

# Klimafreundliche Antriebe für Landmaschinen

Viele Wege führen nach Rom

von DR. KLAUS THUNEKE und DR. EDGAR REMMELE: **Ein Umdenken hin zu klimafreundlichen Antrieben von Landmaschinen hat begonnen. Es gilt nun die richtigen Weichen zu stellen, damit die Umstellung Fahrt aufnehmen kann. In einer Online Diskussion mit Herstellern von Landmaschinen wurde deutlich, dass die Firmen ganz unterschiedliche Technologien favorisieren. Schon heute oder in naher Zukunft sind Landmaschinen erhältlich, die mit Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, Biomethan oder hydrierte Pflanzenöle (HVO) betrieben werden können. Im unteren Leistungssegment werden auch Maschinen angeboten, die mit elektrischem Strom aus Batterien angetrieben werden. Grüner Wasserstoff oder E-Fuels sind hingegen noch Zukunftsvision.**

Im vergangenen Jahr gingen die Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) der deutschen Landwirtschaft bereits im fünften Jahr in Folge zurück. Gründe dafür sind der Einsatz von weniger Stickstoffdünger, sinkende Rinderbestände und die trockene Witterung [1]. Insgesamt wurden im Jahr 2020 noch 66,4 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.) durch die Landwirtschaft freigesetzt. Dies entspricht etwa 9 Prozent der gesamten THG-Emissionen in Deutschland.

## Klimaschutzziel vor Augen

Ergänzend zu der jüngst positiven Entwicklung, sind weitere Anstrengungen zur THG-Einsparung notwendig, um das im deutschen Klimaschutzgesetz verankerte Ziel für den Sektor Landwirtschaft von 58 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. (Novelle des Klimaschutzgesetzes, Kabinettsbeschluss vom 12. Mai 2021: 56 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq.) bis zum Jahr 2030 zu erreichen [2]. Zu den wichtigsten Minderungsmaßnahmen zählen der Abbau von Stickstoffüberschüssen, die Nutzung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen, mehr Ökolandbau, weniger Emissionen aus der Tierhaltung und eine verbesserte Energieeffizienz [3]. Das Potenzial der THG-Reduktion in der Landwirtschaft ist jedoch begrenzt, denn ein Großteil der landwirtschaftlichen THG-Emissionen stammt aus natürlichen Prozessen in Böden und aus der Verdauung von Wiederkäuern.

Bislang noch wenig beachtet wurden die THG-Emissionen, die aus der Verbrennung von Kraftstoff aus den Motoren land- und forstwirtschaftlicher Maschinen stammen. Der Dieserverbrauch der deutschen Land- und Forstwirtschaft beträgt rund 2 Milliarden Liter pro Jahr und ist für den Ausstoß von etwa 5,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. verantwortlich. Dieser Wert schließt die Emissionen der Vorkette, also Erdölgewinnung, Raffination und Transporte nicht mit ein, da diese nicht dem Sektor Landwirtschaft zugerechnet werden. Bei vollständigem Ersatz



Bild 1: Diesel, Biodiesel, Rapsölkraftstoff und Paraffinischer Diesel (HVO) für Leistungs- und Abgasmessungen am Traktorenprüfstand des Technologie- und Förderzentrums. (Bild: Tobias Haase, StMELF)

des Diesekraftstoffs in der Landwirtschaft durch die Nutzung erneuerbarer Energieträger könnte rechnerisch die verbleibende Emissionsminderungslücke von 10,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. bis zum Jahr 2030 rund zur Hälfte geschlossen werden.

## Was tanken Traktoren morgen?

Welche alternativen Antriebe auf Basis erneuerbarer Energien sind für Landmaschinen sinnvoll? Um dies aus der Sicht der Landmaschinenindustrie zu diskutieren, veranstaltete das Technologie- und Förderzentrum im März 2021 ein Online-Seminar mit dem Titel: „Was tanken Traktoren morgen?“. Die Landmaschinen- und Motorenhersteller Claas, CNH, Deutz AG, John Deere und MAN nahmen teil und präsentierten ihre Produktstrategien. Es wurde deutlich, dass nicht die eine Lösung favorisiert wird, sondern dass die Firmen unterschiedliche

Technologien verfolgen: Schon heute oder in naher Zukunft erhältlich sind Landmaschinen, die mit Kraftstoffen aus Anbaubiomasse oder Rest- und Abfallstoffen betrieben werden, nämlich Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, Biomethan (CNG) und paraffinischer Kraftstoff in Form hydrierter Pflanzenöle. Darüber hinaus werden speziell im unteren Leistungssegment vereinzelt auch Fahrzeuge und Maschinen angeboten, die mit elektrischem Strom aus einem Batteriespeicher angetrieben werden. Weitere klimafreundliche Antriebstechnologien, wie Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien gewonnen und in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen eingesetzt wird, oder sogenannte E-Fuels, also synthetische Kraftstoffe, die mithilfe von Strom aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub> erzeugt werden, sind bislang noch Zukunftsvision. Welche Antriebstechnologien künftig in der Landwirtschaft dominieren werden, ist noch ungewiss.

Auch die 250 Teilnehmer des Online-Seminars waren uneins. Auf die Frage „Wenn Sie bestimmen könnten, womit Traktoren in zehn Jahren angetrieben werden sollten, was wäre das?“ entfielen 28 Prozent der Antworten auf Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel, weitere 6 Prozent auf hydrierte Pflanzenöle (HVO) und 19 Prozent auf die Biogas-Kraftstoffe Biomethan (CNG) und Bio-LNG. 12 Prozent stimmten für E-Fuels, 11 Prozent für Wasserstoff, 9 Prozent bevorzugten elektrischen Strom aus Batteriespeichern, 8 Prozent die Brennstoffzellen-Technologie und 7 Prozent würden gar nichts ändern und weiterhin auf Dieselmotoren setzen (siehe Abbildung). Wenig überraschend ist, dass in der Landwirtschaft weiterhin der Verbrennungsmotor und die heute bereits verfügbaren erneuerbaren Kraftstoffe und Antriebe eine wesentliche Rolle spielen. Die ausgewogene Verteilung des Meinungsbildes deutet darauf hin, dass die Zukunft klimafreundlicher Antriebe von Landmaschinen noch weitgehend offen ist und auch mehrere Antriebskonzepte für die verschiedenen Anwendungen vom Hoflader bis zum Mährescher zum Einsatz kommen können.

### Alternative Antriebsoptionen

Die Verwendung von reinen Pflanzenölen als Kraftstoff in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen ist vielfach erprobt. Aufgrund der von Diesel abweichenden Eigenschaften, wie z. B. Fließfähigkeit und Zündverhalten, kann *Pflanzenölkraftstoff* in heutigen Serien-Dieselmotoren nur nach Anpassungen am Motor- und Abgassystem verwendet werden. Diese umfassen beispielsweise das Niederdruckkraftstoffsystem, die Motorsteuerung und die Abgasnachbehandlung. In Mitteleuropa wird meist *Rapsölkraftstoff*, genormt nach DIN 51605 eingesetzt. Seltener werden auch andere Pflanzenöle, wie Sonnenblumenöl, Sojaöl, Leindot-

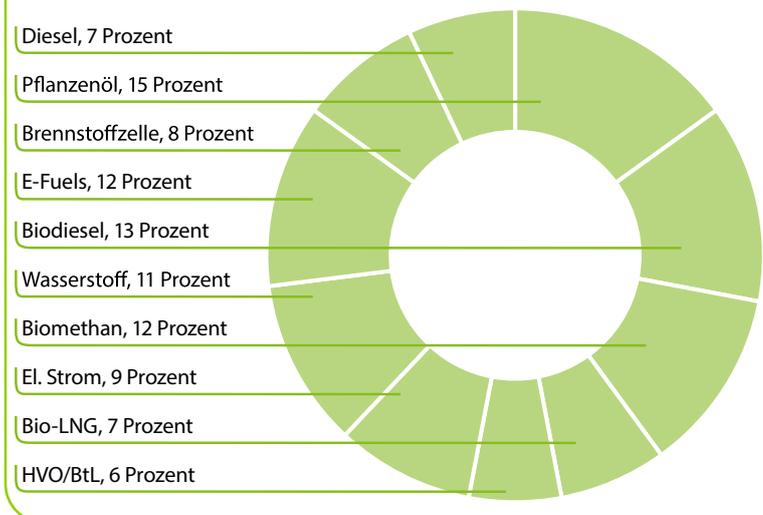


Abbildung: Anteil an Nennungen unter 250 Teilnehmern einer Online-Veranstaltung auf die Frage: Wenn Sie bestimmen könnten, womit Traktoren in zehn Jahren angetrieben werden sollten, was wäre das? (maximal drei aus zehn Antworten wählbar, 491 Antworten insgesamt)

teröl oder Pflanzenölmischungen als Pflanzenölkraftstoff nach DIN 51623 genutzt. Rapsölkraftstoff zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte, ähnlich der von Dieselmotoren aus. Er ist biologisch schnell abbaubar und weitgehend unschädlich für Boden und Gewässer. Rapsölkraftstoff kann sowohl in industriellen als auch in dezentralen Ölmühlen produziert werden. Als Koppelprodukt wird dabei gleichzeitig hochwertiges, gentechnisch nicht verändertes Eiweißfutter erzeugt, das Sojaimporte aus Übersee ersetzt.

Der Hersteller John Deere arbeitet aktuell an der Kommerzialisierung von Traktoren aus dem Werk Mannheim, die zu einhundert Prozent mit Rapsölkraftstoff betrieben werden können. Daneben bieten Firmen, wie z. B. die BayWa oder bioltec systems Lösungen an, um Serientraktoren für den Betrieb mit Rapsölkraftstoff umzurüsten. Lediglich für den Kaltstart und bei Schwachlast ist bei diesen Umrüstungen Dieselmotoren notwendig.

Als *Biodiesel* werden Fettsäuremethylester, kurz FAME (Fatty Acid Methyl Esters) bezeichnet, die zumeist durch den chemischen Prozess der Umesterung pflanzlicher Öle hergestellt werden. In Deutschland werden vorwiegend Altspeiseöle und Rapsöl eingesetzt. Wird beispielsweise Rapsöl als Rohstoff verwendet entsteht wiederum wertvolles Eiweißfutter. Des Weiteren fällt Glycerin als Nebenprodukt an. Biodiesel wird europaweit fossilem Dieselmotoren beigemischt, er kann aber auch unvermischt als sogenanntes B100 eingesetzt werden. Die Qualitätsanforderungen an FAME sind in der Norm DIN EN 14214 geregelt. Biodiesel ist ähnlich fließfähig wie Dieselmotoren. Auch andere Eigenschaften, wie z. B. Dichte, Zündwilligkeit und Wintertauglichkeit sind im Wesentlichen gleich. Biodiesel ist schwach



▮ Bild 2: TFZ Multi-Fuel-Forschungs-Traktor John Deere 6250 R der Abgasstufe 5 für Rapsölkraftstoff, Biodiesel und Dieselkraftstoff im Einsatz auf den Bayerischen Staatsgütern (Foto: TFZ)

wassergefährdend, er belastet Boden und Gewässer weniger stark als fossiler Diesel, wenn er in die Umwelt gelangt.

Biodiesel kann in einigen Bestandsmaschinen bis etwa zur Abgasstufe III A eingesetzt werden, wenn dafür Herstellerfreigaben bestehen. Dadurch könnte unmittelbar ein Beitrag zur Minderung der THG-Emissionen in der Landwirtschaft geleistet werden. Traktoren neuerer Bauart werden teilweise für Dieselkraftstoff mit Biodieselanteilen von 20 oder 30 Prozent freigegeben, was vor allem auf dem internationalen Markt gefragt ist. Die Deutz AG hat Biodiesel für alle Deutz-Motoren bis EU-Stufe IV zugelassen, was allerdings nicht bedeutet, dass auch die Traktoren, in denen diese Motoren verbaut sind, automatisch für Biodiesel freigegeben sind.

*Biomethan* ist ein gasförmiger Kraftstoff, der vorwiegend aus Methan besteht und im Gegensatz zu fossilem Erdgas aus biogenen Rohstoffen hergestellt wird. Als Rohstoffe werden entweder Energiepflanzen, biogene Abfall- und Reststoffe, wie z. B. Speisereste und Pflanzenteile oder Gülle eingesetzt. Durch die Vergärung der Rohstoffe entsteht zunächst Biogas, das in einem weiteren Schritt zu Biomethan aufbereitet wird. Dabei werden die Eigenschaften so eingestellt, dass die Qualität von Erdgas erreicht wird und das Biomethan ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Bei der Einspeisung wird das Biomethan verdichtet und dem Druck in der Erdgasleitung angepasst. Komprimiertes Erdgas bzw. Biomethan wird auch als CNG (Compressed Natural Gas) bezeichnet. Die Anforderungen sind in der DIN EN 16723-2 festgelegt. Bei der Abgabe an Tankstellen weist CNG einen Druck von 200 bar auf. Der auf das Volumen bezogene Energiegehalt beträgt etwa nur 23 Prozent von Dieselkraftstoff. Für die gleiche Reichweite ist also ein 4- bis 5-mal so großes Tankvolumen erforderlich. Durch Abkühlung auf  $-162\text{ °C}$  kann gasförmiges Biomethan

zu *Bio-LNG* (Liquified Natural Gas) verflüssigt werden. Dabei steigt die Energiedichte auf das 2,6-fache an. Allerdings muss dafür eine erhebliche Energiemenge aufgewendet werden, so dass sich die Energiebilanz verschlechtert. Im Vergleich zu Dieselkraftstoff benötigt LNG rund 2/3 mehr Speichervolumen. Wenn sich ein LNG-Tank erwärmt, muss ein Druckausgleich erfolgen, wobei klimaschädliches Methan in die Umwelt gelangen kann. Vor längeren Stillstandzeiten müssen daher LNG-Tanks entleert werden.

In den letzten Jahren wurden von mehreren Herstellern Traktoren vorgestellt, die mit CNG betrieben werden können. Diese wurden aber nicht in größeren Stückzahlen produziert. Der Landmaschinenhersteller CNH steigt 2021 in die Serienproduktion von Methangastraktoren ein. Voraussetzung für die Nutzung eines Methangastraktors ist allerdings die räumliche Nähe zu einer CNG-Betankungsmöglichkeit.

*Hydriertes Pflanzenöl* (HVO) wird aus Rest- und Abfallstoffen oder Pflanzenölen, darunter häufig auch Palmöl, hergestellt. Es ist genormt als paraffinischer Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940 und besitzt mit Ausnahme der geringeren Dichte ähnliche Eigenschaften wie Diesel. HVO ist leicht biologisch abbaubar und nur schwach wassergefährdend. Im Zuge des Ausstiegs aus der Verwendung von Palmöl als Kraftstoff bis 2026, ist heute auch palmölfreies HVO aus Rest- und Abfallstoffen auf dem Markt erhältlich. Zwar ist paraffinischer Dieselkraftstoff als Reinkraftstoff nicht in der 10. BImSchV gelistet und darf folglich nicht an öffentlichen Tankstellen in Deutschland abgegeben werden. Er kann aber in Eigenverbrauchstankstellen für den Flottenbetrieb bereitgestellt, getankt und zur Forschung und Erprobung verwendet werden.

Mehrere Motoren- und Landmaschinenhersteller geben vor allem für neuere Modelle Freigaben für die Verwendung von paraffinischem Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940. Eine Anpassung des Motors ist meist nicht erforderlich. Es ist vorstellbar, dass auch ältere Bestandsmaschinen auf HVO umgestellt werden können, allerdings bestehen dafür in der Regel keine Herstellerfreigaben.

Mittlerweile sind auch Landmaschinen erhältlich, die mit elektrischem *Strom* aus Batteriespeichern betrieben werden. Der Beitrag zum Klimaschutz hängt vor allem davon ab, wie hoch der Anteil an erneuerbarem Strom ist, der geladen wird. Um die gleiche Arbeit wie mit einer Dieselmachine verrichten zu können, werden Batterien benötigt, die über 20-mal schwerer sind und ein mehr als 10-mal so großes Volumen einnehmen als der dafür benötigte Dieselkraftstoff. Aus diesem Grund sind batterieelektrische Antriebe derzeit nur in Sondermaschinen, wie z. B. Futtermischwagen, Lader oder Kompakttraktoren zweckmäßig. Auch wenn die Entwicklung von Batterien weiter voranschreitet und auch Lösungen mit Wechselbatterien oder kabelgebundene Systeme denkbar sind, sind rein elektrische Antriebe für Traktoren

höherer Leistungsklassen auf absehbare Zeit wohl keine praktikable Alternative zu flüssigen oder gasförmigen Kraftstoffen mit hoher Energiedichte. *Hybride Antriebe* als eine Kombination von Verbrennungsmotor und batterieelektrischem Antrieb können ähnlich wie beim Pkw die Vorteile beider Technologien vereinen. Arbeiten in geschlossenen Räumen und kürzere Straßenfahrten könnten beispielsweise mit elektrischem Strom aus der Batterie lokal emissionsfrei erfolgen, wohingegen für Arbeiten mit höherer Leistungsanforderung, wie z. B. Bodenbearbeitung ein Verbrennungsmotor die Antriebsenergie liefert. Außerdem kann der Elektromotor helfen, durch Zuschaltung zum Verbrennungsmotor kurzzeitige Leistungsspitzen abzudecken. Von Nachteil sind jedoch das höhere Gewicht durch die zweite Antriebsart, der zusätzlich erforderliche Bauraum und die höheren Kosten.

*Wasserstoff*, der mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, kommt als klimafreundlicher Energieträger für Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen in Betracht. Die Energiedichte je Volumeneinheit Wasserstoff liegt bei 350 bar Druck nur bei etwa 8 Prozent, bei 700 bar bei etwa 13 Prozent und im flüssigen Zustand bei  $-253\text{ °C}$  bei etwa 24 Prozent von Diesel, so dass für gleiche Reichweiten weitaus größere Tankvolumina erforderlich sind. Der hohe Strom- und Wasserbedarf zur Herstellung von Wasserstoff sowie die Energie zur Speicherung von Wasserstoff verschlechtert zudem die Energie- und Umweltbilanz. Das Hauptproblem ist aber, dass es nur sehr wenige Wasserstofftankstellen gibt. Eine flächendeckende Versorgung des ländlichen Raums mit Wasserstoff ist nicht absehbar, zumal Wasserstofftankstellen sehr teuer sind.

*E-Fuels* sind gasförmige oder flüssige Kraftstoffe, die mithilfe von Strom über den Schritt der Elektrolyse aus Wasserstoff und Kohlendioxid, das entweder aus der Luft oder aus Verbrennungsprozessen stammt, hergestellt werden. Nachteilig sind der hohe Strombedarf für die Produktion und die zu erwartenden hohen Kraftstoffkosten. E-Fuels können als sogenannte Drop-In-Kraftstoffe Dieselkraftstoff direkt ersetzen, ohne dass die vorhandene Kraftstofflogistik und Motor-technologie speziell angepasst werden muss. E-Fuels werden für viele Verkehrsträger, insbesondere für Flugzeuge, wo es kaum andere Alternativen gibt, als attraktive klimafreundliche Kraftstoffoption für die Zukunft angesehen, so dass Konkurrenzen um die Verteilung unausweichlich sein werden. Bislang werden E-Fuels noch nicht in größerem Maße produziert.

### Weichen stellen und Fahrt aufnehmen

Im Rahmen der Bayerischen Klimaschutzoffensive wurde begonnen, die rund 400 Land- und Forstmaschinen der Staatsbetriebe der bayerischen Landwirtschafts- und Forstverwaltung sowie der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betriebe der Justizvollzugsanstalten auf die Verwendung von regenerativen Energieträgern umzustellen [5].

### Infobox: Weitere Informationen

Die KTBL-Schrift 519 „Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen“ (2020) bietet einen Überblick über den Stand der Technik sowie aktuelle Rahmenbedingungen und hilft bei der Entscheidung, welche Antriebssysteme für Landmaschinen sinnvoll zum Einsatz kommen könnten [4].

Auch andere Betriebe suchen verstärkt nach Möglichkeiten, Treibhausgase einzusparen. Die Erfahrungen mit Pflanzenöl-kraftstoff, Biodiesel, Biomethan und HVO sind überwiegend positiv in Bezug auf Praxistauglichkeit, Motor-Performance und Einhaltung aktueller Abgasnormen (siehe Bild 1 und Bild 2). Daneben sind für Anwendungen mit geringem Leistungsbedarf heute bereits auch batterieelektrisch angetriebene Maschinen eine praxistaugliche Option.

Kraftstoffe wie Pflanzenöl, Biodiesel und Biomethan können eine nachhaltige und schnell umsetzbare Lösung für mehr Klimaschutz sein. Sie werden überwiegend regional erzeugt, sodass die Landwirtschaft und der ländliche Raum selbst davon profitieren. Die regionale Produktion stärkt gleichzeitig die Robustheit der inländischen Nahrungsmittelherstellung, da sie die Abhängigkeit von Dieselimporten mindert. Bei der Gewinnung von Kraftstoffen aus heimischen Ölsaaten entstehen zudem wertvolle heimische, gentechnisch nicht veränderte Eiweißfuttermittel.

Aufgrund der im Januar 2021 eingeführten und weiter ansteigenden  $\text{CO}_2$ -Bepreisung ist mit einem Anstieg des Agrardieselpreises und einer damit einhergehenden verbesserten Konkurrenzfähigkeit alternativer klimafreundlicher Kraftstoffe in der Landwirtschaft zu rechnen. Der Umstieg auf klimafreundliche Energieträger für Landmaschinen wurde eingeläutet. Es mangelt aber noch an Investitionssicherheit für Landmaschinenindustrie und Landwirte. Wichtig ist es daher, nun die richtigen Weichen auf europäischer und nationaler Ebene zu stellen, damit die Umstellung Fahrt aufnimmt und Landwirtschaft, Umwelt und die regionale Wirtschaft gleichermaßen davon profitieren.

Literatur bei den Autoren.

**DR. KLAUS THUNEKE**

**DR. EDGAR REMMELE**

TECHNOLOGIE- UND FÖRDERZENTRUM

IM KOMPETENZZENTRUM FÜR

NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

klaus.thuneke@tfz.bayern.de

edgar.remmele@tfz.bayern.de

