteil.

Einzelne von den Herstellern gezeigte Folien sind am Ende der Dokumentation als Anhang beigefügt.

Diskussionsrunde 2 – Anforderungen der Nutzer an die stärkere Nutzung von Erdgas im schweren Lkw-Verkehr

Die zweite Diskussionsrunde widmete sich vorrangig der Nutzerperspektive und deren Anforderungen an Gas-Lkw. Als Vertreter der Nutzerseite stellte Herr Prof. Dr. Karlheinz Schmidt vom Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung e.V. seine Sicht zum Thema dar und diskutierte diese anschließend mit den Anwesenden.

Amortisation

- Für Lkw ist eine Amortisationsdauer von drei Jahren üblich, wobei die meisten Fahrzeuge ohnehin über drei bis vier Jahre geleast werden. Die Herausforderung bei der Amortisation besteht also gleichermaßen für Leasinganbieter und Nutzer. Die Lebensdauer der Gas-Lkw scheint nach 700.000 km erreicht. Im Nahverkehr ist die Amortisationszeit länger, da die Fahrzeuge durch eine geringere jährliche Laufleistung für bis zu acht Jahre genutzt werden können. Insofern ist der Stadt- und Regionalverkehr trotz kürzerer täglicher Fahrleistungen ein wesentlicher Markt für Gas-Lkw. Der Restwert eines Gasfahrzeugs ist sehr gering, vor allem da die Fahrzeuge auf dem Zweitmarkt aktuell nicht wiederzuverwerten sind (Osteuropa, Afrika). Dort fehlt die notwendige Tankstelleninfrastruktur zur weiteren Nutzung von Gas-Lkw.
- Die Bereitschaft, für emissionsarme Transportdienstleistungen zu zahlen, ist gering, da der Markt unter starkem Konkurrenzdruck steht.

Die Finanzierbarkeit der Fahrzeuge ist also ein wesentlicher Aspekt für die Nutzung von Gas-Lkw. Es scheint schwierig, mittelständische Logistiker von den notwendigen Investitionen zu überzeugen.

- Dies kann durch einen geringen Kraftstoffpreis und eine vergrößerte Investitionssicherheit geschafft werden. Auch eine eigene Tankanlage kann sich positiv auswirken, da diese unabhängig von der an Tankstellen auftretenden Preisvolatilität die eigene Flotte ohne dieses Risiko mit Kraftstoff versorgen kann. Bei großen Logistikunternehmen und mittelständischen Unternehmen, die täglich über 100 Fahrzeuge im Verteilerverkehr abfertigen, können somit Knotenpunkte geschaffen werden. Auch die Organisation des Tankstellennetzes, beispielsweise durch den Zusammenschluss von Betriebstankstellen, ist denkbar.

Handhabung

- Generell ist die Branche sehr offen gegenüber neuen Technologien. Die Nutzer wünschen sich einen Gasmotor, der sich genauso fährt wie ein Dieselmotor. Der ausgereifte Dieselmotor ist im Lkw-Verkehr die zentrale Referenzgröße. Im Gegensatz zu den Dieselmotoren gibt es bei Erdgasmotoren noch nicht für jedes Anwendungsfeld ein passendes Motorenmodell. Es ist davon auszugehen, dass sich auch hier die Palette in den nächsten Jahren erweitern wird. In einigen Bereichen leistet der Erdgasmotor jetzt schon, was der Diesel nicht kann. Beispiel dafür ist die geringe Lärmemission der Erdgasmotoren, welche neue Anwendungsbereiche, wie den nächtlichen innerstädtischen Lieferverkehr, ermöglicht.
- Von Nutzerseite wird die Frage nach der Sicherheit von CNG-Lkw gestellt. Die Hersteller weisen darauf hin, dass die Tanks Benzinfeuer standhalten und auf Grund ihrer Auslegung ein besseres Crash-Verhalten als Benzin- und Diesel-Tanks besitzen. Es existieren entsprechende Sicherheitsnormen und -überprüfungen. Erfahrungen aus Argentinien belegen zudem, dass CNG-Erdgasfahrzeuge im Pkw-Bereich insgesamt sicherer sind als Benzin- und Dieselfahrzeuge.
- Viele Anforderungen (Amortisation, Leistung, Laufzeit/Qualität) führen zu langen Entwicklungszyklen. Es sei schwer einzuschätzen, wann welche Entwicklungen verfügbar sein werden. Dies macht es für Nutzer schwer einschätzbar, wann sich eine Investition in einen Gas-Lkw lohnt.
- Die Betankungsgeschwindigkeit stellt die Nutzer von CNG-Lkw vor Herausforderungen. Die meisten heutigen CNG-Tankstellen in Deutschland sind häufig nicht für große Lkw geeignet, was die nutzbare Infrastruktur einschränkt. Diese verursachen für CNG längere Tankzeiten, teilweise sogar doppelt so lang wie für die Betankung mit Diesel. Hinsichtlich der Abgabemenge pro Zeiteinheit optimierte CNG-Tankstellen in anderen Ländern zeigen, dass CNG-Busse (ca. 120 kg CNG) in 3 Minuten betankt werden können, also vergleichbar wie Dieselfahrzeuge.
- Die Verkleinerung des Fahrerhauses, zu Gunsten eines größeren Tanks, ist aus Nutzersicht nicht möglich. Die Fahrerkabine wird als Unterbringung während den Ruhezeiten genutzt und erlaubt keine Einschränkung des Komforts. Eine regulatorische Verlängerung der Zugmaschine könnte eine Lösung sein, die – ähnlich wie die derzeit geplante Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts von Nutzfahrzeugen mit alternativem Antrieb um eine Tonne – zu diskutieren und im Rahmen einer europäischen Regelung zu verankern ist.

Rahmenbedingungen und Förderbedarf

- Ein Pilotprojekt, welches Regionalverkehre und Logistikzentren verbindende Schwerverkehre mit einbezieht, könnte zeigen, wozu die Erdgastechologie in der Lage ist. Idealerweise würde eine derartige Pilotierung von einem großen Logistiker oder Stückgutunternehmen durchgeführt werden. Die Förderung sollte sich dabei auf die Einrichtung von Tankstellen und nicht auf die Anschaffung von Einzelfahrzeugen konzentrieren.

Das geplante „Förderprogramm für energieeffiziente Nutzfahrzeuge“ bezieht sich nur auf die Anschaffung von Fahrzeugen. Da sich diese auch in der Anwendung bewähren müssen, wäre ein groß angelegtes Testprojekt zielführender.


- So könnte ein Best-Practice-Beispiel geschaffen werden, welches Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Technologie untersucht und aufzeigt, inwiefern eine Umsetzungsfähigkeit im größeren Rahmen möglich wäre. Auch kann dadurch definiert werden, wie eine funktionierende Infrastruktur ausgestaltet werden muss. Eine erfolgreiche Demonstration bzw. Pilotierung auf deutscher Ebene kann auch Vorbildwirkung für eine europäische Entwicklung haben.
- Es ist zu beachten, dass im Jahr 2020 – sollte sich die derzeitige Entwicklung fortsetzen – voraussichtlich nur noch rund 50% der Lkw auf den deutschen Mautstrecken von in Deutschland zugelassenen mautpflichtigen Lkw gefahren werden. Um auch außerhalb Deutschlands Ansprechpartner für die Nutzung von Erdgasmotoren im Lkw-Fernverkehr zu finden, ist die Markteinführung des Erdgas-Lkw mit mehr als 400 PS eine wichtige Voraussetzung.
- Um die Verfügbarkeit von Kraftstoffen auf wichtigen Korridoren zu fördern, sollte auch hier ein entsprechendes deutsches Programm eingerichtet werden. Als wichtige Aktivitäten auf europäischer Ebene sind das LNG Blue Corridor Projekt sowie das HDGas Projekt (Heavy Duty Gas Engines integrated into Vehicles) zu sehen.
- Um den Logistikmarkt zu Investitionen anzuregen, muss eine finanzielle Planungssicherheit gegeben sein. Die Kraftstoffsteuer ist ein einfaches regulatorisches Mittel den Kraftstoffpreis für den Nutzer so zu regulieren, dass Anreize zum Einsatz alternativer Antriebe geschaffen werden. Die Schaffung von Sicherheit bezüglich der für Erdgas anwendbaren Energiesteuer ist daher für die Nutzer relevant. Dabei wäre zum Beispiel ein für den Erstbesitzer festgelegtes befristetes Steuerprivileg ein denkbarer Anreiz.


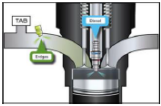
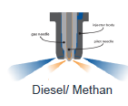
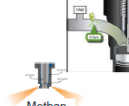
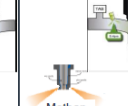
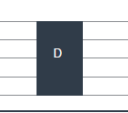
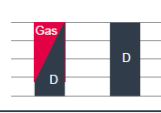
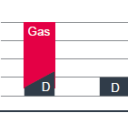

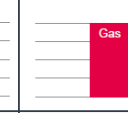
Impressionen des Fachworkshops



NFZ-Antriebskonzepte im Vergleich

Erdgas vs. Diesel





	Diesel DI	DualFuel	Dual Fuel HPDI	NG Magermotor	NG Lambda 1
Gemischbildung					
	innere	äußere	innere	äußere/innere	äußere (Serie) / innere*
Substitutionsrate 100% 75% 50% 25% 0% D D D D D					
Dieselpetrieb	✓	✓	✗	✗	✗
Effizienz	100%	95-100%	100%	80-85%	75-85 / 90-95%*
Leistungsdichte	100%	100%	100%	80-85%	80-85 / 90-95%*
Erfüllung Euro VI	Referenz	--	-	-	++
Wiederverkauf	Referenz	+	-	-	-
Technische Komplexität	Referenz	-	--	O	+
	++ sehr gut	+ gut	O neutral	- schlecht	-- sehr schlecht

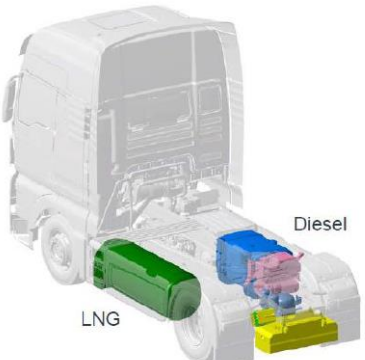
* mit AGR, DI, variablen Steuerzeiten

MAN Truck & Bus AG
Dipl.-Ing. Christian Gruber
MKS-WS CNG/LNG im LKW
15.10.2015

LNG Sattelzug mit DualFuel-Antrieb

Entwicklung im Rahmen des EU-Vorhabens HDGAS *



LNG


Diesel

Fahrzeug

- TGX-Sattelzug, 40 t zul. GGW
- Ziel: - 10% CO₂ im Vergleich zum Diesel-Fzg. (tank to wheel)
- Projektstart 05/2015
- Erste Ergebnisse ab 2017


DualFuel Antrieb

- Betrieb mit LNG/Diesel
- LNG-Substitution 0-80% (externe Gemischbildung)
- Basismotor D2676 LF25 / Euro VI (480 PS, 2300 Nm)



LNG Tank

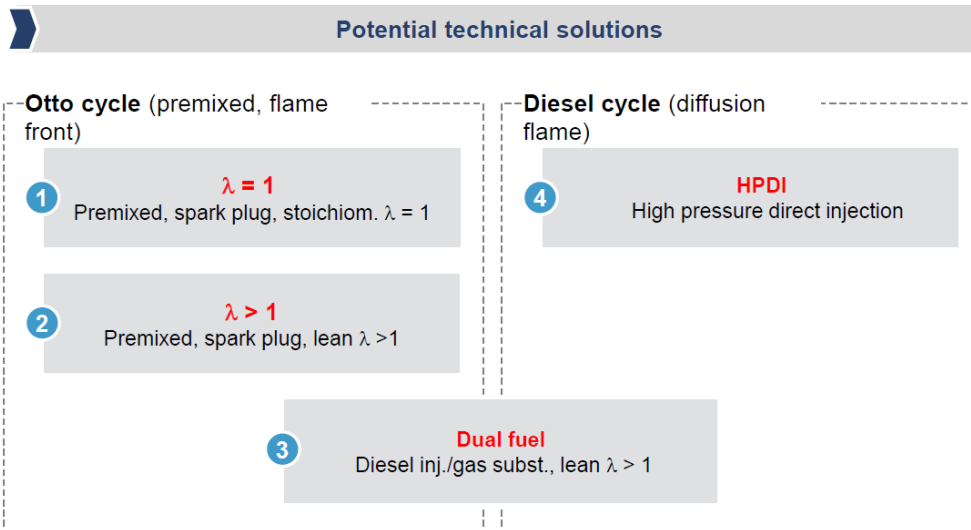
- Kryogenspeicherung (-162° C)
- Doppelter Energieinhalt im Vergleich zu CNG
- Reichweite > 800 km



* Dieses Projekt wird im Rahmen des „Horizon 2020 Research and Innovation“- Programmes der Europäischen Kommission unterstützt. Weitere Infos: www.hdgas.eu, Grant Agreement no. 653391.

DAIMLER

Combustion principles overview - Mixture formation and ignition

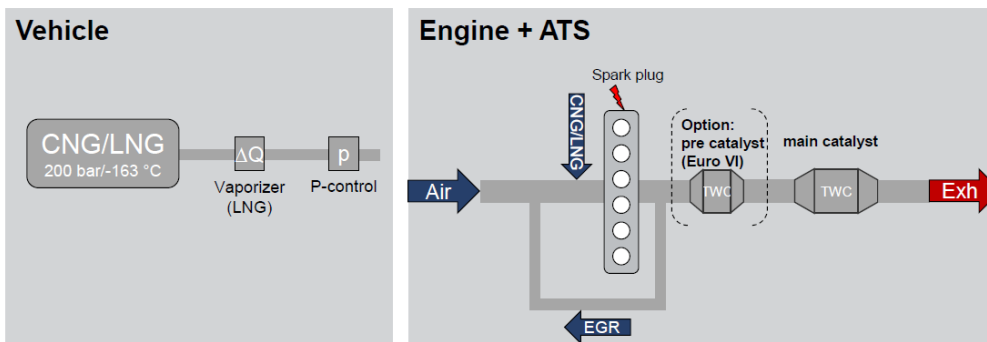


Daimler Trucks | October 15, 2015 | confidential

2

DAIMLER

1 Technology: $\lambda = 1$, spark ignition



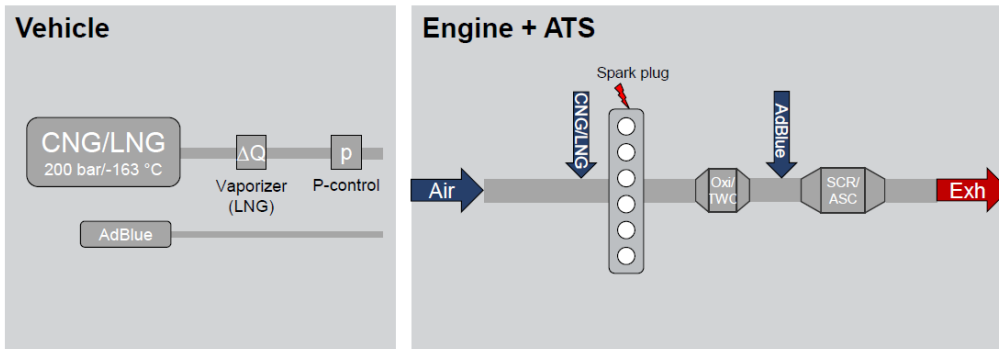
Characteristics

- Principle: Otto-cycle engine with spark plug + manifold injection
- CNG/LNG: both applicable
- Aftertreatment: three way catalyst only
- Thermal efficiency: significantly lower than Diesel
- CO₂ emissions: lower than Diesel
- Euro VI/EPA10 emissions: uncritical
- System complexity: relatively low
- Thermal stress: higher than Diesel

Daimler Trucks | October 15, 2015 | confidential

3

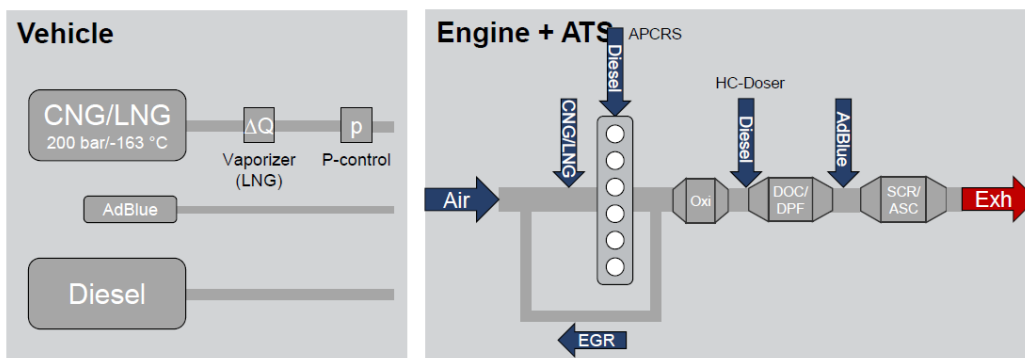
2 Technology: lean burn $\lambda > 1$, spark ignition



Characteristics

- Principle: Otto-cycle engine with spark plug + manifold injection
- CNG/LNG: both applicable
- Aftertreatment: Oxi-cat + SCR (AdBlue needed)
- Thermal efficiency: higher than $\lambda = 1$ but lower than Diesel
- CO₂ emissions: even lower than $\lambda = 1$
- Euro VI/EPA10 emissions: achievable
- System complexity: relatively low
- Thermal stress: significantly lower than $\lambda = 1$

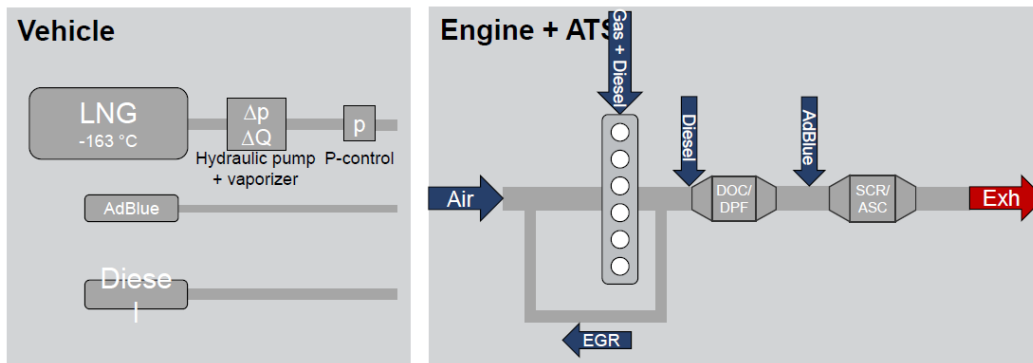
3 Technology: Dual-fuel, compression ignition



Characteristics

- Principle: Diesel-cycle engine with additional gas manifold injection
- CNG/LNG: both applicable (Diesel and AdBlue needed)
- Aftertreatment: Oxi-cat + Euro VI / EPA10 box (Diesel)
- Thermal efficiency: lower than Diesel
- CO₂ emissions: higher than Diesel (due to massive thermal management)
- Euro VI/EPA10 emissions: not achievable with technically reasonable efforts
- System complexity: high ATS complexity and high calibration/OBD efforts necessary
- Thermal stress: same as Diesel

4 Technology: HPDI, compression ignition



Characteristics

- Principle: Diesel-cycle engine with direct injection
- CNG/LNG: only LNG applicable
- Aftertreatment: identical to Diesel
- Thermal efficiency: comparable to Diesel
- CO₂ emissions: significantly lower than Diesel and $\lambda = 1$
- Euro VI/EPA10 emissions: achievable
- System complexity: very high (1 inj. for gas + Diesel; high pressure/low temp. cryogenic pump, ...)
- Thermal stress: same as Diesel

Daimler Trucks | October 15, 2015 | confidential

6

Conclusion of technical assessment

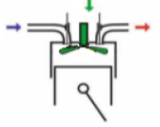
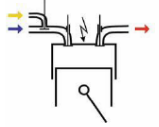
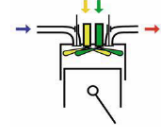
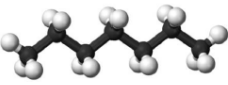

	$\lambda = 1$	Lean burn	Dual Fuel	HPDI
Euro VI / EPA'10	o	o	-- ⚡	o
Efficiency	-	-	-	o
CO ₂	+	+ / ++	-	++
CNG + LNG	++	++	++	--
Engine complexity	+	++	-	-
ATS complexity	++	+	-	o
AdBlue	++	o	o	o
Thermal load	-	- / o	o	o
Power/torque	-	- / o	o / -	o
Technological risk	o	o	-	-
Engine brake	-	-	o	o
Overall assessment	✓	✓	✗	✓

++ significantly better than Diesel - worse than Diesel
 + better than Diesel -- not applicable
 o similar to Diesel ? to be evaluated

Daimler Trucks | October 15, 2015 | confidential

7

HPDI with >20% CO₂-Potential & Diesel Characteristics SI with ~10% CO₂-Potential

	Diesel	SI	HPDI
Combustion			
Fuel Structure			
Power / Torque	Baseline	~ -10% to -15%	like Baseline
Efficiency (BTE)	Baseline	~ -5 ... -8%	like Baseline
CO ₂ Emissions	Baseline	~ -10%	~ -20%

Kontakt und weitere Informationen

Für Rückfragen stehen Ihnen zur Verfügung:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Andreas Lischke
Institut für Verkehrsforschung
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
andreas.lischke@dlr.de

LBST – Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH

Reinhold Wurster
Daimlerstr. 15, 85521 München-Ottobrunn
reinhold.wurster@lbst.de

DBFZ – Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

Karin Naumann
Bereich Bioraffinerien (BR)
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
karin.naumann@dbfz.de

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH

Christoph Heidt
Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
christoph.heidt@ifeu.de

IFOK GmbH

Christian Klasen
Projektbüro zum Fachworkshop
Reinhardtstraße 58, 10117 Berlin
christian.klasen@ifok.de

Begleitende Webseite zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie: www.mks-dialog.de