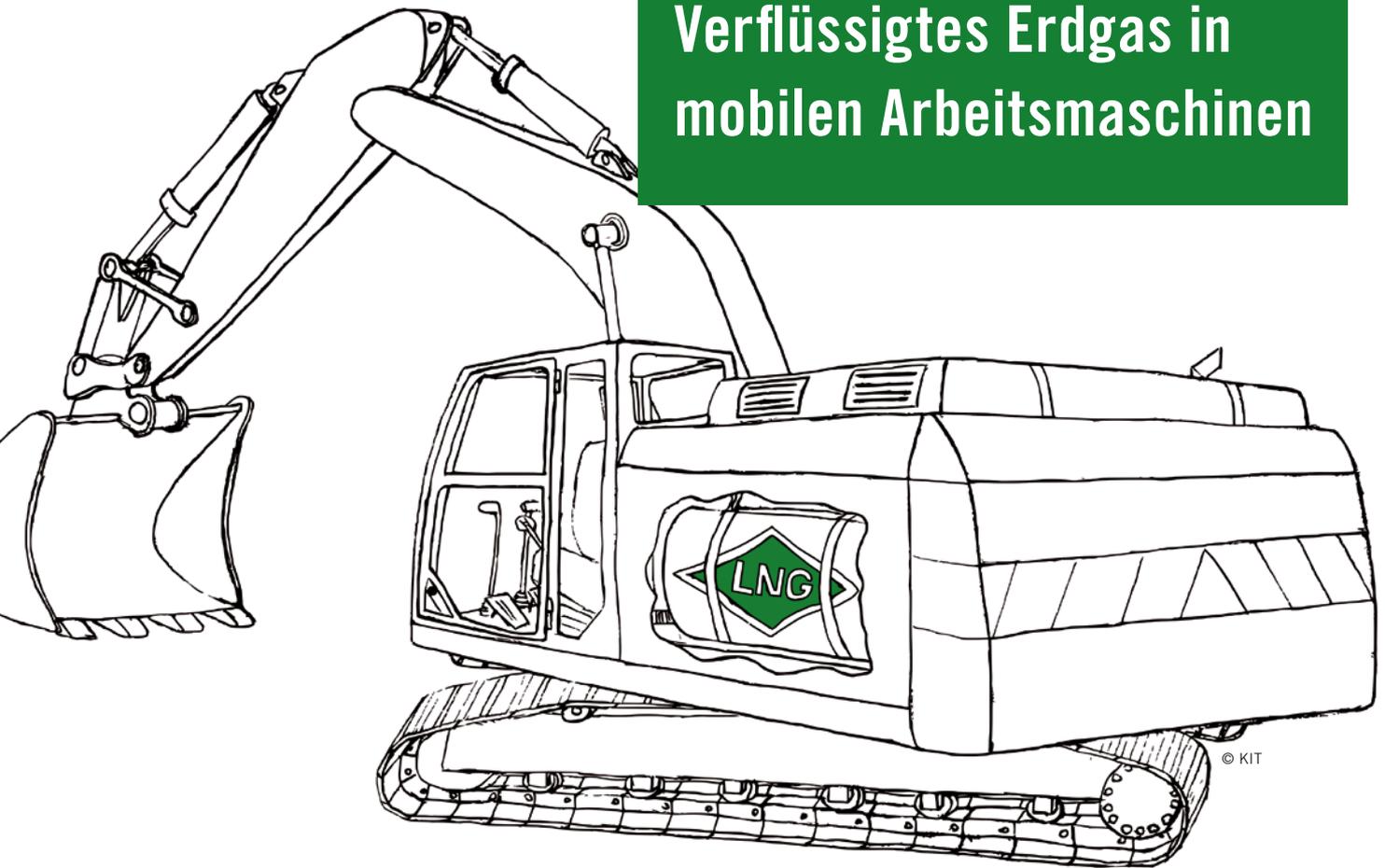


Verflüssigtes Erdgas in mobilen Arbeitsmaschinen



Verflüssigtes Erdgas bietet im Fern-Lkw zahlreiche Vorteile. Am KIT wurde nun untersucht, ob dieser alternative Kraftstoff auch bei mobilen Maschinen von Nutzen ist. Neben den Eigenheiten des Kraftstoffs wurden auch die Herstellung sowie die möglichen Tanks und Brennverfahren analysiert. Darauf aufbauend werden im Folgenden für alle Arten von Maschinen konkrete Potenziale bezüglich Verbrauch, Auslegungen und Emissionen aufgezeigt und bewertet.

AUTOREN



Linus Weberbeck, M. Sc.
war Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



Dipl.-Ing. Danilo Engelmann
ist Akademischer Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



Dipl.-Ing. Isabelle Ays
ist Akademische Mitarbeiterin am Institut für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in Karlsruhe.



Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
ist Institutsleiter des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik (FAST), Lehrstuhl für Mobile Arbeitsmaschinen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Karlsruhe.

MOTIVATION

Im Herbst 2015 haben 188 Länder der ganzen Welt Klimapläne bei den Vereinten Nationen eingereicht. Diese beinhalten Ziele, um die Treibhausgasemissionen, auch CO₂e genannt, zu reduzieren und damit der Klimaerwärmung vorzubeugen [1]. Die Europäische Union gab als Ziel vor, 40 % der Treibhausgasemissionen von 1990 bis 2030 zu senken [1]. Des Weiteren verfolgt die Europäische Union das Ziel, von 2005 bis 2030 die Emissionen um weitere 30 % zu reduzieren [2].

Der endliche Vorrat an fossilen Brennstoffen, welcher den Energiebedarf der Welt auf Dauer nicht decken wird sowie die steigenden Ziele der Europäischen Union zur Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen führen zu einer stärkeren Fokussierung der EU-Politik auf weitere, heute nicht reglementierte Bereiche wie mobile Arbeitsmaschinen. Nicht nur Effizienzsteigerungen in Antriebssystemen oder Hybridisierungen, sondern auch alternative nachhaltige Energiekonzepte können den Kraftstoffbedarf und somit die emittierten Treibhausgase reduzieren.

Im Folgenden werden zunächst die freigesetzten CO₂e-Emissionen von flüssigem Erdgas im Vergleich zu Diesel als Kraftstoff untersucht. Es folgt die Vorstellung möglicher Antriebskonzepte mit flüssigem Erdgas. Zum Schluss werden diese Konzepte auf die Randbedingungen von unterschiedlichen mobilen Arbeitsmaschinen angepasst.

ALTERNATIVE ENERGIETRÄGER

Bei der Wahl von alternativen Energieträgern anstelle von Diesel ist für mobile Arbeitsmaschinen nicht nur der Heizwert, sondern auch die gravimetrische und volumetrische Energiedichte des Energieträgers zu betrachten. Dabei erwies sich für mobile Arbeitsmaschinen flüssiges Erdgas als vielversprechend [3]. Weitere Untersuchungen in der Literatur haben gezeigt, dass bei der direkten Verbrennung von 1 MJ Erdgas 56 g CO₂e freigesetzt werden. Im Vergleich dazu sind dies bei 1 MJ Diesel 74 g CO₂e. Dies entspricht einer Reduzierung von circa 24 % der emittierten Treibhausgase unter der Annahme eines gleichen Wirkungsgrads bei der Verbrennung [4]. Sollte der Kohlenstoffanteil des Erdgases aus Quellen, die sich entweder kurzfristig von selbst erneuern oder deren Nutzung nicht zur Erschöpfung der Quelle beiträgt [5], stammen, so wird dieses Erdgas als regenerativer Kraftstoff beziehungsweise Biogas (nicht fossiles Erdgas) bezeichnet. Der Kohlenstoffanteil wurde vom Träger aus der Luft entnommen und wird bei der Verbrennung wieder in die Luft freigesetzt. Aus diesem Grund werden die bei der Verbrennung lokal emittierten Emissionen (Tank-to-Wheel-Emissionen) von regenerativen Kraftstoffen nicht in die Klimabilanzierung einbezogen.

„Ein eventueller Methanschluß kann bei regenerativen Kraftstoffen mit dem Treibhauspotenzial (Greenhouse Warming Potential – GWP) für nichtfossiles Methan berücksichtigt werden. Der HC-

Grenzwert nach Euro Stage IV für mobile Arbeitsmaschinen mit 56 kW bis 560 kW Antriebsleistung beträgt 0,19 g/kWh [6]. Umgerechnet auf MJ ergibt sich ein Grenzwert von 0,053 g/MJ. Wird angenommen, dass die CO₂e-Kohlenwasserstoffemissionen im Abgas vollständig aus Methan bestehen, so ergibt sich mit dem GWP für nichtfossiles Methan eine maximal zulässige CO₂e-Emission von etwa 1,5 g/MJ. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Wert auf die abgegebene Leistung der Maschine bezogen ist und folglich die maximal zulässige Emission auf den verbrauchten Kraftstoff umgerechnet“. [7] Mit angenommenen Wirkungsgraden von 39 % für das Ottoverfahren und 44 % für das Diesel-Gas-Verfahren und das Gas-Diesel-Verfahren (siehe Abschnitt Stand der Technik) ergeben sich somit Maximalwerte für die Emission von etwa 0,6 g CO₂e/MJ beziehungsweise 0,7 g CO₂e/MJ [7].

NACHHALTIGKEIT BEI DER HERSTELLUNG

Eine vollständige Betrachtung der Nachhaltigkeit des Energieträgers (Well-to-Wheel) findet dann statt, wenn auch die Herstellung des flüssigen Erdgases (Well-to-Tank) berücksichtigt wird. Die konventionelle und preiswertere Gewinnung von Erdgas erfolgt an reinen Erdgaslagerstätten [8]. Der gesamte Energieaufwand für die Bereitstellung an einer Tankstelle von flüssigem Erdgas (Well-to-Tank) wird im Mittel mit 0,23 MJ pro MJ Kraftstoff angegeben, dies entspricht circa 19 g CO₂e pro MJ Kraftstoff. Die größten

Flüssiges Erdgas (-167 bis -157 °C, 1 bar)			
Struktur von Methan	CH ₄		
Dichte	0,43 bis 0,47 kg/l		
Heizwert	39 bis 50 MJ/kg		
	Well-to-Tank [g CO ₂ e/MJ]	Tank-to-Wheel [g CO ₂ e/MJ]	Well-to-Wheel [g CO ₂ e/MJ]
LNG fossil	19,0	56,0	75,0
LNG aus Windkraft – SNG	12,3	0,7 (Verfahren mit Dieselanteil)	13,0
		0,6 (Ottoverfahren)	12,9
LBG – flüssiges Biomethan	31,3	0,7 (Verfahren mit Dieselanteil)	32,0
		0,6 (Ottoverfahren)	31,9
Diesel	15,3	74,0	89,3

TABELLE 1 Well-to-Wheel-Emissionen verschiedener LNG-Kraftstoffe (© KIT)

CO₂e-Anteile am Energieverbrauch werden durch die Verflüssigung und den Seetransport verursacht [9]. Die Herstellung von verflüssigtem Erdgas ist demzufolge auf den ersten Blick gegenüber Diesel mit 15,3 g CO₂e [10] nicht interessant. Wird jedoch verflüssigtes Erdgas nachhaltig hergestellt, so kann die Well-to-Tank-Bilanz umweltfreundlicher als die der Dieselherstellung sein. Biomethan wird durch die Aufbereitung des durch anaerobe Vergärung von organischen Abfällen oder aus nachwachsenden Rohstoffen mithilfe von Bakterienkulturen entstandenen Gases hergestellt [11]. Für die Bereitstellung von 1 MJ flüssigem Biomethan werden 31,3 g CO₂e-Emissionen freigesetzt [7]. Wird Erdgas mit Windkraftstrom synthetisch gewonnen (SNG), zum Beispiel durch das Power-to-Gas-Verfahren (PtG) oder durch thermochemische Vergasung biogener Festbrennstoffe, so entsprechen die dabei entstehenden Treibhausgasemissionen für 1 MJ Erdgas 12,3 g CO₂e (PtG) [7].

Bei der Ölförderung befindet sich das Erdgas oberhalb des Erdöls. Dieses wird

beim Ölbohren freigesetzt. Dieses Erdgas wird in der Regel (außer in Norwegen) in die Luft abgefackelt, da die Einspeisung dieses Erdgases ins Pipelinennetz für die Ölkonzerne wirtschaftlich unrentabel ist. Das Abfackeln dieses Erdgases führt zu umweltschädlichen Konsequenzen, welche sich negativ auf die Landwirtschaft und das Trinkwasser auswirken. Nicht abgefackeltes Erdgas erhöht den Treibhauseffekt und führt zu noch negativeren Auswirkungen. [8] Würde das so verlorene Erdgas als Kraftstoff genutzt, könnte die Nutzung fossilen Erdgases als nachhaltiger bezeichnet werden.

Die Well-to-Tank (WtT), Tank-to-Wheel (TtW) und gesamten Emissionswerte, Well-to-Wheel (WTW) der verschiedenen flüssigen Methan-Kraftstoffe sind in **TABELLE 1** zusammengefasst. **TABELLE 1** zeigt, dass auch wenn die Well-to-Tank-Emissionswerte für flüssiges Erdgas (LNG) höher als die des Diesels sind, die Well-to-Wheel-Bilanzen (WtT) immer noch insgesamt emissionsärmer als die des Diesels sind.

STAND DER TECHNIK

LNG (Liquefied Natural Gas) wird bei etwa -160 °C gelagert, was sein (spezielles) Volumen gegenüber dem gasförmigen Normalzustand (Temperatur = 273,15 °K = 0 °C; Druck = 1013,25 mbar) um etwa den Faktor 600 reduziert [12]. Die große Temperaturdifferenz des Inneren von LNG-Tanks zur Umgebung führt zu einem unvermeidbaren Einstrom von Wärme in den Tank. Folglich verdampft in den Tanks kontinuierlich LNG. Dies erhöht den Innendruck der Tanks, sofern das verdampfende Gas nicht entweichen kann. Das verdampfende LNG wird Boil-off-Gas genannt [12].

LNG-Tanks werden so gebaut, dass Verluste durch den Boil-off-Effekt minimiert werden. Dazu werden sie mit einer Vakuumvielschichtisolation versehen [13], die den Wärmeeinstrom minimiert, und als geschlossene Systeme ausgeführt, die bis zu einem zulässigen Maximaldruck kein Boil-off-Gas entweichen lassen. Beide genannten Maßnahmen führen dazu, dass LNG-Tanks pro Energieinhalt etwa das 1,6- bis 2,9-fache Gewicht und mindestens das doppelte Bauvolumen von Dieseltanksystemen aufweisen [7].

Für die motorische Verbrennung von Erdgas stehen derzeit drei Verfahren zur Verfügung:

- Otto-Verfahren
- Diesel-Gasverfahren
- Gas-Dieserverfahren.

Das Otto-Verfahren ist zurzeit die einzige Möglichkeit, Erdgas ohne zusätzliche Kraftstoffe in Hubkolbenmotoren zu verbrennen [7]. Das (Gas-)Ottoverfahren weist eine Leistungsdichte von etwa 80 % derer des Dieselmotors auf [14]. Der Wirkungsgrad von Gas-Ottomotoren für Nutzfahrzeuge wird im Mittel mit etwa 80 % von dem des Dieselmotors angegeben [15, 16]. Zur Einhaltung aktueller Abgasnormen ist beim Gas-Ottoverfahren ein Drei-Wege-Katalysator ausreichend [17]. Gas-Ottomotoren arbeiten bis zu 3 dB(A) leiser als Dieselmotoren [16].

Ein Dieselprozess mit ausschließlich Erdgas als Treibstoff ist nach dem Stand der Technik nicht möglich [18]. Diesel-Gas- und Gas-Dieserverfahren erfordern, neben Erdgas, Dieseldieselkraftstoff zum Betrieb. Insbesondere im Nutzfahrzeugbereich wird das Diesel-Gasverfahren auch als Dual-Fuel- und das Gas-Dieserverfahren auch als HPDI-Verfahren (high pressure direct injection) bezeichnet [14, 18].

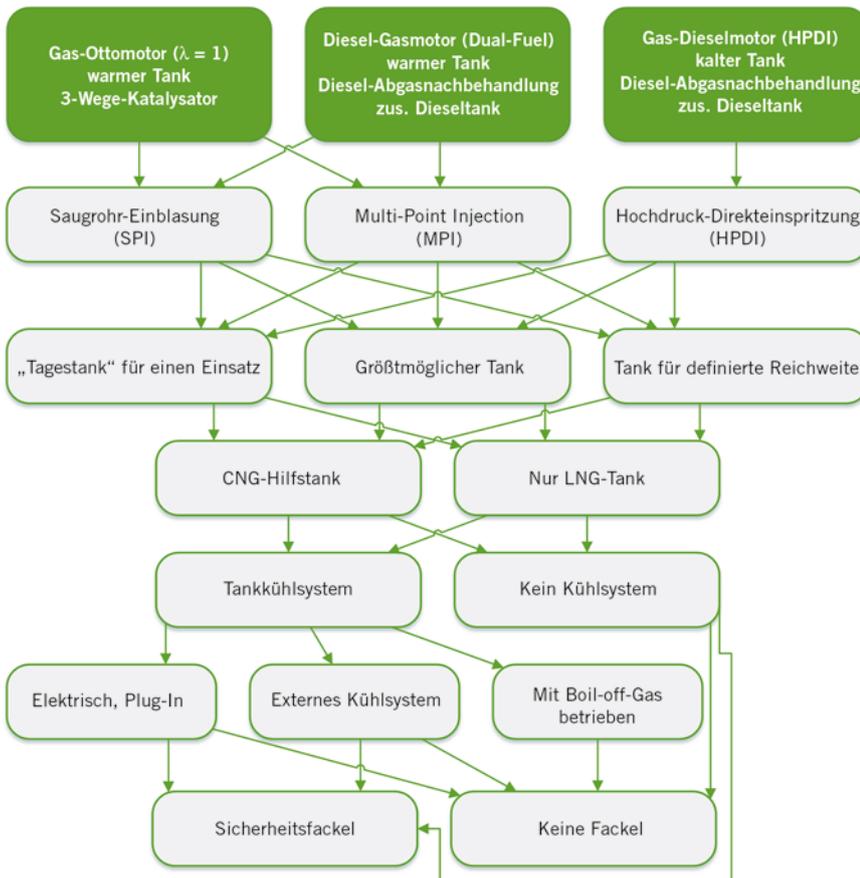


BILD 1 Morphologischer Kasten der möglichen Konzepte (© KIT)

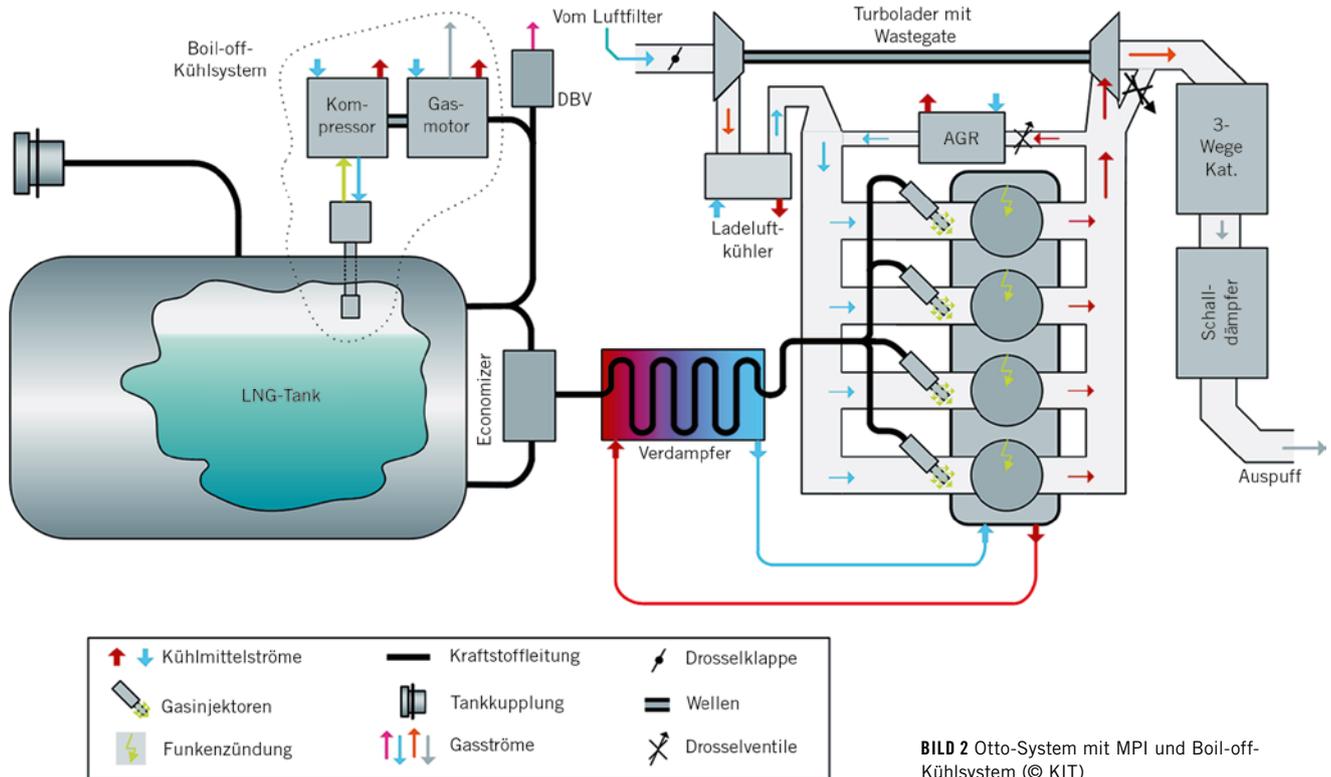


BILD 2 Otto-System mit MPI und Boil-off-Kühlsystem (© KIT)

Beim Diesel-Gasverfahren beträgt der energetische Gasanteil etwa 60 bis 80 %, beim Gas-Dieselmotor bis über 90 % [18]. Wirkungsgrad und Leistungsdichte sind beim Gas-Dieselmotor identisch zum Dieselmotor [16]. Beim Diesel-Gasverfahren widersprechen sich die Angaben in der Literatur [14, 16], es liegt aber nahe, dass Leistungsdichte und Wirkungsgrad etwas geringer sind als beim Dieselmotor. Beide Verfahren mit Dieselanteil erfordern zur Einhaltung aktueller Abgasnormen die gleichen Abgasnachbehandlungssysteme wie sie bei aktuellen Dieselmotoren zum Einsatz kommen [18]. Beim Diesel-Gasverfahren ist ein reiner Dieselbetrieb ohne Umbauten möglich [14].

BEHANDLUNG VON BOIL-OFF-GAS

Boil-off-Gas, das nach Erreichen der Haltezeit, das heißt beim maximal zulässigen Tankdruck, über das Überdruckventil in die Umgebung ausströmt, geht einerseits dem Kraftstoffvorrat verloren und schadet andererseits der Umwelt. Die einfachste Möglichkeit, das Boil-off-Gas zu behandeln ist, es in einer explosionsgeschützten Fackel abzubrennen. Unter Berücksichtigung der Äquivalenzfaktoren kann dadurch die CO₂e-Treibhausgasemission durch Boil-off-Gas theoretisch um 90 bis 93 % reduziert werden [7]. Die mögliche Stand-by-Zeit einer

LNG-betriebenen Maschine verlängert sich durch den Einsatz einer Fackel nicht. Anstatt das Boil-off-Gas abzufackeln, ist es auch möglich, den Tank zu kühlen und somit die Verdampfungsrates zu verringern. Solche Systeme könnten elektrisch betrieben werden, sofern am Abstellort der Maschine ein Stromanschluss zur Verfügung steht. Alternativ ist auch der Antrieb des Kühlsystems durch einen vom Boil-off-Gas angetriebenen Gasmotor möglich. Ein durch Boil-off-Gas angetriebenes Tankkühlsystem kann die Treibhausgasemissionsrate (bei einem angenommenen Motorwirkungsgrad von 30 %) um bis etwa 99 % reduzieren und auch die mögliche Stand-by-Zeit der Maschine um Faktoren von etwa 3,6 bis 11,5 (je nach System) verlängern [7].

Aus dem beschriebenen Stand der Technik und den Varianten zur Behandlung des auftretenden Boil-off-Gases ergeben sich einige Variablen, aus denen Konzepte für Maschinenantriebe kombiniert werden können. Diese sind in **BILD 1** dargestellt. Mit der Auswahl einer Motortechnologie werden üblicherweise auch die Tanktechnologie (mit beziehungsweise ohne Kraftstoffpumpe) und das erforderliche Abgasnachbehandlungssystem festgelegt. Neben dem Verbrennungsverfahren ist ein Einblasverfahren für den gasförmigen Kraftstoff festzulegen. Der zur Verfügung stehende Bauraum und das Maschinengewicht müssen gegen die Tankkapazität

abgewogen werden. Dabei ist die Betriebsweise der Maschine zu berücksichtigen. Neben der Kapazität des beziehungsweise der Tanks ist auch festzulegen, ob ein Kühlsystem vorgesehen ist und wie dessen Antrieb erfolgt. Zuletzt ist zu entscheiden, ob die Maschine (gegebenfalls zusätzlich zu einem Kühlsystem) mit einer Sicherheitsfackel versehen wird.

KOMMUNALMASCHINEN MIT OTTOMOTOR

Ähnlich wie bei CNG-Antrieben können LNG-Maschinen mit einem Ottomotor angetrieben werden. Diese Antriebsart könnte zum Beispiel für Abfallsammelfahrzeuge genutzt werden, die aufgrund ihres auch in Wohngebieten stattfindenden Einsatzes vom leiseren Betrieb des Ottoverfahrens profitieren würden. Basierend auf der Annahme, dass Abfallsammelfahrzeuge in der Regel mindestens fünf Tage pro Woche in Betrieb sind, könnte in diesem Fall auf ein Tankkühlsystem verzichtet werden [7]. Für längere Stillstandszeiten könnte eine Sicherheitsfackel auf dem Dach der Maschine installiert werden. Diese wäre aufgrund ihres Montageortes vor unbeabsichtigter Berührung geschützt, und aufgrund der üblichen Abstellorte würde auch keine Brandgefahr von ihr ausgehen. Schematisch ist ein solches Antriebskonzept in **BILD 2** dargestellt.

KRAFTSTOFFE

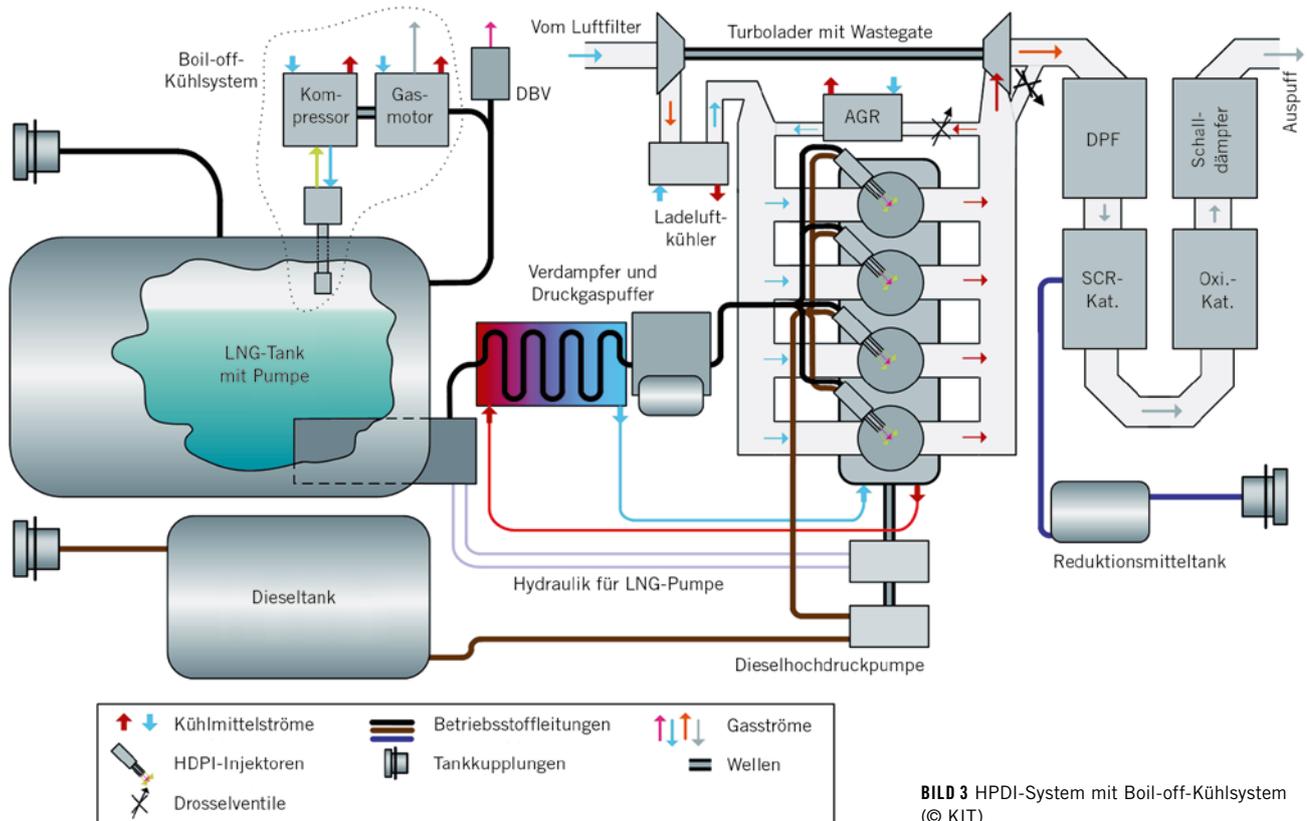


BILD 3 HPDI-System mit Boil-off-Kühlsystem (© KIT)

STRASSENBAU- UND KLEINERE ERDBEWEGUNGSMASCHINEN

Betrachtet werden Straßenbaumaschinen wie zum Beispiel Deckenfertiger und Erdbewegungsmaschinen bis circa 20 t Einsatzgewicht. Für diese Maschinen-gruppe wird angenommen, dass ihr Einsatz mindestens eine Arbeitsschicht am Stück erfolgen können muss, aber auch wochenlange Stillstände auftreten können. Dabei werden bestmögliches Abgasverhalten und auch der bestmögliche Wirkungsgrad gefordert. Es wird ein HPDI-Antrieb mit Tankkühlsystem vorgesehen. Das Tankkühlsystem wird mit Boil-off-Gas oder optional für Maschinen, die auf Betriebshöfen abgestellt werden, elektrisch betrieben. Bei Maschinen mit elektrischem Kühlsystem sollte für Stillstandszeiten ohne Stromversorgung eine Sicherheitsfackel vorgesehen werden. Ein möglicher Gewichtszuwachs wäre bei den meisten betrachteten Maschinen aufgrund ihrer langsamen beziehungsweise kontinuierlichen Bewegungen als akzeptabel anzunehmen. Ob und wie weit das zusätzliche Gewicht des Tanksystems bei häufig beschleunigenden Lademachines durch leichtere Ballastgewichte ausgeglichen werden kann, wäre im Detail zu prüfen. Mögliche Antriebskonzepte für

die betrachteten Maschinen sind schematisch in **BILD 3** und **BILD 4** dargestellt.

MININGBAGGER UND ANDERE GEWINNUNGSMASCHINEN

Miningbagger und andere Großmaschinen der Gewinnungsindustrie sind mit großen Antriebsleistungen ausgestattet und weisen lange Betriebszeiten auf. Folglich erscheint für diese Maschinen ein HPDI-Antrieb aufgrund seines Wirkungsgrads und der damit möglichen Dieselsubstitutionsraten sinnvoll. Für die betrachteten Maschinen ist eine möglichst große Tankkapazität erforderlich, da die Maschinen mit großer Leistung mindestens eine Arbeitsschicht ununterbrochen betrieben werden können müssen und zur Betankung solcher großer Maschinen die Anfahrt eines Betankungsfahrzeuges notwendig ist. Bei Baggern wäre auch bei den größeren Maschinen ein möglicher Gewichtszuwachs unkritisch. Bei Radladern oder Transportfahrzeugen müssten Kompromisse zwischen Tankkapazität und Gewicht gefunden werden. Es wird davon ausgegangen, dass solche großen und investitionsintensiven Maschinen mit höchstmöglicher Auslastung betrieben werden und nahezu keine Still-

standszeiten aufweisen. Folglich wäre für solche Maschinen kein Tankkühlsystem nötig. Für eventuell vorkommende längere Stillstände sollte eine Sicherheitsfackel vorgesehen werden. **BILD 5** zeigt schematisch den Aufbau eines HPDI-Antriebssystems, wie es für Miningmaschinen in Frage käme.

LAND- UND FORSTWIRTSCHAFTLICHE GROSSMASCHINEN

Ähnlich wie bei den zuvor betrachteten Miningmaschinen werden Großmaschinen der Landwirtschaft mit großen Antriebsleistungen und hohen Auslastungen betrieben. An dieser Stelle werden hochspezialisierte Maschinen wie Feldhäcksler, Mähdrescher, Rübenernter oder ähnliches diskutiert. Wegen der zu erwartenden hohen Energieumsätze wird ein HPDI-Antriebssystem vorgesehen. Die betrachteten Maschinen werden während der Erntesaison lange Zeit ohne Tankunterbrechung betrieben. Diese Annahme beruht darauf, dass die optimalen Erntezeiträume zeitlich begrenzt sind. Folglich sind die Tankkapazitäten der Maschinen größtmöglich, mindestens aber auf einen Vollastbetriebstag auszulegen. Zusätzliche Energieaufwände durch eventuell zusätzliche benötigte Übernahmefahr-

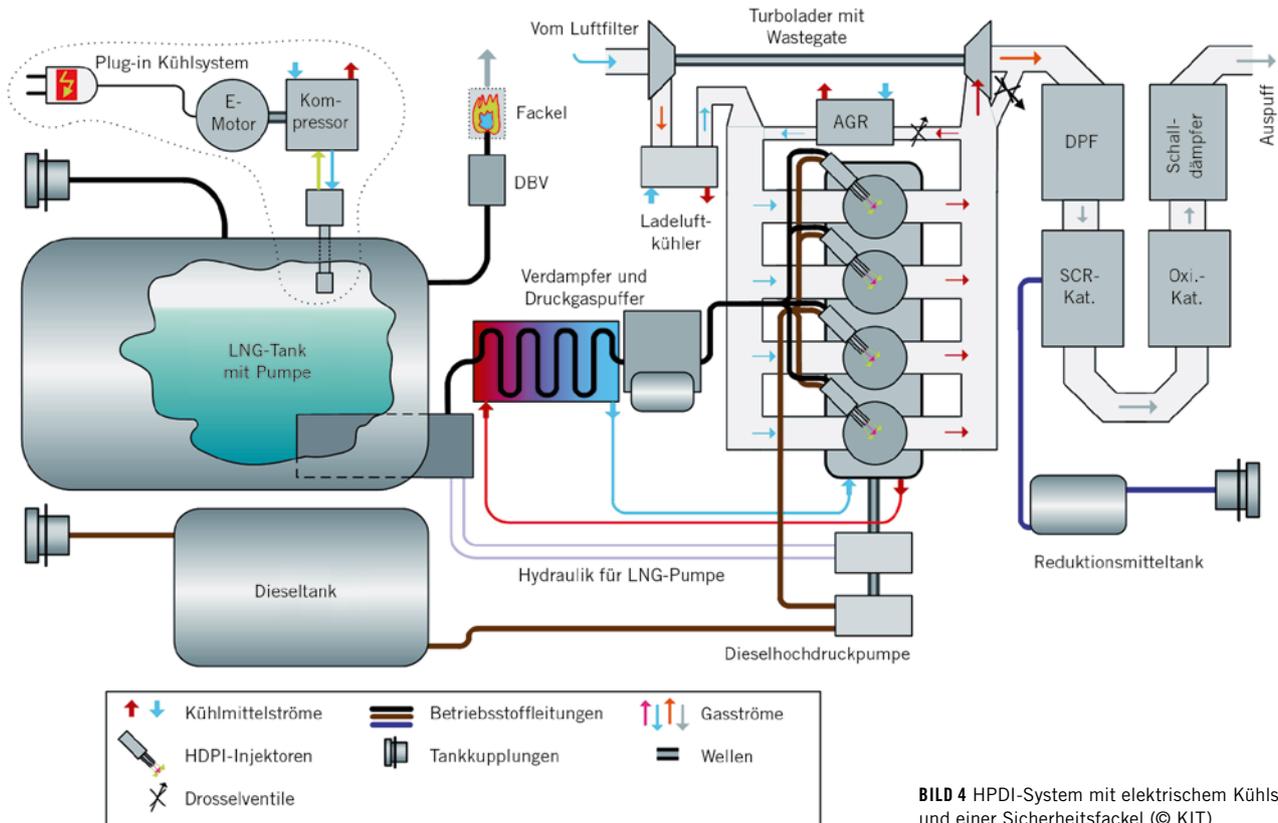
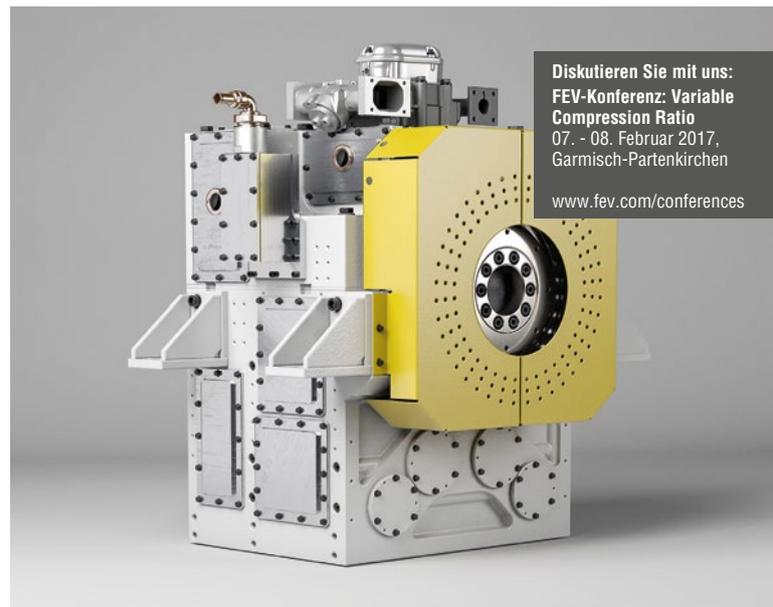


BILD 4 HPDI-System mit elektrischem Kühlsystem und einer Sicherheitsfackel (© KIT)

zeuge wären getrennt zu analysieren. Bei kleineren Kapazitäten des LNG-Tanks wären auch ackergängige LNG-Tankanhänger eine denkbare Lösung, sofern eine Kontamination des Ernteguts durch den Tankvorgang ausgeschlossen wird. Dies würde aber zusätzlichen Aufwand und eventuell zusätzliche Bodenverdichtung auf dem Feld bedeuten. Für die betrachteten Maschinen werden elektrische Tankkühlsysteme vorgesehen. Es wird angenommen, dass solche Maschinen außerhalb der Saison lange abgestellt werden. Falls direkt am Abstellort eine LNG-Tankstelle zur Verfügung steht, wäre ein Rückspeisen des LNG der Maschinen am Saisonende denkbar.

Ähnlich wie bei den vorher betrachteten landwirtschaftlichen Maschinen werden auch Maschinen mit großen Antriebsleistungen wie Forstmaschinen diskutiert. Folglich wird auch hier ein HPDI-Antrieb vorgesehen. Die Tankkapazität ist so groß wie möglich ausulegen. Dazu ist ein Kompromiss zwischen zulässigem Bodendruck und möglicher Einsatzdauer zu finden. Zusätzlich ist dabei zu beachten, dass ein Herausfahren der Maschinen aus dem Wald zur Betankung eine Unterbrechung des produktiven Betriebs erfordert. Es wird angenommen, dass Forstmaschinen ebenfalls län-



Diskutieren Sie mit uns:
FEV-Konferenz: Variable Compression Ratio
 07. - 08. Februar 2017,
 Garmisch-Partenkirchen
www.fev.com/conferences

EINER FÜR ALLE(S)

EINZYLINDERMOTOREN ALS ENTWICKLUNGSWERKZEUG

Effektiv, robust und flexibel: Um schnelle und kostengünstige Optimierungen an Motor- und Verbrennungsprozess zu gewährleisten, hat FEV die neue Einzylindermotorenfamilie entwickelt. Dank sechs Baugrößen mit Zylinderbohrungen von 65 bis 530 Millimetern deckt diese ein breites Band von Pkw- bis

Großmotoren ab. Profitieren Sie jetzt von unserer Expertise. Unsere Einzylinder-Experten beraten Sie gerne.



www.fev.com

Die Vorteile auf einen Blick:

- > Reduzierte Entwicklungskosten
- > Kürzere Entwicklungszyklen
- > Flexible Prüfstandsvarianten
- > Verlässliche und reproduzierte Ergebnisse
- > Umfangreicher FEV-Service
- > Bewährte Technologien mit mehr als 12.000 Betriebsstunden



KRAFTSTOFFE

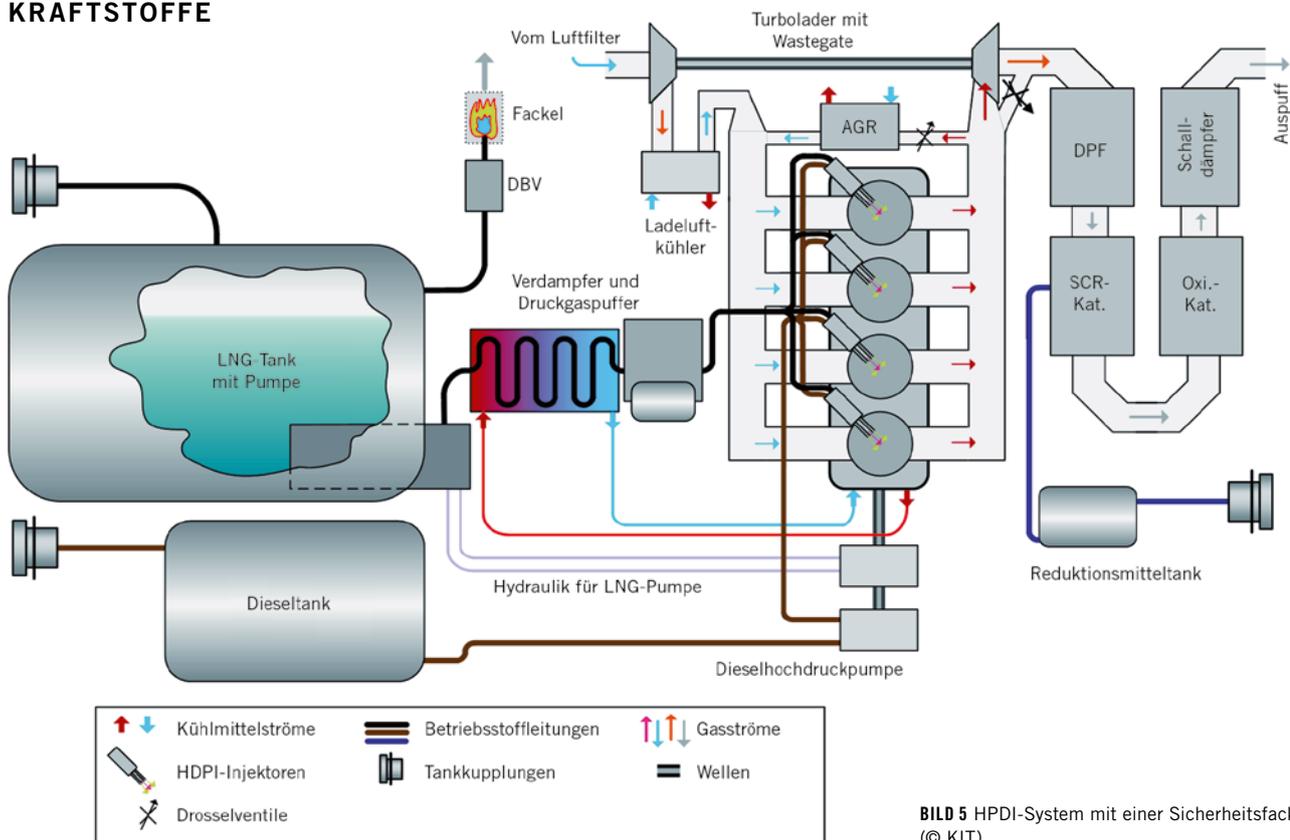


BILD 5 HPDI-System mit einer Sicherheitsfackel (© KIT)

gere Zeiträume stillstehen können. Bei Stillständen im Wald steht keine Stromversorgung zur Verfügung. Für diese Maschinen ist ein Tankkühlsystem vorgesehen, dass mit Boil-off-Gas betrieben wird. Vom Einsatz einer Fackel wird aufgrund der Brandgefahr abgesehen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die steigenden Ziele der Europäischen Union zur Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen führen zu Überlegungen, durch alternative nachhaltige Energiekonzepte diese Aufgabe zu lösen. Nachhaltig erzeugtes LNG bietet eine Möglichkeit CO₂e-Emissionen gesamt zu reduzieren. Es konnte in dieser Studie aus technischer Sicht für jeden der gängigen Maschinentypen ein LNG-Konzept aufgezeigt werden. Die Diskussion der passenden Antriebskonzepte zu den Maschinentypen zeigt, dass die Maschinen nicht isoliert betrachtet werden dürfen. Weitere Faktoren stellen die Einsatzumgebung, die verfügbare Infrastruktur und das Nutzungsprofil der Maschine dar. Diese Einflussfaktoren sind gerade für land- und forstwirtschaftliche Maschinen entscheidend und sollten weiter für LNG beleuchtet werden. Für Maschinen mit guter Infrastruktur und einfachen Betankungsmöglichkeiten, wie Kommunal- und

Baumaschinen, ist der Einsatz von LNG schon heute eine echte Alternative.

LITERATURHINWEISE

- [1] N. N.: 2016 Climate Home: Paris tracker: Who pledged what for 2015 UN climate pact. Online: www.climatechangenews.com/2015/03/10/paris-tracker-who-has-pledged-what-for-2015-un-climate-pact, Zugriff: 29.03.2016
- [2] N. N.: CECE – Committee for European Construction Equipment: Constructing the Europe of tomorrow. CECE – Committee for European Construction Equipment, Brüssel, 2016
- [3] Geimer, M.; Ays, I.: Nachhaltige Energiekonzepte für mobile Arbeitsmaschinen – in welche Richtung gehen sie? In: Mobile Maschinen (2014), Band 6, S. 18-25
- [4] Hensler, G.; Hochhuber, J.; Lickh, V.: Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LFU), 2009
- [5] N. N.: Erneuerbare Energie Österreich: Erneuerbare Energie. Online: www.erneuerbare-energie.at/energie1/, Zugriff: 30.03.2016
- [6] N. N.: Delphi Automotive LLP: Worldwide Emissions Standards – Heavy Duty and Off-Highway Vehicles 2015/2016. Online: delphi.com/emissions-hd, Zugriff: 05.10.2015
- [7] Weberbeck, L.: Analyse und Vorauslegung einer mit verflüssigtem Erdgas angetriebenen mobilen Arbeitsmaschine. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Masterarbeit, 2016
- [8] Donner, S.: Erdgas: In den Wind geblasen. Online: www.spiegel.de/wissenschaft/technik/bei-der-oelfoerderung-wird-oft-erdgas-verbrannt-a-854125.html, Zugriff: 30.03.2016
- [9] Edwards, R. et al.: Well-to-Tank: Version 4a – Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context. European Commission – Joint Research Centre – Institute for Energy and Transport, Ispra (Italy), 2014

- [10] Wurster, R. et al.: LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, 2014
- [11] Zimmermann, N.; Hoch, J.; Schultz, R.: Biomethan aus der Vergärung: organische Abfälle, nachwachsende Rohstoffe. In: Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb – Wege zur klimaneutralen Mobilität. Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2015, S. 101-127
- [12] N. N.: DIN EN 1160. Allgemeine Eigenschaften von Flüssigerdgas. 1996
- [13] N. N.: LNG vehicle fuel tank system operations manual. Online: http://files.chartindustries.com/LNG-Operations_Manual_New.pdf, Zugriff: 23.09.2015
- [14] Mooser, D.: Brenngase und Gasmotoren. In: Handbuch Dieselmotoren. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch), 3. Auflage, 2007
- [15] Dold, R.; et al.: LNG – Future Fuel for Trucks? Potentials and Challenges for a new fuel for heavy duty transport. 13. International Conference Commercial Vehicles, Eindhoven, Netherlands, 2015
- [16] Weinzierl, J.; Gruber, C.; Kohrs, C.: LNG – the „cool“ alternative in the fuel portfolio of CVs. Advantages and disadvantages of liquefied natural gas in heavy commercial vehicles. 13. International Conference Commercial Vehicles, Eindhoven, Netherlands, 2015
- [17] Prehn, S. et al.: Entwicklung und Untersuchung eines Gasmotors für Landmaschinen. Online: www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29980-01.pdf, Zugriff: 15.06.2015
- [18] Figer, G.: Motorkonzepte für LKW. In: Erdgas und Erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb: Wege zur klimaneutralen Mobilität. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.emag.springerprofessional.de/at-z-offhighway-worldwide

International, Digital, Interactive: The new eMagazine from ATZelektronik

ATZelektronik worldwide reports on the very latest trends and developments in automotive electronics



Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelektronik-worldwide.com

ATZelektronik eMagazine has 80 pages packed with information:

- ▶ company news and the latest products
- ▶ specialist articles from industry and research
- ▶ guest comment
- ▶ interview on the cover story



Keyword search: The search function enables you search for a keyword in the complete issue in a matter of seconds



Didactically prepared: Animations and editorial videos offer genuine added value and complement the specialist articles from the automotive industry



Responsive HTML5 implementation: This ensures that you have access to your eMagazine not only from desktops and laptops but also from smartphones and tablets



PDF downloads: The classic function for saving and downloading articles



Interactive contents: Jump immediately to your selected article with one click



User-friendly and direct without an app: HTML5 technology provides a direct link to the website, ensuring access without an app store