

Flüssigerdgas (LNG) als alternativer Energieträger für Landmaschinen



Geschlossener CO₂ Kreislauf mit synthetischem Methan

Dipl.-Ing. **Isabelle Ays**, Teilinstitut Mobile Maschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe;
Prof. **Danilo Engemann**, Abgasprüfstelle (AFHB) und Motorenlabor der Berner Fachhochschule, Biel;
Prof. **Marcus Geimer**, Teilinstitut Mobile Maschinen, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird zunächst die Dringlichkeit klimafreundliche Arbeitsmaschinen zu entwickeln aufgezeigt. Eine mögliche Lösung ist der Einsatz von nachhaltigen alternativen Kraftstoffen. Die Anforderungen an den Energieträger werden kurz erläutert und nachhaltiges flüssiges Methan wird als mögliche Lösung identifiziert. Anschließend wird ein Maschinenkonzept mit Methanantrieb für einen CO₂-neutralen Betrieb von mobilen Maschinen erarbeitet. Dabei werden in der technischen Bewertung, neben z.B. Energieinhalten, Verfügbarkeit, Einsatzprofile und Speicherung auf der Maschine, auch die möglichen Einflüsse auf und durch die umgebende Infrastruktur berücksichtigt. Ein Konzept auf Methan-Basis erweist sich schon jetzt als praktikable Alternative zu den heutigen fossilen Kraftstoffen, wenn es nachhaltig erzeugt wird. Das erarbeitete Konzept wird im Zusammenhang zu der Benutzung in der Landwirtschaft vorgestellt.

Abstract

In this article, the urgency of developing climate-friendly working machines is shown first. A possible solution is the use of sustainable alternative fuels. The requirements to the energy carrier are shortly explained and sustainable liquid methane is identified as a possible solution. Subsequently, a machine concept with methane drive for CO₂-neutral operation of mobile machines will be developed. In the technical evaluation are not only the energy content, the availability, application profiles and storage on the machine taken into account, but also possible influences on and by the surrounding infrastructure. A concept based on methane is already proving to be a viable alternative to today's fossil fuels, if it is produced sustainably. The developed concept is presented in the context of agricultural use.

1. Einleitung

Ein zu hoher und schneller Anstieg der Durchschnittstemperatur der Erde bzw. eine Erderwärmung führt zu irreversiblen Konsequenzen auf Flora, Fauna und Menschen [1]. Um das Ziel, die Durchschnittstemperatur nicht über 1,5 °C steigen zu lassen, haben 195 Länder im Rahmen des Pariser Klimaabkommen im Dezember 2015, länderspezifische Ziele formuliert um die anthropogene Treibhausgase zu reduzieren [2]. Die Europäische Union hat das Ziel formuliert bis 2050 die Treibhausgasemissionen um 80-95% gegenüber 1990 zu reduzieren [3]. Nach [4], bedeutet dies, dass unter Berücksichtigung von nicht reduzierbaren Treibhausgasen wie Methan von Tieren, Fahrzeuge in 2050 keine Treibhausgase mehr emittieren dürfen. Wird eine Lebensdauer von 18 Jahren für mobile Arbeitsmaschinen angenommen [5], so dürfen bis spätestens 2032 keine treibhausgasemittierenden mobilen Arbeitsmaschinen mehr verkauft werden.

Aus diesen Gründen sind klimafreundliche Lösungen für mobile Arbeitsmaschinen notwendig. In der folgenden Veröffentlichung wird eine klimafreundliche Lösung vorgestellt bei der statt mit fossilen Kraftstoffen, mobile Arbeitsmaschinen mit dem nachhaltigen alternativen Kraftstoff „flüssiges Methan“ angetrieben werden.

Zunächst wird die Kraftstoffwahl „flüssiges Methan“ erläutert, dann folgt die Beschreibung der bereits heute verfügbaren Infrastruktur für diesen Kraftstoff. Anschließend wird auf das Antriebsstrangkonzept näher eingegangen. Zum Schluss wird das Konzept am Beispiel eines Traktors untersucht und bewertet.

2. Alternativer Kraftstoff „Flüssiges Methan“

Direkte Treibhausgasemissionen von mobilen Arbeitsmaschinen sind mit dem Kraftstoffverbrauch gekoppelt [6]. Die emittierte CO₂ Menge hängt von der Kohlenstoffmenge im Kraftstoff ab [7]. Alternative Kraftstoffe haben unterschiedliche Zusammensetzungen und Herstellungsprozesse als fossiles Diesel und können somit die Treibhausemissionsmenge von mobilen Arbeitsmaschinen beeinflussen. Wird bei der Herstellung des alternativen Kraftstoffs Biomasse genutzt, welche beim Aufwachsen CO₂ Emissionen aus der Atmosphäre aufgenommen hat, so wird die Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Energie, also die Verbrennung dieses Kraftstoffs als Klimaneutral beurteilt, da die aufgenommene CO₂ Menge der emittierten Menge entspricht [6]. Ebenso klimaneutral sind synthetisch mit Windenergie hergestellte Kraftstoffe aus ausgeschiedenen CO₂ Emissionen von z. B. Kraftwerken. Zusammenfassend, wenn der well-to-wheel Kreislauf einen geschlossenen CO₂ Kreislauf entspricht, dann kann die Arbeitsmaschine als klimaneutral bezeichnet werden. Um einen geeigneten Kraftstoff für mobile Arbeitsmaschinen auszuwählen muss der Heizwert, die gravimetrische sowie die

volumetrische Energiedichte berücksichtigt werden [8]. In [8] wurden verschiedenen Energieträger für mobile Arbeitsmaschinen untersucht. Wasserstoff besitzt zwar einen hohen Heizwert aber dafür eine zu hohe volumetrische Energiedichte [8]. Eine Energiemenge von 500 l Diesel würde einem Volumen von 8.788 l Wasserstoff entsprechen [ebd.]. Des Weiteren müssten viele Komponenten mit wasserstoff-wiederständigere Werkstoffe ersetzt werden, da Wasserstoff „die Festigkeit, Duktilität und Lebensdauer vieler metallischer Werkstoffe“ reduziert [9]. Batterie angetriebene Arbeitsmaschinen werden ebenfalls als nicht geeignet bewertet, da um eine Energiemenge von 500 l Diesel, welches 0,8 t wiegt, Batterien von insgesamt 29 t benötigt werden würden [10].

Die Untersuchung von Geimer und Ays hat ergeben, dass nachhaltiges flüssiges Methan ein hohes Potential aufweist [8]. In [11] wurde aufgezeigt, dass konventionelles flüssiges Erdgas, flüssiges Biomethan und mit Windenergie synthetisch hergestelltes flüssiges Methan jeweils die Treibhausgasemissionen um 16%, 64% und 85% reduziert im Vergleich zu einer mit Diesel angetriebene Maschine.

3. Infrastruktur für methanangetriebene mobile Arbeitsmaschinen

Die Nutzung eines alternativen Kraftstoffs bei mobilen Arbeitsmaschinen ist nur möglich wenn die geeignete Tank-Infrastruktur vorhanden ist. Um flüssiges Methan an mobile Arbeitsmaschinen liefern zu können, kann das bereits existierende Erdgasnetz und dessen Infrastruktur genutzt werden. Methan bzw. Erdgas wird heutzutage in Deutschland gasförmig über Pipelines oder flüssig über eine Maritime Anlieferung, über den Schienenverkehr mit Kesselwagen oder über LKW Tankwagen transportiert. Flüssiges Methan wird bevor es verteilt werden kann, erstmal in Depots bzw. in Speicher gelagert. Depots sind heutzutage bereits in Seehäfen zu finden, diese beinhalten flüssiges Methan aus fossilem Ursprung aus Ländern, die über maritimen Weg liefern. Ein weiteres Depot sind Binnenhäfen, welche sich in Städten im Landesinneren befinden. Die Verteilung erfolgt anschließend mit Binnenschiffen, Kesselwagen, Tankwagen oder über Pipeline. [12]

Power-to-Methane Anlagen oder Biomethan Anlagen können ebenfalls als Depot dienen, dafür müssen sie mit einer Aufbereitungs- und Verflüssigungsanlage vervollständigt werden [ebd.]. Das gespeicherte flüssige Methan kann von Dienstleistern verteilt oder vom Bauern direkt abgeholt werden, indem „bei der Anlieferung von Biomasse an die Biogasanlage [der Bauer] den Kraftstoff in einen mitgebrachten Anhänger“ füllt und wieder zurück auf seinen Hof bringt [ebd.]. Der Betankungsdienstleister kann ebenfalls Methan aus Speicheranlagen auf den Betriebshof eines lokalen Mineralölhändlers seinen Tankwagen füllen [ebd.].

Eine weitere Depot-Möglichkeit sind stationäre Tanks auf Bauernhöfen, Baustellen, Betriebshöfe für kommunale Fahrzeuge, für Tage- oder für Untertagebau. „Diese sind kleine Satellitespeicher oder Container, welche durch kleine Verflüssigungsanlagen oder vom Betankungsdienstleister befüllt werden können“ [ebd.]. Zusammenfassend, können die Betankungsmöglichkeiten von mobilen Arbeitsmaschinen mit flüssigem Methan entweder über die direkte Betankung der Maschine durch einen Tankwagen, über die Lieferung oder das Auffüllen eines stationären Containers oder über die eigene Verflüssigungsanlage auf dem Betriebsgelände erfolgen. Sobald eine eigene Verflüssigungsanlage zu Verfügung steht, können die Arbeitsmaschinen das flüssige Methan aus dem Erdgasnetz abzweigen. Hierfür wurden drei flexible Anschlüsse identifiziert: die Nutzung der Absperrschieber in Straßen, das Aufbohren von Gasleitungen oder den Zugang zu einem Hausanschluss anmieten. [ebd.]

Für die Wahl der geeigneten Betankungsstrategie müssen folgende Größen vorab bestimmt werden: die Entfernung bis zum nächsten Kraftstoffdepot, die Größe und die Anzahl der Maschinen, der Auslastungsgrad der Maschinen und die Wichtigkeit der Planungssicherheit. [ebd.]

Der Betankungsprozess darf nur in gut belüfteten Orten stattfinden und muss von Personen durchgeführt werden, die eine Sicherheitskleidung tragen um Kälteverbrennungen vorzubeugen. [ebd.]

4. LNG im Fahrzeugeneinsatz – Motoren- und Tankkonzepte

Für die Lagerung in Gasterminals und für den Transport via Pipeline oder Verschiffung wird Methan gekühlt bei -160°C und bei 1 Bar Druck bereitgestellt. [13]

Es stehen diverse Brennverfahren für die Verwendung von Methan zur Verfügung: Ottobrennverfahren, Diesel-Gas-Brennverfahren (Dual-Fuel) und Gas-Dieselmotoren. Die Fremdgezündeten Motoren, Otto und Diesel-Gasverfahren (häufig Dual-Fuel genannt), sind meist mit einer äußeren Gemischbildung ausgestattet. Es finden sich dennoch auch Motoren mit innerer Gemischbildung und mit Niederdruckeinblasung. Die Ottomotoren werden mit stöchiometrischen oder mageren Brennverfahren betrieben. Für den Gas-Dieselmotor, sind prozessbedingt eine innere Gemischbildung mit Einblasung in den Verdichtungstakt notwendig. Die Otto-Motoren stellen heute die einzige Möglichkeit dar, ohne zusätzliches Zündfluid auszukommen [11, 14]. Die Methan Motoren, die von Dieselmotoren abgeleitet werden, sind mit Diesel beigemischt (Dual Fuel) oder eine geringe Menge an Diesel wird miteingespritzt um das Gasgemisch zu zünden (siehe Bild 1).

Mit konsequenter Weiterentwicklung der Direkteinblasung können Verfahren wie z.B. dem Bowl-Prechamber-Ignition (BPI), einem Vorkammerzündkerzen-Verfahren, ganz auf Dieselöl

verzichtet werden. Im Vergleich zum konventionellen Dieselmotor, als Referenz, erreichen die Wirkungsgrade und Leistungsdichte der Gas Motoren zwischen 70 und 100 % des Ausgangswerts im direkten Vergleich (siehe Bild 1). Die Ottomotoren sind aktuell etwas weniger effizient als die Dual-Fuel oder Gas-Dieselmotoren, besitzen aber dafür eine sehr simple Abgasnachbehandlung und kommen ohne zusätzliches Diesel als Zündöle aus.[14]

Die Abgasnachbehandlung richtet sich nach dem Brennverfahren und lässt sich in zwei Gruppen teilen. Brennverfahren mit Luftüberschuss, also magere Verbrennung und Brennverfahren mit stöchiometrischer Verbrennung. Brennverfahren mit stöchiometrischer Verbrennung benötigen lediglich ein 3-Wege-Katalysator der auf Methanverbrennung und eventuellen Methanschlupf angepasst ist. Brennverfahren mit hohem Luftüberschuss müssen wie konventionelle Diesel-Abgasnachbehandlungssysteme, mit einer selektiven Stickoxidreduzierung ausgestattet sein. Sind sie zusätzlich bivalent ausgelegt, also in der Lage auch konventionell nur mit Diesel betrieben zu werden, ist ein Dieselpartikelfilter erforderlich. [15]

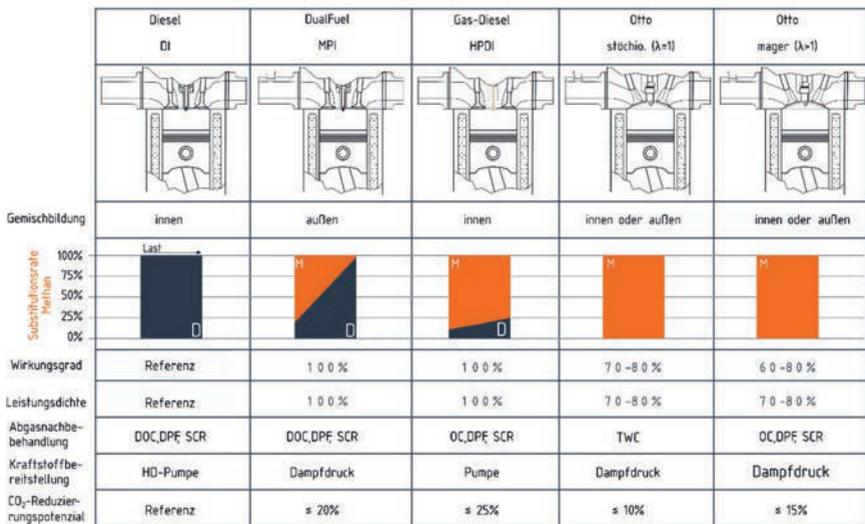


Bild 1 : Überblick der Brennverfahren, basierend auf [14]

Für den mobilen Einsatz wird das Methan unter höheren Temperaturen und Druck gespeichert. „Kalte“ und „warme“ Tanks speichern das Methan bei -146°C und 3 bar bzw. bei -130°C und 8 bar, sie werden als geschlossene Systeme ausgeführt. Das Gas-Diesel-Verfahren benötigt eine Hochdruckeinblasung, daher sind hier kalte Tanks im Einsatz, um in den Tank integrierte Krypumpen zu verwenden, da die Verdichtung in der flüssigen Phase effizienter ist. Wird ein Gasmotor mit Ottoverfahren oder ein Diesel-Gasverfahren angewendet sind wärmere Tanks im Einsatz. Denn diese Brennverfahren blasen bei niedrigen Drücken direkt in den Zylinder oder in das Saugrohr ein. Die warmen Tanks fördern eigenständig den Kraftstoff zum Verdampfer und den Einspritzorganen. Dies ist durch den Druck des verdampfenden Methans möglich.[15]

Dennoch besteht ein hoher Temperaturunterschied zwischen dem flüssigen Methan und der Umgebung, daher ist der Tank entsprechend isoliert. Das Methan erwärmt sich und ein Anteil davon verdampft kontinuierlich, ein stetiger Anstieg des Drucks im Tank ist die Folge. Dies geschieht solange, bis ein kritischer Druck erreicht wird, dann öffnet sich das im Tank enthaltene Druckbegrenzungsventil. Die Zeit bis dieser Fall eintritt nennt sich die Standzeit des Tanks. Das verdampfende LNG wird „Boil-off-Gas“ genannt [13].

Dieses Boil-off-Gas lässt sich mithilfe des Einbaus einer explosionsgeschützten Fackel, einfach beseitigen. Die CO_2e Emission des Boil-off-Gas können dadurch um 90 bis 93 % reduziert werden. Eine Kühlung die mit Boil-off-Gas betrieben wird, kann die Emissionen um 99% und die Standzeit um das 3,6 bis ca. 11,5-fache verlängern. Bei mobilen Arbeitsmaschinen, die nur saisonal im Einsatz sind wie z.B. der Mähdrescher oder Feldhäcksler wird am Ende der Saison eine Entleerung des Tanks empfohlen durch z.B. Rückspeisung des Methans ins Gasnetz. [11]

5. Berechnungsbeispiel an einem Traktor in der Landwirtschaft

Bei einem Traktor mit hohem Energieumsatz und langer Betriebsdauer wird ein Gas- Dieselmotor (HPDI) vorgeschlagen. Die Felder, die der Traktor bearbeitet sind nicht immer in der Nähe des Bauernhofs, somit sind Fahrten aus dem Feld heraus um zu tanken, zu vermeiden. Ein zu hohes Gesamtgewicht könnte zum Einsinken der Maschine im Ackerboden und zu einer kritischen Bodenverdichtung führen. Daher muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen der größtmöglichen Tankkapazität und dem geduldeten Gesamtgewicht des Traktors. [16]

Je nach Bauernhofart kann der Traktor längere Stillstände haben oder nur saisonal im Einsatz sein. Bei längeren Stillstände wird die Maschine mit einem elektrischen Kühlsystem ausgestattet, „da in Scheunen bzw. anderen Hallen eine elektrische Versorgung möglich ist“ [16].

Bei saisonalen Einsätzen wird das Leeren des Kraftstofftanks am Ende der Saison empfohlen [ebd.].

Als Beispielmaschine wird ein Traktor mit einer Nennleistung von 290 kW, einem

Dieseltankvolumen von 615 l und einem Gesamtgewicht¹ von 13.438 kg ausgewählt. Nach dem PowerMix DLG- Bericht hat solch ein Traktor einen Kraftstoffverbrauch von ca. 37,5 l/h. Dies bedeutet, dass bei diesem Kraftstoffverbrauch, die maximale Betriebsdauer eines vollen Tanks 16,4 h entspricht. Mit einem Methan betriebenen HPDI- Gas- Dieselmotor würde sich für die gleiche Energiemenge bzw. Betriebsdauer ein Mehrgewicht von 1.080kg ergeben, welches 8% Massenzuwachs entspricht. [16, 17]

Dieses Mehrgewicht ist nicht für alle Anwendungsfälle akzeptabel, daher muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen Tankkapazität und Betankungsstrategie. Eine Möglichkeit wäre die Tankkapazität für eine Betriebsdauer von 6,3 h zu reduzieren, welche für tägliche Nebensaisonarbeiten ausreichend wäre. Dies würde dann einen eher akzeptableren Maschinenmassenzuwachs von 3% gegenüber der 615 l Dieselmachine entsprechen. Damit der Hofbetreiber ohne Unterbrechungen seine Tagesarbeit erfüllen kann, sollte er vor Arbeitsbeginn einmal täglich tanken. In so einem Fall wäre dem Betreiber zu empfehlen einen Container mit flüssigem Methan oder eine Verflüssigungsanlage gekoppelt an das Erdgasnetz auf den Betriebshof zu installieren. Für Hauptsaisonarbeiten, die dem Traktor 12h Betriebsstunden erfordern könnten, sind alternative Betankungsstrategien zu entwickeln. Eine von vielen Möglichkeiten wäre einen Tankwagenanhänger zum Feld zu fahren, eine andere Möglichkeit wäre einen Tankdienstleister zum Feld hinzubestellen, eine weitere Möglichkeit wäre beim Entladen des Erntegutes bei der Biogasanlage seinen Tank aufzufüllen, usw.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass ein mit flüssigen Methan angetriebenen Traktor realisierbar ist. Je nach Einsatz, müsste eventuell der Fahrer seine Tankgewohnheiten anpassen.

6. Zusammenfassung & Ausblick

Die Folgen des Klimawandels drängen zu schnellen Entwicklungen für klimafreundliche mobile Arbeitsmaschinen. Eine mögliche Lösung mit flüssigem Methan wurde in diesem Beitrag vor-

¹ Das Gesamtgewicht des Traktors hängt von seiner Ausstattung ab. Hier wurde das Beispiel aus der John Deere Broschüre gewählt bei einem vollen 615 l Diesel Tank.

geschlagen und beschrieben. Dabei wurde die existierende Betankungs-Infrastruktur untersucht und es konnte gezeigt werden, dass diese bereits heute für die vorgeschlagene Lösung einsetzbar ist. Ein Antriebskonzept mit flüssigem Methantrieb wurde am Beispiel eines Traktors untersucht. Dabei war ein Übereinkommen zwischen Tankkapazität und Gewicht nötig. Schließlich, konnte anhand des Beispiels des Traktors gezeigt werden, dass Antriebskonzepte mit flüssigem Methan für Landmaschinen möglich sind.

References

1. Fischer H, Meissner KJ, Mix AC et al. (2018) Palaeoclimate constraints on the impact of 2 °C anthropogenic warming and beyond. *Nature Geosci* 11(7): 474–485. doi: 10.1038/s41561-018-0146-0
2. European Commission (2018) Paris Agreement - Climate Action - European Commission. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en. Accessed 18 Sep 2018
3. European Commission (2018) Climate Action - Climate strategies & targets: 2050 low-carbon economy. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en. Accessed 17 Jul 2018
4. Pfluger B, Tersteegen B, Franke B et al. (2017) Modul 10.a: Reduktion der Treibhausgasemissionen Deutschlands um 95 % bis 2050 Grundsätzliche Überlegungen zu Optionen und Hemmnissen: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie
5. Helms H, Heidt C Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand
6. Edwards R, Larivé J-F, Rickeard D et al. (2014) WELL-TO-TANK Appendix 4 - Version 4a: Description, results and input data per pathway, Italy
7. Edwards R, Larivé J-F, Rickeard D et al. (2014) WELL-TO-TANK Appendix 1 - Version 4a: Conversion factors and fuel properties, Italy
8. Geimer M, Ays I (2014) Nachhaltige Energiekonzepte für mobile Arbeitsmaschinen – in welche Richtung gehen sie? *Mobile Maschinen*(6/2014)
9. Fraunhofer IWM (2018) Wasserstoffversprödung metallischer Werkstoffe - Fraunhofer IWM. <https://www.iwm.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/werkstoffbewertung-lebensdauerkonzepte/mikrostruktur-eigenspannungen/wasserstoffversproedung-metallischer-werkstoffe.html>. Accessed 11 Sep 2018

10. Thiebes P, Geimer M (2010) Potenziale nutzen mit Methode. Fachzeitschrift Mechatronik(6-7): 36–39
11. Weberbeck L, Engelmann D, Ays I et al. (2016) Verflüssigtes Erdgas in mobilen Arbeitsmaschinen. ATZ Offhighway 9(4): 40–47. doi: 10.1007/s35746-016-0033-9
12. Schmidt S (2016) LNG-Tankstrategie für Mobile Arbeitsmaschinen. Masterthesis, Karlsruhe Institute of Technology
13. Deutsches Institut für Normung Allgemeine Eigenschaften von Flüssigerdgas(DIN EN 1160 : 1996)
14. Ays I, Engelmann D, Geimer M Flüssiges Methan als alternativer Energieträger für mobile Arbeitsmaschinen: 15. Februar 2017,. In: Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen : 6. Fachtagung, vol 6, pp 121–143
15. Weberbeck L (2016) Analyse und Vorauslegung einer mit verflüssigtem Erdgas angetriebenen mobilen Arbeitsmaschine, Karlsruhe
16. Ays I, Weberbeck L, Engelmann D et al. (2018) Maschinenkonzepte für Mobile Arbeitsmaschinen mit Methantrieb. Mobile Maschinen(5): 36–41
17. John Deere Serie 8R/8RT: Produktbroschüre. <https://www.deere.de/de/magazines/publication.html?id=0c442327#44>. Accessed 20 Sep 2018