

AUS DER FORSCHUNG

# MASCHINENKONZEPTE FÜR MOBILE ARBEITSMASCHINEN MIT METHANANTRIEB



In diesem Artikel werden methangetriebene Maschinenkonzepte vorgestellt und auf ihre Eignung für mobile Arbeitsmaschinen untersucht. Die verschiedenen Maschinenkonzepte für die unterschiedlichen Maschinenkategorien werden diskutiert, um zu klären, ob in den verschiedenen Einsatzbereichen von mobilen Arbeitsmaschinen die geforderten Randbedingungen auch von einer Maschine mit Methantrieb erfüllt werden können. Eventuelle Zielkonflikte werden für einzelne Beispiele aufgezeigt.

## MOTIVATION

Motiviert durch den Anstieg der Treibhausgaskonzentration [1] und der Beschleunigung der Klimaerwärmung verfolgen 195 Länder das Ziel den mittleren Temperaturanstieg der Erde auf 1,5 °C im Vergleich zu 1990 zu begrenzen [2]. In [3] wurden unterschiedliche Energieträger für einen CO<sub>2</sub>-neutralen Betrieb mobiler Arbeitsmaschinen untersucht, dabei wurde flüssiges Methan als vielversprechendste Diesel-Alternative identifiziert. Mit dem Einsatz von Methan aus Erdgas, Biogas oder synthetischem Erdgas (SNG) können Treibhausgasemissionen auch bei mobilen Arbeitsmaschinen reduziert werden [4].

Die DIN51624 unterscheidet beim Kraftstoff Methan bzw. Erdgas, das H-Gas mit einem Heizwert von mindesten 46 MJ/kg und L-Gas mit einem Heizwert zwischen 39 und 46 MJ/kg [5].

Im folgenden Artikel wird die Methode in Form eines morphologischen Kastens, welche möglichen Maschinenkonzepte mit flüssigem Methan für mobile Arbeitsmaschinen beschreiben, kurz erläutert. Anschließend werden die Maschinenkonzepte mit dem größten Potential vorgestellt. Zum Schluss werden die ausgewählten Maschinenkonzepte auf ihre Anwendungstauglichkeit hin untersucht und entsprechend bewertet.

**Autoren:** Isabelle Ays, akademische Mitarbeiterin, Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima), Karlsruher Institut für Technologie KIT, Linus Weberbeck, ehemalige studentische Hilfskraft am Mobima, Prof. Danilo Engelmann, Leitung Abgasprüfstelle an der Berner Fachhochschule BFH, Prof. Dr. Marcus Geimer, Leiter des Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen (Mobima), Karlsruher Institut für Technologie KIT

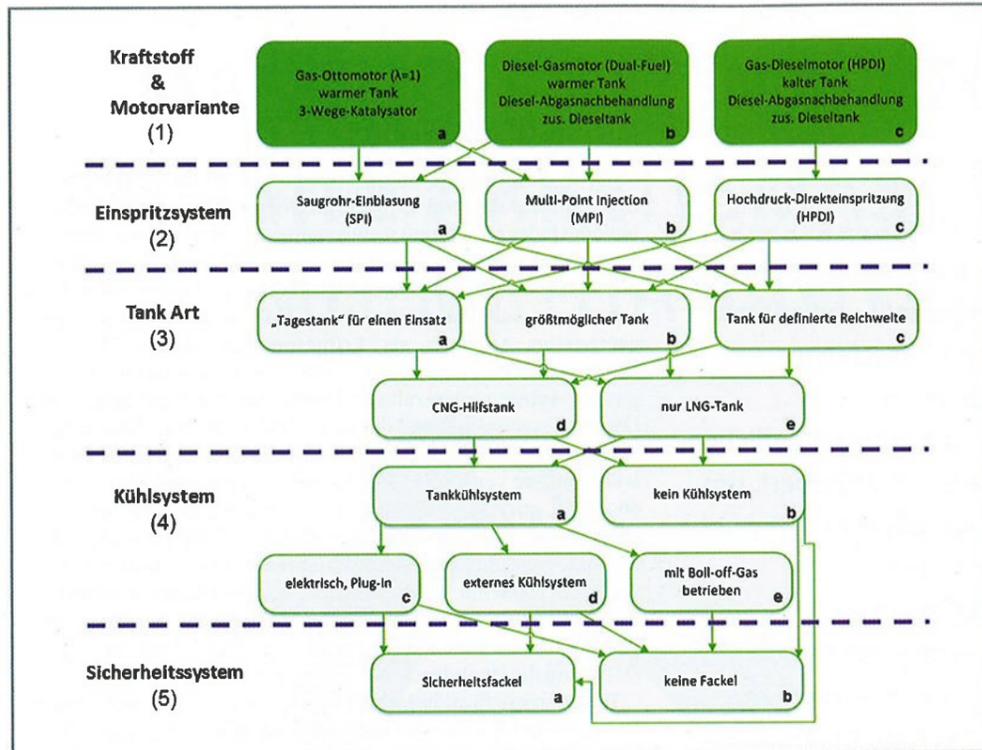
## MASCHINENKONZEPTE

Mobile Arbeitsmaschinen werden in unterschiedlichen Arbeitsprozessen und Anwendungsfeldern betrieben. Daher benötigt jeder Maschinentyp ein angepasstes Maschinenkonzept.

Zur Maschinenkonzeptwahl wurde die Methode des morphologischen Kastens ausgewählt. Hierzu wurde das in Bild 01 entwickelte Schema genutzt. Zunächst erfolgt die Wahl eines geeigneten Antriebs als Primärenergiewandler. Hierfür existieren für den Einsatz von Methan drei einsetzbare Verfahren für Verbrennungskraftmaschinen: das Otto-Verfahren, das Diesel-Gasverfahren und das Gas-Dieselverfahren. Beim Ottoverfahren wird Erdgas ohne zusätzliche Kraftstoffe im Hubkolbenmotor verbrannt. Das Diesel-Gasverfahren (Gasanteil 60–80%), auch als Dual-Fuel Verfahren bekannt, und das Gas-Dieselverfahren (>90% Gasanteil), HPDI-Verfahren genannt, benötigen für die Zündung des Methans einen Dieselanteil im Kraftstoff. Nach der Wahl des Verbrennungsverfahrens wird ein Einspritzsystem ausgewählt. Je nach Motorvariante stehen zur Auswahl: die Zentraleinspritzung (SPI), die Multi-Point-Injection (MPI) und die Hochdruck-Direkteinspritzung (HPDI) [4].

Tanksysteme für flüssiges Methan besitzen eine sogenannte Haltezeit, welche die Zeitdauer vom Abstellen des Motors bei Tankennndruck bis zum ersten Ablassen von Erdgas aus dem Tank beschreibt. Diese Zeitdauer ist vom Tankdruck und Füllstand des Tanks abhängig und variiert zwischen 1 Tag und bis zu 10 Tagen (ohne den Einsatz von einem Kühlsystem) [5].

„Der Faktor für die Gewichtserhöhung des Tanksystems im Vergleich von Diesel- und LNG- Systemen ergibt sich je nach Motorverfahren und verwendetem Gas zu etwa 1,7 für Dual-Fuel-Systeme bis etwa 2,9 für HPDI-Systeme. [...] Aufgrund der geringeren volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte von LNG-Tanks gegenüber Dieseltanks ist die Tankkapazität der Maschine ein wichtiger Punkt. Falls nicht ausreichend zusätzlicher Bauraum zur Verfügung steht oder zusätzliches Gewicht nicht akzeptiert werden kann, muss ein Tanksystem mit kleinerem Energieinhalt als bei der Dieselvariante installiert werden. Bei den meisten Maschinen erscheint in einem solchen Fall die Auslegung der Tankkapazität auf eine Arbeitsschicht bzw. einen Arbeitstag als sinnvoller Kompromiss. Bei Maschinen, die nur gelegentlich oder kurzzeitig zum Einsatz kommen, sind evtl. auch kleinere Tankkapazitäten denkbar. Bei Maschinen, deren Tankkapazität schon im Dieselbetrieb nur auf eine Betriebsdauer von einer oder zwei Arbeitsschichten ausgelegt ist, müssen Kompromisse bezüglich Betriebsdauer und Massen-/Volumenzuwachs gefunden werden. Insbesondere bei Gas-Luft-Gemisch ansaugenden Motorkonzepten ist der Einsatz eines CNG Hilfstanks mit geringer Kapazität denkbar. Technisch wäre dies, insbesondere wegen der Möglichkeit, abgestellte Maschinen mit leerem LNG-Tank zu rangieren, von Interesse. Unabhängig von Motorkonzept und Tankart muss festgelegt werden, ob ein Tankkühlsystem vorgesehen werden soll und wie dieses angetrieben wird. Alternativ zu einem Kühlsystem an Bord der Maschine wären zur Kühlung des Tanks bei längerem Stillständen auch Anschlüsse für ein externes Kühlsystem denkbar. Zuletzt kann, je nach Einsatz der Maschine, eine Sicherheitsfackel vorgesehen werden, die emittiertes Boil-off-Gas in seiner Treibhauswirkung reduziert.“ [5]



01 Morphologischer Kasten für mögliche Methangetriebene Maschinenkonzepte

**KLEINE BZW. HANDGEFÜHRTE ARBEITSMASCHINEN (1B, 2A, 3AE, 4B, 5A ODER 5B)**

Maschinen mit Motorleistungen von weniger als 19 kW haben geringere Emissionsgrenzwerte zu erfüllen als Maschinen mit größeren Motorleistungen [6, S. 44]. Dies ermöglicht den Einsatz eines Diesel-Gasmotor (Dual-Fuel) Antriebes. Um dem kompakten Aufbau gerecht zu werden, müssen so wenige Komponenten wie möglich hinzugefügt werden. Des Weiteren sollte der Komplexitätsgrad niedrig gehalten werden. Aus diesen Gründen wird der Motor mit einer SPI und einem Tank für eine Arbeitsschicht ausgerüstet. Ist dies nicht möglich, so müsste ein kleinerer Tank gewählt und während der Schicht nachgetankt werden. Auf ein Tankkühlsystem und eine Sicherheitsfackel wird verzichtet. Dieses Konzept benötigt für vibrierende Arbeitsmaschinen, wie beispielsweise einen Rüttler, weitere Untersuchungen, da Vibrationen zu Verwirbelungen des Methans führen könnten und somit eine Erwärmung des Kraftstoffs im Tank verursachen könnten. [5]

**ERDBEWEGUNGSMASCHINEN UND STRABENBAUMASCHINEN (1C, 2C, 3BE, 4AE, 5A ODER 5B)**

Die größere Motorleistung sowie die langen Betriebsdauern erfordern den bestmöglichen Wirkungsgrad. Demgemäß wird ein Gas-Dieselmotor-(HPDI)-Motorkonzept ausgewählt. Der Tank wird so groß wie möglich dimensioniert um Unterbrechungen im Betrieb zu vermeiden. Besonders bei kontinuierlichen Arbeiten wie beim Straßenfertiger können Unterbrechungen negative Auswirkungen auf die Qualität der Asphalttschichten haben. Bei Raupenbaggern und Spezialtiefbaumaschinen, die im Betrieb nur wenig und langsam fahren und zudem schwere Gegengewichte tragen, scheint eine eventuelle Gewichtssteigerung durch das Flüssigmethan-Tanksystem unkritisch. Bei Radladern, die im

Betrieb häufig beschleunigen, würde eine Gewichtssteigerung zu einem erhöhten Energiebedarf führen. Eventuell könnte ein Mehrgewicht bei Radladern durch eine optimierte Lage des Tanksystems und leichtere Gegengewichte kompensiert werden. Werden Baumaschinen nicht immer am selben Ort genutzt (wie z. B. in der Gewinnungsindustrie), sondern bei jedem Einsatz auf eine andere Baustelle verlegt, sind einerseits Stillstandzeiten aufgrund nicht optimaler Auslastung und andererseits längere Transportphasen (Sondertransporte mit besonderen Auflagen) zu erwarten. In beiden Fällen ist ein Kühlsystem notwendig, um den Kraftstoffverlust im Stillstand zu minimieren und Methan-Emissionen zu vermeiden. Für solche Maschinen, insbesondere spezielle Maschinen, werden wochenlange Standzeiten angenommen. Die Maschinen

müssen aber anschließend mit ihrem eigenen Antrieb für den Transport verladen werden können. Somit ist das Abstellen der Maschine mit leerem Tank ungeeignet. Ein mit Boil-off-Gas betriebenes Kühlsystem bietet sich insbesondere deshalb an, da bei Sondertransporten (insbesondere bei Wartezeiten) keine externe Energieversorgung zur Verfügung steht. [5]

**LANDWIRTSCHAFTLICHE GROßMASCHINEN (1C, 2C, 3BE, 4AC, 5B)**

Für landwirtschaftliche Großmaschinen wie Traktor, Mähdrescher und Feldhäcksler, die einen hohen Energieumsatz und lange Betriebsdauern aufweisen, wird die Gas-Dieselmotor-(HPDI)-Motorvariante vorgeschlagen. Fahrten aus dem Feld heraus um zu tanken, sollen vermieden werden, daher wird die Maschine mit der größtmöglichen Tankkapazität ausgestattet. Dabei muss auf das Gesamtgewicht geachtet werden. Zu hohes Gewicht führt zum Einsinken der Maschine im Ackerboden und zu einer kritischen Bodenverdichtung. Für jeden Maschinentyp müssen unterschiedliche Kompromisse zwischen Gewicht und Tankkapazität eingegangen werden [5].

Eine noch zu prüfende Möglichkeit wäre, bei Erntemaschinen ein Kompromiss zu finden zwischen großem Kraftstofftank und der Verkleinerung des Erntegutbunkers auf Kosten von früheren Übernahmefahrten. „Ein eventueller erhöhter Energieverbrauch des Gesamteinsatzes durch zusätzliche Übernahmefahrzeuge wäre gesondert zu betrachten“ [5].

Längere Stillstände von Landmaschinen sind nicht unüblich. Ein elektrisches Kühlsystem wird empfohlen, da in Scheunen bzw. anderen Hallen eine elektrische Versorgung möglich ist. Für Maschinen, die nur saisonal im Einsatz sind, wird das Leeren des Kraftstofftanks am Ende der Saison empfohlen. Auf eine Sicherheitsfackel wird verzichtet, da in Scheunen meistens leicht entflammables Material gelagert wird [5].

**FORSTWIRTSCHAFTLICHE GROßMASCHINEN (1C, 2C, 3BE, 4AE, 5B)**

Forstwirtschaftliche Großmaschinen wie der Holzvollernter oder der Rückezug weisen ebenfalls hohe Antriebsleistungen und aufgrund ihrer langen zu erwartenden Einsatzdauern auch hohe Energieumsätze auf. Folglich werden solche Maschinen mit einem Gas-Dieselmotor (HPDI) und einen größtmöglichen Tank ausgestattet. Wenige Betankungen im Wald sind gewünscht sowie die Einhaltung des zulässigen Bodendrucks. Demnach muss auch hier ein Kompromiss zwischen benötigter Tankkapazität und zulässigem Bodendruck gefunden werden. Für mögliche Stillstandzeiten im Wald (keine Stromversorgung), muss die Maschine ein Boil-off-Gas betriebenes Kühlsystem besitzen. Eine Fackel scheint im Wald zudem zu riskant [5].

**BEWERTUNGEN**

Die vorgestellten Konzepte werden im Folgenden am Beispiel einer konkreten Maschine bewertet. Dazu wurden eine Grabenwalze, ein Radlader, ein Raupenbagger, ein Traktor und ein Skidder gewählt. Zur Bewertung der Veränderungen von Tankenergieinhalt und Maschinengewicht wurden jeweils konkrete Maschinen gewählt und Vergleichsrechnungen anhand ihrer technischen Daten angestellt.

**GRABENWALZE**

Das Konzept für kleine Arbeitsmaschinen wird am Beispiel einer Grabenwalze analysiert. Für die gewählte Maschine wird eine Motorleistung von 15 kW, ein Dieseltankvolumen von 24 l, ein Einsatzgewicht von 1 600 kg und ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von 3,1 l/h angenommen. Daraus folgt eine mögliche Einsatzdauer von etwa 7,7 h. Mithilfe des Mehrgewichtsfaktors für ein Diesel-Gasmotor-(Dual-Fuel)-System und L-Gas aus [5] von 1,7 ergibt sich für die gleiche mitgeführte Energiemenge ein Massenzuwachs von 15,5 kg. Relativ betrachtet entspricht dieser Wert einer Steigerung der Gesamtmasse um knapp 1 %. Dies scheint bei einer Walze, deren Aufgabe die Bodenverdichtung ist, vernachlässigbar. Bei einer kompakten Maschine für enge Arbeitsräume könnte eher der erhöhte Bauraumbedarf eines LNG-Tanks problematisch sein.

Methan aus möglichem Boil-off oder Abgas könnte in einer Baugrube zwar theoretisch gefährlich sein, Grabenwalzen werden aber ferngesteuert um den Bediener vor Abgasen zu schützen und Methan verflüchtigt sich in der Atmosphäre, sobald es sich auf normale Umgebungstemperaturen erwärmt. Wenn die Frage der Tankerwärmung durch Vibrationen geklärt, ist scheint ein Einsatz von LNG-Systemen in Grabenwalzen aus technischer Sicht also sinnvoll.

**SONCEBOZ**

**A CHALLENGE IN THE ELECTRIFICATION OF YOUR HYDRAULIC SYSTEM? LET US SOLVE IT FOR YOU.**

Sonceboz is a leader in providing mechatronic solutions for positioning and flow control applications in challenging environments. Enable functional safety, predictive maintenance and decentralized intelligence with our solutions:

- electromechanical actuators for valves
- electric motors for speed controlled pumps
- mechatronic drive solutions up to 5 kW

Contact us and we will develop a compact, efficient and reliable solution customized for your challenge. Trust our experience: more than a billion Sonceboz solutions are at work in the world right now.

www.sonceboz.com FROM MIND TO MOTION

## RADLADER 27 T EINSATZGEWICHT

Das LNG-Konzept für größere Baumaschinen wird zunächst für die Anwendung in einem Radlader bewertet. Hierzu wird als Referenz ein Radlader mit einer Antriebsleistung von 250 kW und einem Dieseltankvolumen von 370 l gewählt. Bei der Ausrüstung mit einer Mehrzweckschaufel entspricht das Maschinengewicht ca. 27 t. Der Wirkungsgrad des Antriebsmotors wird mit 44 % [5] angenommen, seine Auslastung mit einem Faustwert von 70 %. Die sich daraus ergebende mögliche Betriebsdauer der Maschine beträgt etwa 9,3 h. Mit dem Heizwert des Dieselkraftstoffs und der Speicherdichte von Dieseltanksystemen ergibt sich ein Tankenergieinhalt von 13,0 GJ bei einem rechnerischen Tankgewicht von 335 kg. Der Faktor für das Mehrgewicht eines LNG/Diesel-Tanksystems für den Gas-Dieselmotor-(HPDI)-Betrieb im Vergleich zum Dieselsystem beträgt, bei Systemen in der Größenordnung von Nutzfahrzeugtanks, im Mittel etwa 2,9 [4]. Damit ergibt sich für ein LNG/Diesel-Tanksystem für die betrachtete Maschine ein Gewicht von etwa 972 kg, entsprechend einem Gewichtszuwachs von 617 kg bzw. 2,3 %. Würde statt L-Gas H-Gas als Treibstoff genutzt, fielen das Mehrgewicht aufgrund der höheren Speicherdichte um etwa 100 kg geringer aus [5] und entspräche einem Gewichtszuwachs von 1,9 %. Radlader beschleunigen in ihrem Arbeitsprozess sehr häufig, weshalb ein Gewichtszuwachs der Maschine zu erhöhter Beschleunigungsarbeit und damit zu einem höherem Energieverbrauch führen würde. Beim Radlader wäre eine (Teil-)Kompensation des erhöhten Tankleergewichts durch leichtere Gegengewichte deshalb unerlässlich. Die Kapazität des Tanksystems kann aufgrund der möglichen Betriebsdauer nicht ohne eine Anpassung der Betriebsstrategie reduziert werden. Kann die Maschine z. B. in gesetzlich vorgeschriebenen Arbeitspausen des Maschinenführers betankt werden, so wäre bei einer Betankung bei der Hälfte einer 8-stündigen Arbeitsschicht die Halbierung des Kraftstoffvorrates möglich. Dadurch wäre das Mehrgewicht kompensiert. Aufgrund der

Gewichtsproblematik des häufig beschleunigenden Radladers scheint eine endgültige Bewertung des LNG-Konzepts für diese Maschinen voreilig zu sein. Bei Ergreifung der genannten Ausgleichsmaßnahmen erscheint ein sinnvoller LNG-Antrieb von Radladern aber möglich.

## RAUPENBAGGER 25 T-29 T EINSATZGEWICHT

Als Beispielmachine dient hier ein Raupenbagger mit einem Einsatzgewicht von 25–29 t, einer Dieseltankkapazität von 520 l und einer Motorleistung von 150 kW. Die Berechnung der Tankgewichte erfolgt analog zu den vorher betrachteten Maschinen und ergibt ein rechnerisches Gewicht des Dieseltanks von 476 kg. Mit der Annahme, dass L-Gas zum Einsatz kommt, beträgt das Gewicht des LNG/Diesel-Tanksystems etwa 1380 kg. Der Gewichtszuwachs beträgt dabei 904 kg bzw. 3 bis 3,6 %. Raupenbagger fahren im Betrieb wenig, weshalb eine Steigerung des Maschinengewichts um wenige Prozent unkritisch erscheint. Wird die zusätzliche Rotationsträgheit des Oberwagens aufgrund des schwereren Tanks betrachtet, so muss berücksichtigt werden, dass der Ausleger und das Gegengewicht weiter von der Rotationsachse entfernt liegen als die Kraftstofftanks. Die zusätzliche Rotationsträgheit durch ein erhöhtes Tankgewicht scheint sogar vernachlässigbar, wenn berücksichtigt wird, dass das Gegengewicht der Beispielmachine mit 4 bzw. 6,75 t angenommen wird. Würde H-Gas als Treibstoff genutzt, fielen die Auswirkungen noch geringer aus als beim Einsatz vom L-Gas. Die Motorauslastung wird wie beim Radlader mit 70 % angenommen, weshalb sich eine theoretische mögliche Betriebsdauer von 21,3 h ergibt. Folglich wäre es möglich, den Kraftstoffvorrat zugunsten eines geringeren Maschinengewichts zu reduzieren. Eine überschlägige Berechnung der möglichen jährlichen Treibhausgasemissionen durch Boil-off bis zur Kompensation des Emissionsvorteils des Gasantriebs für eine Maschine in einem vergleichbaren

Einsatz legt nahe, dass auch Boil-off die Emissionsvorteile eines LNG-Antriebes gegenüber einer dieselgetriebenen Maschine nicht (über-)kompensieren würde [5]. Es wird gefolgert, dass der Antrieb von Raupenbaggern mit LNG positiv zu bewerten ist.

## TRAKTOR

Als Anwendungsfall aus dem Bereich der Landmaschinen wird ein großer Traktor

ausgewählt. Die Beispielmachine hat eine (Nenn-)Motorleistung von 294 kW und ein Dieseltankvolumen von 615 l [7]. Der Kraftstoffverbrauch wird grob gemittelt nach [7] mit 45 kg/h entsprechend etwa 37,5 l/h angenommen. Damit ergibt sich eine maximale Betriebsdauer ohne Nachtanken von 16,4 h. Um mit einem HPDI-LNG-System die gleiche Menge Energie mitzuführen und so die gleiche Betriebsdauer erreichen zu können, ergäbe sich auf Basis der obigen Faktoren ein Mehrgewicht von etwa 1080 kg. Dies entspricht einem Massenzuwachs von knapp 9 %.

Ein so hohes Mehrgewicht kann nicht einfach in allen Einsatzfällen akzeptiert werden, da die Maschine sonst u. U. in einen weichen Ackerboden einsinken könnte. Beim Traktor scheint der Einsatz eines LNG-Systems von Kompromissen oder weiteren Überlegungen abzuhängen. Denkbar wären hierbei z. B. eine geänderte Tankstrategie, bei der weniger Treibstoff mitgeführt werden muss oder eine optimierte Gewichtsverteilung. Trotz der erforderlichen weiteren Anstrengungen wäre ein Einsatz eines LNG-Systems bei Großtraktoren aus Emissionssicht besonders attraktiv, da solche Maschinen weit verbreitet sind und einen hohen Energieumsatz aufweisen, der mit entsprechend hohen Emissionen einhergeht.

## SKIDDER

Zuletzt wird das Konzept für Forstmaschinen für die Anwendung in einem Skidder bewertet. Hierfür wird ein Mittelwert aus den Werten von [8] angenommen: Die Beispielmachine hat eine Motorleistung von 100 kW, ein Tankvolumen von 159 l und bei einer Einsatzmasse von 11 t einen mittleren Kraftstoffverbrauch von 7,3 l/h. Die mögliche Einsatzdauer ergibt sich damit zu rund 21,8 h. Mit dem bereits bekannten Mehrgewichtsfaktor für ein HPDI-System und die Verwendung von L-Gas ergibt sich ein Mehrgewicht von 279 kg, entsprechend etwa 2,5 %.

Forstmaschinen dürfen keinen unnötig hohen Bodendruck verursachen, da sie ansonsten den Waldboden beschädigen würden. Daher ist zusätzliches Gewicht für den Skidder zunächst kritisch zu sehen. Eine Gewichtssteigerung um 2,5 % dürfte allerdings als moderat anzusehen sein. Zusätzlich muss der Skidder zur Erfüllung seiner Arbeitsaufgabe regelmäßig Ladeplätze anfahren, die für Lkw erreichbar sind und die mögliche Einsatzdauer ist deutlich länger als eine Arbeitsschicht. Folglich scheint bei Bedarf eine Reduzierung der mitgeführten Kraftstoffmenge möglich, um das Mehrgewicht zu

reduzieren, oder auszugleichen. In Summe wird auch der Einsatz von flüssigem Methan in Forstmaschinen, insbesondere in den Transportmaschinen positiv bewertet.

## ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden das Methan, wenn es nachhaltig gewonnen wurde eine CO<sub>2</sub>-neutrale Alternative zum Diesel darstellen kann. Dazu wurden die am Markt befindlichen Komponenten, um einen flüssigen Methanantrieb zu ermöglichen, vorgestellt und die Methode des morphologischen Kastens angewendet. Aus den verschiedenen Arbeitsbereichen der mobilen Arbeitsmaschinen und deren notwendigen Randbedingungen wurden Konzepte für einzelne Maschinenbeispiele abgeleitet. Die entstehenden Konflikte beim Mehrgewicht oder der Reichweite müssen berücksichtigt werden. Zusätzlich wurde gezeigt, dass viele Konzepte stark von der möglichen Infrastruktur sowie der Gesamtprozessführung abhängen. Die prinzipielle Durchführbarkeit ist allerdings bereits heute gegeben [9].

### Literaturverzeichnis:

- [1] Klimaerwärmung, Handelsblatt, URL - <https://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/klimaerwaermung-rekordanstieg-der-treibhausgas-konzentration/20521282.html?ticket=ST-5305062-2mn7wghgl.eudxgTOXJF-ap3>. Stand: 30.10.2017
- [2] Climate Action, European Commission, URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_de](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de), Stand: 09.07.2018
- [3] M. Geimer und I. Ays: Nachhaltige Energiekonzepte für mobile Arbeitsmaschinen – in welche Richtung gehen Sie?, Mobile Maschinen, pp. 18-25, 6.2014
- [4] L. Weberbeck et al.: Verflüssigtes Erdgas in mobilen Arbeitsmaschinen, ATZ Offhighway, S. 40–46, 2016
- [5] L. Weberbeck: Analyse und Vorauslegung einer mit verflüssigtem Erdgas angetriebenen mobilen Arbeitsmaschinen, Masterarbeit am Teilinstitut Mobile Arbeitsmaschinen, Betreuer M. Geimer, Co-Betreuerin I. Ays, Co-Betreuer D. Engelmann, Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2016
- [6] T. Ehrhard und A. Widmann: Abgasgesetzgebung Diesel- und Gasmotoren, VDMA Motoren und Systeme, Frankfurt am Main, 2017
- [7] John Deere 8400R E23 PowerMix DLG-Prüfbericht 6434, DLG e.V., Groß-Umstadt, 2016
- [8] G. Weise und D. Rosenbach: Kraftstoffverbrauch von Forstmaschinen und Einsparpotenziale unter Praxisbedingungen, URL - [https://www.iko.at/media.php?filename=download%3D%2F2013.01.24%2F1359042868.294491.pdf&rn=Energiefachtag-2013\\_Weise-Kraftstoffverbrauch%20von%20Forstmaschinen\\_klein.pdf](https://www.iko.at/media.php?filename=download%3D%2F2013.01.24%2F1359042868.294491.pdf&rn=Energiefachtag-2013_Weise-Kraftstoffverbrauch%20von%20Forstmaschinen_klein.pdf), Stand: 19.07.2018
- [9] I. Ays, D. Engelmann, M. Geimer: Flüssiges Methan als alternativer Energieträger für mobile Arbeitsmaschinen, 6. Fachtagung: Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2017, 125–143

	Grabenwalze	Radlader	Raupenbagger	Traktor	Skidder
Dieseltankvolumen [L]	24	370	520	615	159
Motorleistung [kW]	15	250	150	294	100
Mögliche Betriebsdauer bei angenommener Motorauslastung [h]	7,7	9,3	21,3	16,4	21,8
Mehrgewicht bei Verwendung von CH <sub>4</sub> [kg]	15,5	617	904	1080	279
Mehrgewicht relativ zur Einsatzmasse [%]	1	2,3	3,0-3,6	9	2,5

## 02 Zusammenfassung des Mehrgewichts bei Methangetriebenen Arbeitsmaschinen



### Wir bieten Ihnen:

- Getriebe
- Sonderlösungen
- Knowhow und
- hohe Qualität

wie Sie es bereits von uns seit über 50 Jahren gewohnt sind.



Rögberg-Pumpenverteilergetriebe für eine Großumschlagmaschine.

Rögberg Getriebe GmbH & Co. KG  
Am Rögberg 10  
D-49716 Meppen  
Telefon: +49 (0) 59 32 / 5 07-0  
Telefax: +49 (0) 59 32 / 5 07-101  
info@roegelberg-getriebe.de  
www.roegelberg-getriebe.de

## Für perfekten Druck

### ... und ideale Temperaturen!

- Membranspeicher
- Blasenspeicher
- Kolbenspeicher
- Speicher-Systemtechnik

- Motorenkühler
- Öl-/Luftkühler
- Wärmetauscher
- Kühler- & Filtersysteme



www.hennlich.at  
www.hennlich-hct.de