



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Landtechnik und erneuerbare Energien

Erstgutachter: Prof. Dr. habil Sandra Rose

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Heralt Schöne

**Studienarbeit zur Erlangung des akademischen Grades**

**„Bachelor of Science (B.Sc.)“**

**„Alternative Energiequellen für die mobile Landtechnik der Zukunft“**

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2023-0231-2

von

*Stefan Furmella*

Putzar

29.Mai.2023

---

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	III
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	IV
<b>1. Einleitung</b> .....	1
1.1 Problemstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	2
1.3 Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2. Stand des Wissens</b> .....	3
2.1 Entwicklung der Landtechnik/Agrarstrukturen in Deutschland .....	3
2.2 Alternative Energiequellen .....	4
2.2.1 Wasserstoff .....	5
2.2.2 Methan .....	7
2.2.3 Elektroantrieb .....	9
2.2.4 Biomasse to Liquid (BtL) .....	10
<b>3. Aktuelle Marktsituation und Innovationen von Landtechnikherstellern mit alternativen Antrieben</b> .....	12
3.1 New Holland .....	12
3.2 John Deere .....	13
3.3 Fendt/AGCO .....	14
3.4 JCB .....	15
<b>4. Material und Methode</b> .....	16
<b>5. Vergleiche nach verschiedenen Kriterien</b> .....	17
5.1 Rohstoffbeschaffung .....	17
5.2 Kosten .....	20
5.3 Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion .....	22
5.4 Praxistauglichkeit .....	24
<b>6. Diskussion</b> .....	27
<b>7. Fazit</b> .....	30
<b>8. Zusammenfassung</b> .....	32
<b>9. Literaturverzeichnis</b> .....	33
<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	37

---

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Landwirtschaftliche Betriebe und Ihre Flächen .....	4
Abbildung 2: Verfahren zur Wasserstoffaufbereitung .....	6
Abbildung 3: Methan Kalkulator für einen New Holland T6.180* .....	13
Abbildung 4: Anzahl Biogasanlagen und deren Biomethan Einspeisung.....	18
Abbildung 5: Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland.....	23

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Energieertrag verschiedener Kraftstoffe.....	17
Tabelle 2: Preisäquivalent für verschiedene Kraftstoffe .....	20
Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen Hoflader .....	21
Tabelle 4: Notenvergabe alternative Antriebsstoffe .....	27

---

**Abkürzungsverzeichnis**

BtL	Biomasse to Liquid
ct	Cent
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CNG	Erdgas (Compressed Natural Gas)
dt/ha	Dezitonnen je Hektar
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EU	Europäische Union
GWh	Gigawattstunde
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LPG	Autogas/Flüssiggas (Liquefied Petroleum Gas)
LNG	Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas)
MJ	Megajoule
NEF	Niedrigenergiefahrzeug
PV-Anlagen	Photovoltaik-Anlagen
SCR	Selektive katalytische Reduktion
TWh	Terawattstunde
Wh	Wattstunde

---

## 1.Einleitung

### 1.1 Problemstellung

Der „Ukrainekrieg“ hat die deutschen Diesel- und Benzinpreise enorm in die Höhe getrieben. Um dieser Entwicklung zu entkommen, muss umgedacht und nach Alternativen geschaut werden. Das Jahr 2023 hat mit niedrigen Ölpreisen, von unter 80 Dollar je Barrel, begonnen. Noch im Sommer lag der Ölpreis zwischen 100-130 Dollar je Barrel (vgl. Siedenbiedel, 2023)

Seit dem 5.12.2022 gilt das Öl-Embargo der Europäischen Union (EU) gegen russisches Öl, was auf dem Seeweg eingeführt wird. Auch wurde ein sogenannter Preisdeckel der G7-Staaten eingeführt. Das bedeutet, Fahren mit russischem Öl in Drittstaaten sind verboten, wenn der Preis für die Ladung höher als der Deckel ist. Anders gesagt, wird die Preisgrenze eingehalten, können westliche Reedereien mit ihren Schiffen weiter russisches Öl nach Indien, China oder in andere Länder bringen (vgl. Münchener Merkur, 2022). Das Ziel ist es, dass die Preisobergrenze eine Entspannung auf den Energiemärkten bringt. Es wurde vermutet, dass dadurch eine Knappheit des Rohöls auf den Weltmärkten entstehen könnte, was aber momentan nicht der Fall ist.

Seit dem 05.02.2023 gibt es nun auch ein EU-Einfuhrverbot, welches die Einfuhr von russischen Ölprodukten untersagt. Dazu gehört unter anderem auch der Diesel. Dann wird wohl mit einem erneuten Anstieg des Dieselpreises in Deutschland zu rechnen sein. 2020 lag der durchschnittliche Preis für Dieselmotorkraftstoffe bei 112,4Cent (ct) je Liter, 2021 bei 139,9 und 2022 bei 197,3ct je Liter Dieselmotorkraftstoff (vgl. Statista Research Department, 2023).

Diese hohen Kraftstoffkosten wirken sich sehr auf die Landwirtschaft aus. Gerade in Deutschland sind die Betriebe häufig sehr groß und müssen mit großen Maschinen bewirtschaftet werden. Häufig sind die Äcker nicht immer nah am Betriebshof oder auch der Handel ist oft weit entfernt. Dadurch müssen des öfteren große Entfernungen zurückgelegt werden mit den großen Maschinen. Dies treibt die Energie- und Kraftstoffkosten in die Höhe. Der Landwirt<sup>1</sup> ist bestrebt, möglichst kostengünstig zu produzieren, um zu überleben in der heutigen Landwirtschaft. Doch bei immer steigenden Kosten, aber gleichbleibenden Erlösen, brauchen wir Alternativen. Aber welche Alternativen hat der Landwirt, um kostengünstig

---

<sup>1</sup> In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die ausschließliche Verwendung der männlichen Form geschlechtsunabhängig verstanden werden soll. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist

---

tiger und mit mehr Sicherheit zu produzieren? Niemand weiß, wie lange wir Dieselmotoren überhaupt noch in der Landwirtschaft nutzen dürfen. Deswegen müssen alternative Kraftstoffe gefördert und weiterentwickelt werden. Aber welche alternativen Kraftstoffe haben überhaupt eine Chance in der modernen Landwirtschaft?

## **1.2 Zielsetzung**

Stellen Sie sich eine Welt vor, in der Sie sich keine Sorgen über schwankende Energiepreise und deren negativen Auswirkungen auf die Betriebseinnahmen machen müssen. Von der Reduzierung der Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) Emissionen sowie hohen Kraftstoffpreisen hören wir fast täglich in allen Medien. Ziel dieser Arbeit soll sein, alternative Antriebe zu finden, die der Landwirtschaft in Deutschland gerecht werden können und in landwirtschaftlichen Maschinen zum Einsatz kommen können, ohne Einbußen zu machen.

Am Ende der Arbeit sollte sich herauskristallisiert haben, welche alternative Antriebsart am meisten Potenzial hat, sich in landwirtschaftlichen Maschinen zu behaupten und somit zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung und Kosteneinsparung durch hohe Kraftstoffpreise der Landwirte beiträgt.

## **1.3 Aufbau der Arbeit**

Als erstes wird betrachtet, wie der Stand der Landwirtschaft heute ist und wie er sich in den letzten Jahren verändert hat. Danach wird darauf eingegangen, welche alternativen Antriebe in Betracht gezogen werden können. Es folgt ein Ausblick auf einige Landtechnikhersteller die alternative Antriebe schon marktreif produzieren können oder woran gerade noch gearbeitet wird, um diese Maschinen praxistauglich zu bekommen. Des Weiteren werden die Rohstoffbeschaffung, die Kosten, die Praxistauglichkeit und die Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion etwas näher beleuchtet.

---

## **2.Stand des Wissens**

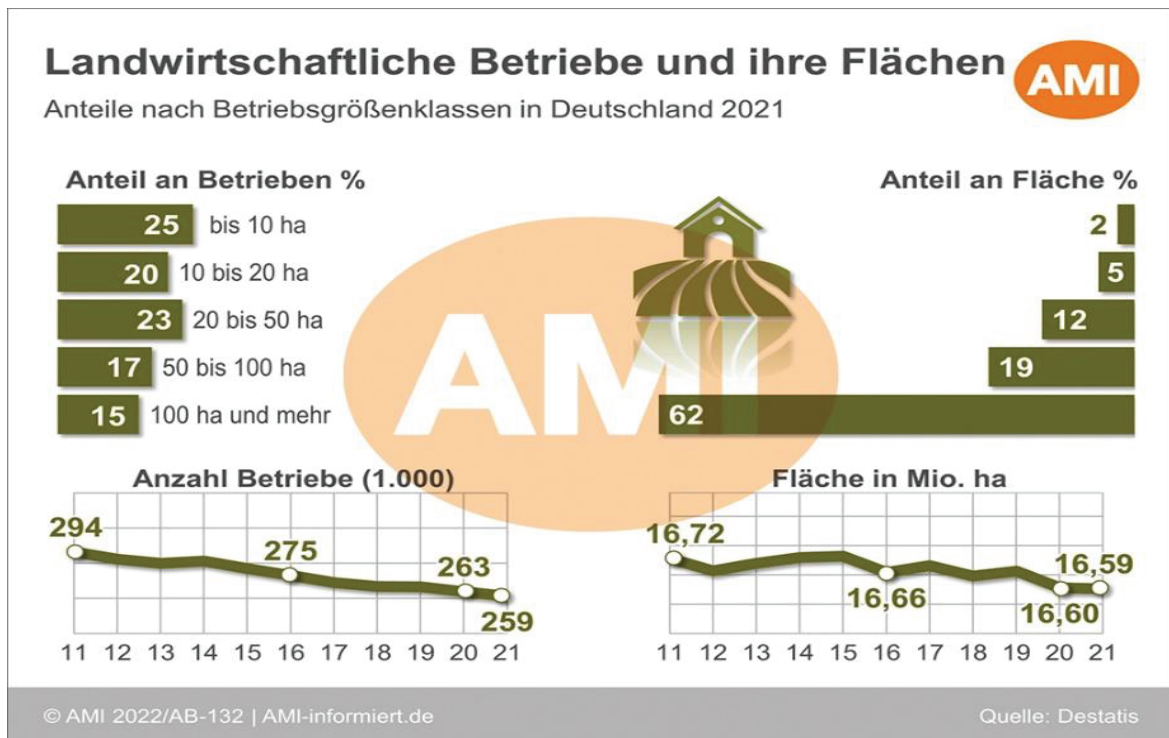
### **2.1 Entwicklung der Landtechnik/Agrarstrukturen in Deutschland**

Die Mechanisierung der Landwirtschaft ist ein Entwicklungsprozess. Wo damals mit Drehmaschinen und Pferden gearbeitet wurde, werden heute hochmoderne, satellitengestützte und zum Teil schon autonom fahrende Maschinen eingesetzt. Die Landtechnik ist geprägt durch eine rasante Entwicklung neuer Technik und neuer Innovationen. Die moderne Technik macht die Arbeit nicht nur leichter, sondern auch produktiver. Körperlich schwere Arbeiten sind heute nur noch selten gefordert.

Die immer weiter sinkende Erwerbstätigkeit in der Landwirtschaft fordert Maßnahmen. So waren Anfang der 50er Jahre noch 24 Prozent und im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts nur noch etwa 2 Prozent in der Landwirtschaft tätig. Im Jahr 2021 lag der landwirtschaftliche Erwerbstätigenanteil nur noch bei 1,2 Prozent (vgl. Pascher et al., 2022). Im Zeitraum von 1991 bis 2019 sank die Zahl der Erwerbstätigen in der Landwirtschaft in Deutschland von 1.076.000 auf 555.000 (vgl. Ahrens, 2022). Dies hat zur Folge, dass ein Landwirt immer mehr Menschen ernähren muss. So erzeugte ein Landwirt im Jahr 1900 Nahrungsmittel in einem Umfang, um etwa 4 Personen ernähren zu können, 1950 ernährt ein Landwirt 10 und 2021 bereits 139 Personen (vgl. Pascher et al., 2022). In Abbildung 1 ist erkennbar, dass die Zahl der landwirtschaftlichen Betriebe zwischen 2010 und 2022 um 40.400 auf 258.700 Betriebe abnahm (vgl. Pascher et al., 2022).

Es führte nicht nur die schnelle Arbeitserledigung zur Erzeugungssteigerung, sondern auch die modernen Ställe, die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln und Mineraldünger sowie Zuchtfortschritte bei Pflanzen und Tieren. So lag der Roggenertrag 1950 bei 27,4 Dezitonnen je Hektar (dt/ha) und 2022 schon bei 53,6dt/ha (vgl. Pascher et al., 2022).

Betriebskosten und Umweltbelastungen werden durch die technische Weiterentwicklung und durch den gezielten und flächenspezifischen Einsatz von Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Saatgut enorm vermindert (vgl. Pascher et al., 2022). Auch können durch technischen Fortschritt immer bessere Standards bei der Lebensmittelproduktion erreicht und eingehalten werden.



**Abbildung 1: Landwirtschaftliche Betriebe und Ihre Flächen**

Quelle: <https://www.situationsbericht.de/3/33-betriebe-und-betriebsgroe%C3%9Fen>

## 2.2 Alternative Energiequellen

Zu den alternativen Energiequellen zählt man Wasserstoff, Methan, BtL-Kraftstoffe, Strom, Biodiesel oder auch Ethanol. Im Folgenden werden die Stoffe Methan, Wasserstoff, BtL-Kraftstoffe und Strom im Hinblick auf Antriebsmöglichkeiten in landwirtschaftlichen Maschinen genauer erläutert. Biodiesel wird im Folgenden nicht weiter bearbeitet, da die Antriebsmöglichkeiten mit Biodiesel schon auf dem Markt gegeben sind und nicht weiter erläutert werden müssen. Jedoch kann man sagen, dass Biodiesel einen großen Anteil am Kraftstoffmarkt hat und sich somit auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt.

In der Regel müssen für alle diese Kraftstoffe besondere Anforderungen an den Motor gestellt werden. Das bedeutet, entweder muss ein neuer Motor konstruiert werden oder es müssen Umrüstungen stattfinden. Dieser Schritt bedarf einer langen Entwicklungsphase. Den Dieselmotor zu nutzen, wird in Zukunft immer schwieriger werden, denn Diesel ist nur in begrenzter Menge vorhanden. Auch die Dieselpreise kommen erschwerend hinzu. In Deutschland lag der Kraftstoffverbrauch 2022 bei 52,2 Mio. Tonnen. Davon waren 62,3% Dieseldieselkraftstoff, 31,1% Ottokraftstoff, 0,4% Flüssiggas, 0,3% Erdgas und 5,9% Biokraft-



stoffanteil, wovon 0,2% Methan und 4,3% Biodiesel waren (vgl. FNR 2023). Eine Umstellung von heute auf morgen ist sicher nicht möglich. Jedoch wird deutlich, dass Alternativen benötigt werden.

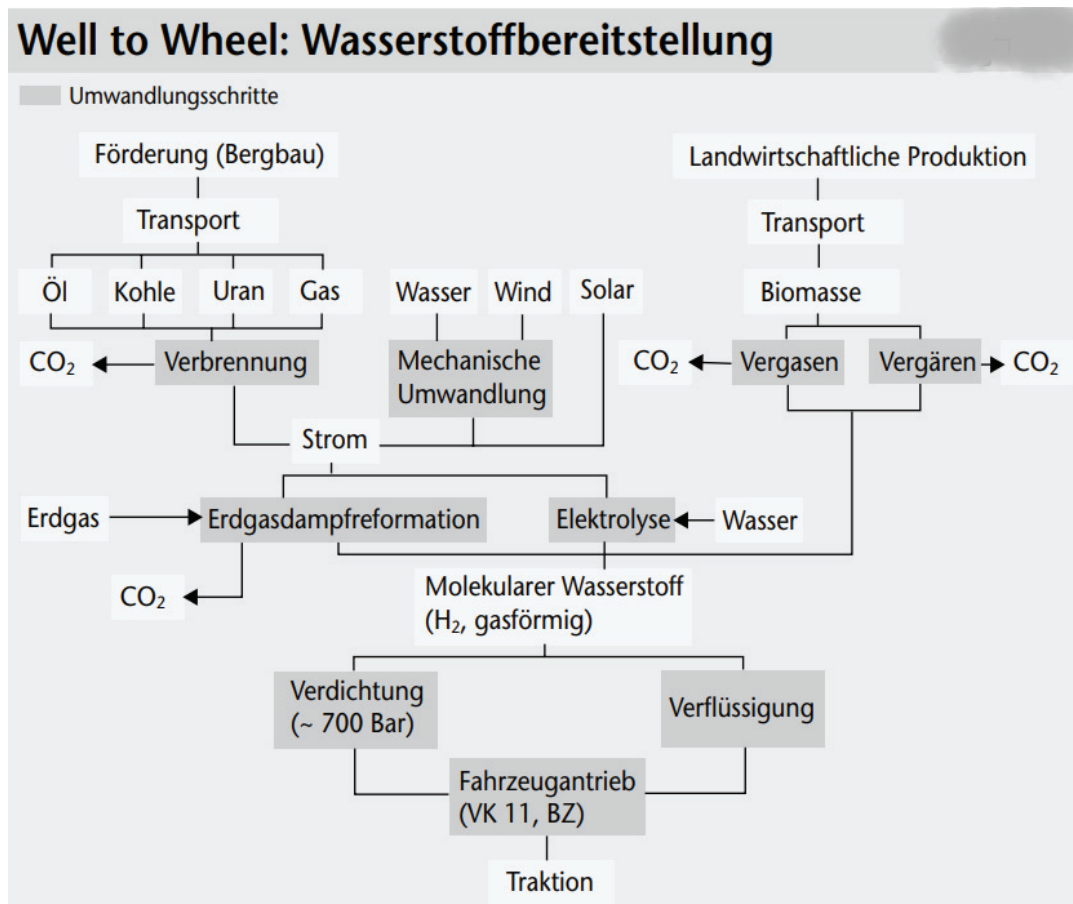
### 2.2.1 Wasserstoff

Der als Visionär bekannte Schriftsteller Jules Verne sah bereits im 19. Jahrhundert in Wasserstoff die „Kohle der Zukunft“, wie es in seinem 1874 erschienenem Buch „Die geheimnisvolle Insel“ zu lesen ist. Ein Großteil des Wasserstoffs auf der Erde ist in Wasser gebunden. Wasserstoff kommt auch gebunden an andere Elemente wie in Holz, Kohle, Erdgas oder Öl vor. Deswegen kann es niemals knapp werden oder sogar ausgehen (vgl. Puls, 2006, S.70). Es ist ein gasförmiges Element und kommt normalerweise nicht als atomarer Wasserstoff (H), sondern als molekularer Wasserstoff (H<sub>2</sub>) vor (vgl. Puls, 2006, S. 70 f.). Es ist ein farb- und geruchloses Gas. Es brennt mit reinem Sauerstoff oder Luft. Jedoch wird Wasserstoff nicht als gesundheitsschädlich oder umweltgefährdend eingestuft. Wie in der Abbildung 2 zu sehen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, Wasserstoff herzustellen. Das wohl bekannteste Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff ist die Elektrolyse. Hier werden jeweils zwei Wassermoleküle durch Zufuhr von elektrischem Strom in ein Sauerstoffmolekül und zwei Wasserstoffmoleküle zerlegt (vgl. Puls, 2006, S.72). Dieses Verfahren ist sehr stromintensiv. Wasserstoff als Energieträger verursacht kein Kohlendioxid, wenn er mit erneuerbaren Energien wie Wind- oder Solarenergie gewonnen wird. Dieser Wasserstoff wird als „grüner Wasserstoff“ bezeichnet. 2019 erfolgte die Wasserstoffherstellung fast ausschließlich aus fossiler Primärenergie wie Erdöl oder Erdgas durch die sogenannte Erdgasdampfreformation (EDR) (Puls, 2006, S.72). Dieser Wasserstoff wird als „grauer Wasserstoff“ bezeichnet.

Wasserstoff kann wegen der kleinen Molekülgröße durch viele Stoffe hindurch diffundieren, wie zum Beispiel durch Kunststoffe (vgl. EMCEL, 2022). Dadurch müssen an Wasserstofftanks besondere Ansprüche gestellt werden. Fahrzeuge mit Drucktanks können problemlos in Garagen oder Hallen stehen.

In einer Brennstoffzelle wird Wasserstoff verbrannt, wo dann daraus elektrische Energie entsteht. In einigen Motoren wird durch eine Brennstoffzelle Energie für den Elektromotor gewonnen. Jedoch kann in Brennstoffzellen nur molekularer Wasserstoff verwendet werden (vgl. Puls, 2006, S.71). Molekularer Wasserstoff ist im Vergleich zu fossilen Brennstoffen eher ein Sekundärenergieträger. Das bedeutet, dass Primärenergieträger durch unterschiedliche Prozesse in Sekundärenergieträger umgewandelt werden. Somit ähnelt der molekulare

Wasserstoff eher einer Batterie, denn hier wird die Energie sozusagen auch gespeichert (vgl. Puls, 2006, S.71).



**Abbildung 2: Verfahren zur Wasserstoffaufbereitung**

Quelle: T. Puls-Alternative Antriebe und Kraftstoffe, Deutscher Instituts-Verlag GmbH (2006), S.71

Ein großes Problem beim Wasserstoff stellt der Transport und die Speicherung dar. Gasförmiger Wasserstoff hat eine Dichte von  $0,0899\text{kg/m}^3$  bei 273 Kelvin und seine Energiedichte liegt bei  $37\text{kWh/kg}$  (vgl. Lehman et al., 2014, S.77). Um gegenüber fossilen Brennstoffen konkurrenzfähig zu bleiben, in Blick auf die Reichweite, müsste der Wasserstoff auf mindestens 700bar verdichtet werden. Der Energieaufwand dafür beträgt ca. 12%. Flüssiger Wasserstoff müsste bei  $-252,77^\circ\text{C}$  gekühlt werden, aber er enthält auch nur einen Bruchteil der Energiemenge von zum Beispiel Benzin und sogar eine kleinere Energiedichte, wie gasförmiger Wasserstoff (vgl. Lehman et al., 2014, S.77). Des Weiteren stellt die Kühlung auf  $-252,77^\circ\text{C}$  insbesondere in der Landwirtschaft eine riesige Herausforderung dar, und ist somit nur schwer umsetzbar.

Die Bereitstellungskosten für Wasserstoff, sind nicht gleich die Tankstellenpreise, denn sie enthalten noch keine staatlich bestimmten Abgaben wie zum Beispiel Steuern, sowie Margen der Unternehmen. Wasserstoff muss zum Transport „aufbereitet“ werden wie auch Erdgas. Dabei wird es verflüssigt oder stark komprimiert (vgl. Lehman et al., 2014, S.88 ff.). Es lässt sich sagen, wenn man sich den reinen Fahrbetrieb anschaut, dass Wasserstoffmotoren oder auch Brennstoffzellen völlig emissionsfrei betrieben werden können. Jedoch muss man bedenken, ob es grüner, wirklich emissionsarmer Wasserstoff, oder grauer Wasserstoff ist, der bei der Herstellung relativ viele Emissionen abgibt.

### 2.2.2 Methan

Methan ist der einfachste Vertreter der Stoffgruppe der Alkane. Es ist ein brennbares, farb- und geruchloses Gas (vgl. Basshuysen, 2015, S.53/58). Erdgas ist weder giftig noch krebs-erregend. Es bildet mit Luft, in der richtigen Konzentration, ein explosives Gasgemisch. Außerdem verbrennt es mit ausreichend Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die Schmelztemperatur von Methan liegt bei  $-184^{\circ}\text{C}$  und die Siedetemperatur bei  $-162^{\circ}\text{C}$  (vgl. Basshuysen, 2015, S.59). Der Heizwert liegt bei  $35.89\text{MJ}/\text{m}^3$  ( $50,013\text{MJ}/\text{kg}^{-1}$ ). Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas (vgl. Basshuysen, 2015, S.51). Außerdem ist es ein Ausgangsstoff für die technische Synthese bei der Methanolherstellung.

Im 19. Jahrhundert trat Methan bei der Gewinnung von Erdöl unerwünscht auf, da man keine Speichermöglichkeiten und auch keine Transportmöglichkeiten hatte. Meist wurde es in einer Gasfackel verbrannt, aber manchmal wurde es auch durch Abkühlung verflüssigt zu so genanntem „Liquefied Natural Gas“ (LNG) oder auf Deutsch „Flüssigerdgas“.

Des Weiteren kann Methan durch Biogasanlagen gewonnen werden. Biogas entsteht bei der anaeroben Vergärung durch Mikroorganismen (vgl. Schmitz et al., 2006, S.56). Biogas gehört zu den erneuerbaren Energiequellen und kann aus Gülle, Mist, Abfällen aus der Lebensmittelindustrie oder aus nachwachsenden Rohstoffen wie Mais- oder Grassilage gewonnen werden (vgl. Raggman et al., 2008, S.50). Möchte man das Biogas als Kraftstoff nutzen, muss es zu Biomethan aufbereitet werden. Diese Aufbereitung ist verbunden mit einem hohen technischen und energetischen Aufwand. Biomethan ist de facto identisch mit Erdgas (CNG/Compressed Natural Gas) und wird in Deutschland fast ausschließlich ins Erdgasnetz eingespeist. Durch diese Einspeisung haben wir eine sehr gute, vorhandene Infrastruktur für das Biomethan durch unterirdische Leitungen und Speicher. In Deutschland gibt es über 9600 Biogasanlagen und mehr als 200 davon stellen Biomethan her (BMEL 2022). Im Land werden circa 400 Gigawattstunden (GWh) Biomethan als Kraftstoff verbraucht (vgl. FNR, o. D.). Jedoch gibt es keine Förderungen für Biogasaufbereitung und Tankstellenbau. Es gibt

nur eine Förderung für den Kauf eines Methangastraktor. Dabei werden 40% der Mehrkosten des Biomethantraktors, gegenüber einem Dieseltraktor gefördert (vgl. Klaus Senghass, 2022).

Biogas muss aufbereitet werden, weil sich die Motorengröße enorm unterscheidet. Ein 120kW Dieselmotor ist nur halb so groß wie ein Biogasmotor mit derselben Leistung zusätzlich benötigt der Biogasmotor braucht zu lange, um auf Drehzahl zu kommen. (Klaus Senghass, 2022). Das lässt sich zum Beispiel in einem 600PS Mährescher nur schwer umsetzen. Es gibt verschiedene Verfahren, die angewendet werden können, um Biogas aufzuarbeiten. Das wäre die Druckwechseladsorption, die Druckwasserwäsche, die chemische Wäsche und das Membrantrennverfahren (vgl. Basshuysen, 2015, S.114)

Die Gewinnung aus Methanhydrat ist äußerst problematisch da beim Abbau viel Methan in die Erdatmosphäre gelangen würde und somit zum Vorantreiben der Erderwärmung führen würde (Puls, 2006, S.30).

Als gasförmiger Energieträger ist Methan nur schwer zu lagern und zu transportieren. In Tanks bei Fahrzeugen ist das Gas auf 200 bar verdichtet. Durch die niedrige Energiedichte von  $0,66\text{kg/m}^3$  kann hier nur eine geringe Reichweite erreicht werden (vgl. Basshuysen, 2015, S.53). LNG hat den Vorteil, dass es weniger Volumen benötigt als CNG. Ein Traktor mit 100l Dieseltank braucht circa 450l CNG, beziehungsweise 140l LNG (vgl. Klaus Senghass, 2022). Sicherheitsventile an den Tanks bewirken im Schadensfall ein gezieltes Ablassen oder bei Hitzeeinwirkung, zum Beispiel bei einem Brand, ein kontrolliertes Abbrennen der Gasfüllung, sodass es nicht zu einer Explosion kommen kann.

Für Methanzapfsäulen gelten entsprechende Anforderungen.

Stickoxide und reaktive Kohlenwasserstoffe werden bei der Verbrennung um bis zu 80% reduziert. Biomethan trägt zum Klimaschutz bei, da ein Großteil des in der Verbrennung freiwerdenden CO<sub>2</sub> vorher durch die Grünpflanze in der Entstehungskette des Biogases gebunden wurde (vgl. FNR, o. D). Das Biomethan muss der Norm DIN 5162 entsprechen. Somit kann problemlos Biomethan und Erdgas gemischt werden und es hat dann eine einheitliche Qualität. In Deutschland gibt es circa 800 CNG-Tankstellen (vgl. FNR, o. D). Im Jahr 2021 kam das Methan in Tankstellen zu 80% aus Biogasanlagen (vgl. gibgas o. D.). Erdgasautos können kein Autogas (LPG) tanken. LPG steht für „Liquefied Petroleum Gas“ und ist ein unter Druck verflüssigtes Gemisch aus Propan und Butan (vgl. Basshuysen, 2015, S.68). Als alternativer Kraftstoff ist Erdgas (CNG) wegen der Vorteile beim CO<sub>2</sub> -Ausstoß bis Ende 2026 steuerbegünstigt. Ab Januar 2024 soll jedoch ein stufenweiser Abbau der Steuervorteile beginnen (vgl. Deutscher Bundestag, 2021).

### 2.2.3 Elektroantrieb

Wenn man „alternative Antriebe“ hört, denkt man vermutlich zuerst an den Elektromotor. Es ist auch völlig normal, denn der Elektromotor ist der häufigste alternative Antrieb in der Automobilindustrie.

Ein Elektromotor ist eine elektrische Maschine, die elektrische Leistung in mechanische Leistung umwandelt. Diese Motoren decken einen breiten Drehzahl- und Drehmomentbereich ab. Außerdem haben sie einen hohen Wirkungsgrad. Das bedeutet, das Verhältnis von zugeführter Energie, zur Energie, die für den Vortrieb zur Verfügung steht, ist sehr groß. Der Wirkungsgrad liegt bei bis zu 95%. Benzin hingegen liegt bei 33% und Diesel bei 45% (vgl. Oswald, 2010). Ein Elektromotor hat schon im Stillstand ein sehr hohes Drehmoment und ist dazu auch noch extrem leise gegenüber herkömmlichen Motoren. Sie erzeugen lokal keine Emissionen und sind somit umweltfreundlicher als Verbrenner (vgl. Raggman et al., 2008, S.89). Jedoch muss man dabei beachten, dass bei der Produktion von Strom Schadstoffe entstehen können (vgl. Puls, 2006, S.68). Die beste Ökobilanz hat Strom, der zu 100% aus der regenerativen Erzeugung kommt.

Um einen Elektromotor zu betreiben, braucht man eine Stromquelle. Diese besteht in der Regel aus einer Batterie. Die am häufigsten verwendete Batterie ist der Lithium-Ionen-Akkumulator, denn er hat eine hohe Energiedichte pro Gewichtseinheit (vgl. Raggman et al., 2008, S.88). Dieser Akkumulator erzeugt eine Quellspannung durch die Verschiebung von Lithium-Ionen. Beim Laden oder Entladen wandern einzelne Lithium-Ionen zwischen den Elektroden hin und her und werden in den Aktivmaterialien eingelagert. So wird zum Beispiel beim Entladen, also bei der Auslagerung von Lithium aus der negativen Elektrode, Elektronen abgegeben (vgl. Korthauer, 2013, S.14). Der chinesische Batterie-Spezialist CATL arbeitet an einer Natriumbatterie (vgl. Stegmaier, 2022). Ein Vorteil an dieser modernen Batterietechnik liegt in der Verfügbarkeit des Stoffes Natrium. Des Weiteren ist Natrium umweltfreundlicher und günstiger als Lithium. Die Kosten gegenüber einer Lithiumbatterie sollen 30-40% geringer ausfallen als bei herkömmlichen Batterien (vgl. Stegmaier, 2022). Es gibt auch Nachteile bei der neuen Batterietechnik, denn die Natrium-Ionen-Batterie hat eine kleinere Energiedichte als eine Lithium-Ionen-Batterie. Das bedeutet, dass sie mehr Platz benötigen (vgl. Stegmaier, 2022). Die Batterien spielen eine entscheidende Rolle bei den Elektromotoren. Ohne diese müssten Elektromotoren, immer an einer externen Energiequelle angeschlossen sein.

Die Infrastruktur für Elektromotoren ist noch ausbaufähig. Strom ist zwar günstiger als Benzin oder Diesel, jedoch gibt es zu wenig Ladesäulen, um die Batterien zu laden. Tankstellen, die Diesel oder Benzin anbieten, findet man überall. Sucht man jedoch eine Ladesäule, muss

man häufig genauer suchen. Des Weiteren ist die Batterietechnik noch nicht vollständig ausgereift. Um eine große Reichweite zu generieren, braucht man sehr große und schwere Batterien. Da ein Elektromotor einen Wirkungsgrad von 80-90% hat und nicht 30-40% wie ein Verbrenner, braucht man nur ca. ein Drittel der Energie, die man sonst im Dieseltank hat. Mit einer großen Batterie sind aber auch enorme Anschaffungskosten verbunden. Auch die Lebenszeit einer solchen Batterie ist deutlich unter der eines Fahrzeuges. Das bedeutet, die Batterie muss erneuert bzw. ausgetauscht werden.

Die Akkumulatoren heutzutage haben noch eine sehr geringe Energiedichte. Dadurch sind sie sehr groß und schwer und somit sehr teuer in der Herstellung. Eine Lithium-Ionen-Batterie hat eine Energiedichte von 180Wh/kg (Wattstunde je Kilogramm), Diesel hingegen hat eine Energiedichte von 11,74 Wh/kg (vgl. Raggman et al., 2008, S.86 f.). Um 1 Liter Diesel zu ersetzen, bräuchte man eine circa 65kg schwere Lithium-Ionen-Batterie.

Auch muss man beachten, dass im Winter die Abwärme des Motors nicht ausreicht, um das Fahrzeug zu heizen und der Elektromotor muss mit deutlich niedrigeren Temperaturen gekühlt werden als Verbrenner. Dies zieht einen hohen Energieverbrauch mit sich und somit eine geringere Reichweite. Man sagt, dass man jedoch nur 2/3 der Wartungs- und Instandhaltungskosten gegenüber Verbrennern hat (Öl, Bremsen, Filterelemente) (vgl. C.A.R.M.E.N, 2022).

#### **2.2.4 Biomasse to Liquid (BtL)**

Biomasse to Liquid bezeichnet die Biomasseverflüssigung. Es sind synthetische Kraftstoffe aus Biomasse. Biomasse to Liquid meint eine Prozesskette, die Biomasse über die thermochemische Vergasung in Synthesegas und dessen anschließende Synthese in flüssige Kohlenwasserstoffe umwandelt. Die so erzeugten biogenen Kohlenwasserstoffe können mit bekannten Prozessen der Erdölraffination zu marktfähigen Kraftstoffen wie Diesel nach EN590 oder Benzin nach EN223 aufgearbeitet werden (vgl. FNR, o. D). BtL-Kraftstoffe sind zum heutigen Zeitpunkt, noch nicht auf dem deutschen Markt, käuflich zu erwerben. Das Potenzial soll sein, 20-25% des deutschen Kraftstoffbedarfs zu decken, weltweit sogar noch mehr (vgl. Raggman et al., 2008, S.63). In der Regel kann jede pflanzliche Biomasse genutzt werden, um BtL herzustellen, jedoch eignen sich am besten zellulosereiche, trockene Restbiomasse wie Stroh, Restholz, Bioabfälle oder Energiepflanzen wie zum Beispiel Miscanthus (vgl. FNR, o. D). Bei BtL werden nicht wie bei herkömmlichen Biokraftstoffen nur Teile der Pflanze verwendet, sondern die gesamte Pflanze.



Bei der Herstellung von BtL-Kraftstoffen können verschiedene Verfahren angewendet werden. Prinzipiell ist es jedoch der folgende Ablauf: Zuerst werden die Rohstoffe in Synthesegas umgewandelt, dies geschieht in einem Reaktor (vgl. FNR, o. D). Dort wird die feste Biomasse durch Wärme, Druck und ein Vergasungsmittel (zum Beispiel Sauerstoff) in einen gasförmigen Zustand überführt (vgl. FNR, o. D). Dieser Prozess wird auch thermochemische Vergasung genannt. Das Gas besteht nun aus Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Schwefel und Stickstoffverbindungen (vgl. FNR, o. D). Anschließend muss das Gas gereinigt werden. Die Schadkomponenten, Schwefel und Stickstoffverbindungen werden entfernt (vgl. FNR, o. D). Des Weiteren wird der Wasserstoffanteil im Gas durch CO-Shift erhöht und Kohlendioxid abgetrennt (vgl. FNR, o. D). Nun kann die Synthese beginnen. Das Gasmisch wird zu flüssigen Kohlenwasserstoffen verarbeitet, entweder durch die Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) oder durch das Methanol-to-Gasoline®-Verfahren (MtG) (vgl. FNR, o. D). Als letzter Schritt folgt die Aufbereitung. Hier findet die Selektion in Schwer-, Mittel- und Leichtfraktion statt. Diese werden dann gezielt veredelt und an die gewünschte Kraftstoffeigenschaft angepasst. Die Eigenschaften lassen sich gezielt beeinflussen und auf spezielle Anwendungen und Brennverfahren optimieren (vgl. FNR, o. D). Deswegen wird der Kraftstoff auch als Designerkraftstoff bezeichnet, denn man kann auf die Weiterentwicklung im Motorenbereich speziell reagieren. Man geht davon aus, dass bei der BtL-Produktion doppelt so viel Energie verbraucht wird, wie es bei der Raffination von fossilem Dieselmotorkraftstoff der Fall ist (vgl. Puls, 2006, S.64).

BtL-Kraftstoffe haben deutlich reduzierte Schadstoffemissionen, einen hohen Cetangehalt und sind schwefel- und aromafrei (vgl. FNR, o. D). Sie sind nachhaltig, denn Sie haben eine breite Rohstoffpalette und haben deshalb keine oder nur eine bedingte Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Die Eigenschaften und Messwerte können nur aus Pilotanlagen hervorgehen.

Theoretisch könnte jeder gewöhnliche Dieselmotor mit BtL-Kraftstoff betrieben werden. In Praxismessungen wurde ein geringerer Ausstoß von Rußpartikeln, Kohlenwasserstoff und Kohlenmonoxid gemessen (vgl. FNR, 2006, S.52). Jedoch wurde auch ein leichter Leistungsverlust gemessen. Weitere Vorteile sind die Schonung fossiler Ressourcen, keine notwendigen Umbaumaßnahmen an den Motoren und die weitere Nutzung vorhandener Infrastruktur. Da die Produktion mit wenig externer Energie vollzogen wird und es hohe Kraftstoffträge pro Hektar geben würde, könnte man vielleicht langfristig von einer Verringerung der Energieimporte ausgehen (vgl. FNR, 2006, S.52f).

---

### **3.Aktuelle Marktsituation und Innovationen von Landtechnikherstellern mit alternativen Antrieben**

#### **3.1 New Holland**

Als „CLEAN ENERGY LEADER“ bezeichnet New Holland ihre Strategie zum Thema Emissionsreduzierung und nachhaltiger Landwirtschaft in Sachen saubere Energie.

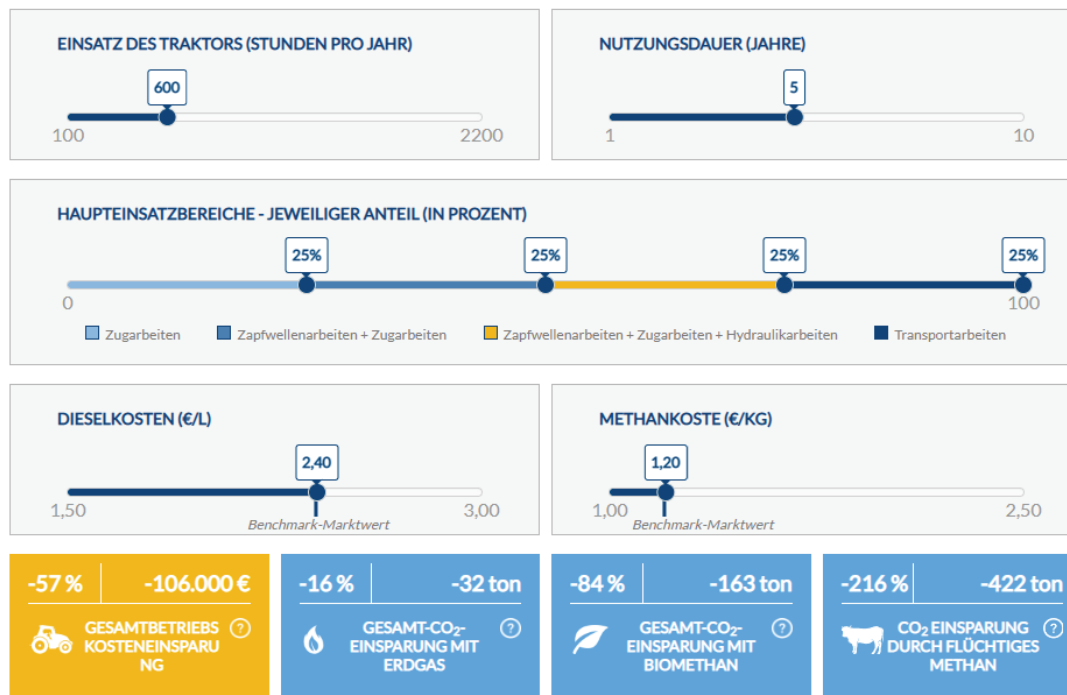
Schon seit 2009 arbeitet New Holland an einem wasserstoffangetriebenen Traktorkonzept. Zwei Prototypen wurden getestet. Die Maschine ist mit einem Wasserstofftank und einer Brennstoffzelle ausgestattet, die den Strom für den Betrieb der Elektromotoren liefert, der selbst den Traktor und all seine Geräte antreibt (NewHolland-Agriculture, o. D.). Der Traktor hat 75PS und einen stufenlosen Antrieb. Er hat keinen Motor, keinen Auspuff, keinen Dieseltank und kein Getriebe. Der Traktor fährt leise, ohne Schadstoffemissionen und kann die Antriebsleistung je nach Bedarf generieren und hat somit weniger Leistungsverluste, da keine Zahnräder verbaut sind. Jedoch kam es nie zur Marktreife dieses Prototyps (vgl. Klaus Senghass, 2022).

Stattdessen präsentierte New Holland 2013 die erste Generation des T6-Methangastraktors. Damit besitzt New Holland den ersten Traktor, der nicht mit fossilen Brennstoffen betrieben wird. 2021 wurde der T6.180 Methan Power serienmäßig vorgestellt und wird somit in Serie produziert. Dieser Traktor ist einfacher aufgebaut als ein Traktor mit Dieselmotor, denn er hat keine SCR-Anlagen (Selektive katalytische Reduktion) und keinen Partikelfilter. Der verbaute Motor, ist ein NEF-Motor (Niedrigenergiefahrzeug), welcher extra für diesen Traktor hergestellt wurde (vgl. Klaus Senghass, 2022). Die Maximalleistung beträgt 175PS und 740 Newtonmeter, das bedeutet der Schlepper hat gleiche Leistung, gleiches Drehmoment und eine gleiche Haltbarkeit wie ein Dieselmotor. Der Traktor hat eine wesentlich geringere Geräuschkulisse und weniger Vibrationen als ein Dieselmotor. Da die Verbrennungstemperatur beim Methangasschlepper größer ist als beim Dieseltraktor, wurden Schutzschilder am Abgasstrang, ein wassergekühlter Turbo und ein Zylinderkopf aus besserem Material als beim Dieselmotor verbaut. Der T6.180 Methan Power fährt ausschließlich mit CNG.

Er hat 7 fest installierte Kraftstofftanks mit insgesamt 185 Litern verbaut. Zusätzlich gibt es noch einen optionalen Fronttank mit 330 Litern. Das Tankvolumen von 515 Litern reicht bei Transportarbeiten, Düngearbeiten, Pflegearbeiten um die 8 Stunden (vgl. Klaus Senghass, 2022).

In der folgenden Abbildung 3 ist erkennbar, welche Betriebskosteneinsparungen und CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert werden können. Es wurden die Kosten für Kraftstoff, Wartung, Öl und sonstige Betriebsflüssigkeiten mit einbezogen.





**Abbildung 3: Methan Kalkulator für einen New Holland T6.180\***

Quelle: <https://agriculture.newholland.com/eu/de-de/maschinen/produkte/traktoren/t6-methane-power/methan-kalkulator>

\*Bei den Ergebnissen handelt es sich um eine Simulation gegenüber dem Stufe-V-Dieselmotor. Mehrpreis für Methangas-Traktor wurde nicht berücksichtigt.

### 3.2 John Deere

Auch John Deere arbeitet schon seit längerem an Prototypen. 2017 stellte John Deere auf der SIMA in Paris den SESAM vor (vgl. Göggerle, 2022). Dieser hatte zwei Elektromotoren, war stufenlos und leistete 130 Kilowatt (kW). SESAM steht für "Sustainable Energy Supply for Agriculture Machinery" (vgl. Göggerle, 2022). Zwei Jahre später arbeitete John Deere an einem anderen Projekt, was sich deutlich vom Vorgänger unterscheidet. Dieser Prototyp hatte keine Kabine und unter der Motorhaube befand sich keine Batterie, sondern eine Kabeltrommel. Das Projekt hatte jedoch nicht viele Erfolgchancen, so John Deere.

Ihr heutiger Prototyp und somit die Hoffnung für die Zukunft ist der SESAM2 (vgl. Göggerle, 2022). Es ist ein elektrobetriebener Schlepper mit 1000 Kilowattstunden (kWh) Batteriekapazität und einem 500 kW Antriebsstrang. Der 700PS Elektroantrieb soll für bis zu einen Tag reichen (vgl. Göggerle, 2022). Es wurden jedoch keine Angaben gemacht, ob ein 8 Stunden Tag gemeint ist. Der Schlepper fährt emissionsfrei, hat eine verminderte Geräuschkulisse, hat einen reduzierten Wartungsaufwand und arbeitet lokal CO<sub>2</sub>-neutral. Für

elektrisch angetriebene Geräte stehen 1360PS zur Verfügung. Eine Besonderheit beim SESAM2 ist die abnehmbare Kabine, somit soll ein manuelles aber auch ein autonomes Arbeiten möglich sein (vgl. Göggerle, 2022).

Dieser Prototyp ist noch nicht zu erwerben und es wurden auch noch keine Angaben von John Deere gemacht, wann man damit rechnen könne. Dieses Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Es wird begleitet von der Firma John Deere, der Technischen Universität Kaiserslautern, dem deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie der Firma B.A.U.M Consult GmbH (vgl. Göggerle, 2022).

### **3.3 Fendt/AGCO**

Auch Fendt arbeitet an Projekten, welche die CO<sub>2</sub>-Emissionen senken und die Landwirte unabhängiger von den Dieselpreisen machen sollen. Als erstes zu nennen wäre der vollelektrische Fendt e100. Er lässt sich mit der Schnellladefunktion in 40min bis zu 80% laden und eine komplette Ladedauer beträgt 5 Stunden (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Bis zu 5 Betriebsstunden soll der Akku bei realen Bedingungen ausreichen. Geladen werden kann der Fendt e100 an einer 23-kW-CCS Steckdose oder alternativ an Super-Chargern mit Gleichstrom (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Die Batteriegröße beträgt 0,3m<sup>3</sup> und wiegt 600kg. Der 50kW starke Schlepper ist sowohl kompatibel mit konventionellen als auch mit elektrischen Arbeitsgeräten. Mit seinem stufenlosen Variogetriebe ist er einer der ersten voll elektrischen Traktoren auf dem Markt (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Der Traktor wird nicht nur für kommunale Zwecke verwendet, sondern findet auch großes Interesse bei den Wein- und Gemüsebauern. Mit seiner 100kWh Batterie arbeitet der Fendt e100 völlig emissionsfrei. 2017 wurde der Schlepper erstmals vorgestellt. Bis heute gibt es ihn noch nicht zu kaufen. Dies soll sich aber schon bald ändern, so Fendt Chef Gröbblinghoff zu der Zeitschrift „agrarheute“ (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Anfang Februar 2022 sagte Leo von Stillfried, Director Premium Tractor platform bei AGCO, während des online Workshops „Zukunft Ackerbau: Feldroboter, Elektrotraktoren und andere Alternativen zum Diesel“, dass es sich bei dem Schlepper um ein Konzept handelt und der Traktor noch nicht bestellbar sei (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Der Fendt e100 soll 2024 sowohl als S-, als auch als V-Variante in Serienproduktion gehen, so Gröbblinghoff. Es gebe bei Fendt auch schon Versuche, ob es möglich wäre einen vollelektrischen Traktor mit 150-180PS zu bauen, der mindestens 4-6 Stunden arbeiten kann, ohne aufzuladen und trotzdem so praktikabel bleibt wie ein Dieselschlepper in derselben Leistungsklasse (vgl. Michel-Berger et al., 2022).

Des Weiteren arbeitet Fendt gerade an einem Traktor mit Wasserstoffantrieb auf zwei Pilotbetrieben in Niedersachsen (vgl. Michel-Berger et al., 2022). Fendt macht dazu jedoch keine Angaben und es wurden auch noch keine Fotos oder ähnliches veröffentlicht.

Auch an den neuen Core-75 Motoren, die in dem neuen Fendt 700 Generation 7 verbaut sind, wurde weiterentwickelt. Sie sollen umrüstbar sein um mit Methanol, Ethanol, Wasserstoff oder als Hybridsystem genutzt werden zu können (vgl. Göggerle, 2022). HVO-Kraftstoffe können bei dem Motor ohne Umrüstung getankt werden. Dieses Feature bringt uns schon einen großen Schritt in die Richtung der CO<sub>2</sub>-Einsparung.

### 3.4 JCB

JCB ist der erste Land- und Baumaschinenhersteller der zwei reife, mit Wasserstoff angetriebene Prototypen im Portfolio zu bieten hat: einen Baggerlader und einen Teleskoplader. Strom kann in dieser Branche und Größenordnung nicht die Zukunft sein, so JCB Vorsitzender Lord Bamford (vgl. JCB, o. D.). JCB bezeichnet sich selbst mit diesen Wasserstoffmotoren als Weltmarktführer. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen bei 0. Es sind 6-Zylindermotoren mit bis zu 200kW, wenig Geräuschemissionen, gleiche Leistung und gleiches Drehmoment wie ein Dieselmotor (vgl. JCB, o. D.). Auch die Betankung ist sehr ähnlich wie beim Diesel, binnen weniger Minuten.

Bis 2024 will JCB den Wasserstoffmotor zur Serienreife bringen (vgl. JCB, o. D.). Er verbrennt den flüssigen Wasserstoff anstelle von Dieselkraftstoff.

2020 hat JCB einen 20 Tonnen Kettenbagger als Prototyp mit einer Wasserstoffbrennstoffzelle ausgestattet. Hier wurde der Wasserstoff mittels einer elektrochemischen Reaktion in Strom umgewandelt, der den Elektromotor antreibt.

Eine Reihe von JCB-Dieselmotoren können mit HVO-Kraftstoffen getankt werden (vgl. JCB, o. D.). Mit diesen Motoren gehen wir einen Schritt in die Nähe eines CO<sub>2</sub>-neutralen Arbeitens. JCB hat jedoch auch eine Etech „mini Reihe“ 2019 vorgestellt. Dort waren diverse Maschinen wie zum Beispiel Minibagger, ein kleiner Teleskoplader, Rüttelplatten, Arbeitsbühnen und Dumper enthalten, die alle mit einem Elektromotor betrieben werden (vgl. JCB, o. D.). Vorteile sind emissionsloses, leises, schnelles Laden in nur 60 Minuten, eine Reichweite bis zu 8 Stunden, wartungsfreie Batterien, eine minimale tägliche Kontrolle und es ermöglicht ein Arbeiten in geschlossenen Räumen. Sie haben eine Ladekapazität von 110 Volt (V), 230V und 400V (vgl. JCB, o. D.). Jedoch sind dies alles nur kleine Arbeitsgeräte.

#### **4.Material und Methode**

Um die Vorgehensweise dieser Arbeit konkret zu verdeutlichen, werden im folgenden Abschnitt die angewendeten Methoden beschrieben. Es geht um die literarische Auseinandersetzung mit dem Thema und die Methode des Vergleichens und Wertens.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde die Methode der Literaturliteraturarbeit angewendet. Die folgenden Daten für die Vergleiche und Wertungen wurden aus einer umfangreichen Literaturrecherche aber auch aus Veranstaltungen und persönlichen Kontakten zusammengestellt. Für den Einstieg in das Thema der alternativen Antriebstechnik wurden Quellen gesucht, die zunächst einen Überblick über die möglichen Kraftstoffe geben. Es folgt ein kurzer Einblick in die Landtechnikbranche. Einige Hersteller beschäftigen sich schon länger mit dem Thema alternative Antriebstechnik in der Landtechnik. Auch hier musste vorwiegend mit Fachzeitschriften oder Onlinequellen gearbeitet werden Da das Thema erneuerbare Energien bzw. alternative Antriebe sehr aktuell ist, musste vermehrt auf Onlinequellen zurückgegriffen werden, um die Aktualität zu erhalten. Bei der Verwendung von Onlinequellen muss jedoch immer die fachliche Glaubwürdigkeit hinterfragt werden. Deswegen wurde versucht, Quellen von öffentlichen Verbänden, große Fachzeitschriften oder staatlichen Institutionen zu finden. Besonders bei den aktuellen Verbrauchszahlen der Stoffe waren Aussagen des Statistischen Bundesamtes bzw. Zahlen von der Statista sehr wichtig.

Für den Einblick in den theoretischen Teil der alternativen Energien konnte auch Fachliteratur verwendet werden. Jedoch wurde auch hier auf Aktualität geachtet, wobei einige Grundsätze und Theorien nicht veralten.

Es wurden keine eigenen Versuche oder Experimente durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser Vergleiche und Wertungen soll auf Deutschland liegen. Es werden im Folgenden die oben aufgeführten alternativen Antriebsstoffe Wasserstoff, Methan, Strom und BtL-Kraftstoffe unter den Aspekten der Rohstoffbeschaffung, der Kosten, der Praxistauglichkeit und der Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion miteinander verglichen und gewertet. Um die Ergebnisse zu verdeutlichen, wurde im Diskussionsteil die Bewertung der einzelnen Stoffe vorgenommen. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage der Noten von 1-6, wobei 1 „sehr gut geeignet“ und 6 „überhaupt nicht geeignet“ bedeutet. Zum Abschluss wird der Durchschnitt, aller Noten des jeweiligen Stoffes gebildet, um zu erkennen welcher dieser Stoffe sich am besten als alternativer Kraftstoff für die mobile Landtechnik der Zukunft eignet.

## 5. Vergleiche nach verschiedenen Kriterien

### 5.1 Rohstoffbeschaffung

Alternative Kraftstoffe können weltweit hergestellt und gehandelt werden. Jedoch ist es sinnvoll, die Kraftstoffe im eigenen Land zu produzieren und zu vermarkten, denn globale Transporte der Kraftstoffe, über den Seeweg lassen die Rohölpreise steigen. Diese Methode würde die CO<sub>2</sub>-Bilanz nach oben treiben und deshalb ist es sinnvoll zu prüfen, ob im eigenen Land die Möglichkeit besteht, alternative Kraftstoffe herzustellen und in welche Mengen dies möglich ist.

Im Jahr 2022 lag die landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland, bei 16,6 Mio. Hektar (vgl. Ahrens, 2022). Zur Ernte 2019 wurden in Deutschland auf schätzungsweise 2,37 Mio. ha Energiepflanzen angebaut, was gemessen an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche einen Anteil von ca. 14,2% ergibt (vgl. BVA 2020). Die Obergrenze für den Anbau von Energiepflanzen wird bis 2030 auf maximal ca. 3,9 Mio. Hektar ansteigen (vgl. Fritsche et al., 2004, S.189f). Durch die Einhaltung der Fruchtfolge, liegt die höchstmögliche Anbaufläche für Ölpflanzen bei ca. 3 Mio. Hektar (vgl. Fritsche et al., 2004, S.189f). Auf Grundlage der Daten von Fritsche und den durchschnittlichen Erträgen pro Jahr wurden in Tabelle 1 die maximalen Erträge pro Hektar und die Energiewerte pro Jahr dargestellt. Zu erkennen ist, dass Biomethan den höchsten Energiegehalt mit 48,99 MWh/ha hat, gefolgt von BtL-Kraftstoffen mit 37,5 MWh/ha und weit darunter Biodiesel und Bioethanol. Bei der Energiemenge pro Jahr ist es ähnlich. Geführt von Biomethan und BtL-Kraftstoffen.

**Tabelle 1: Energieertrag verschiedener Kraftstoffe**

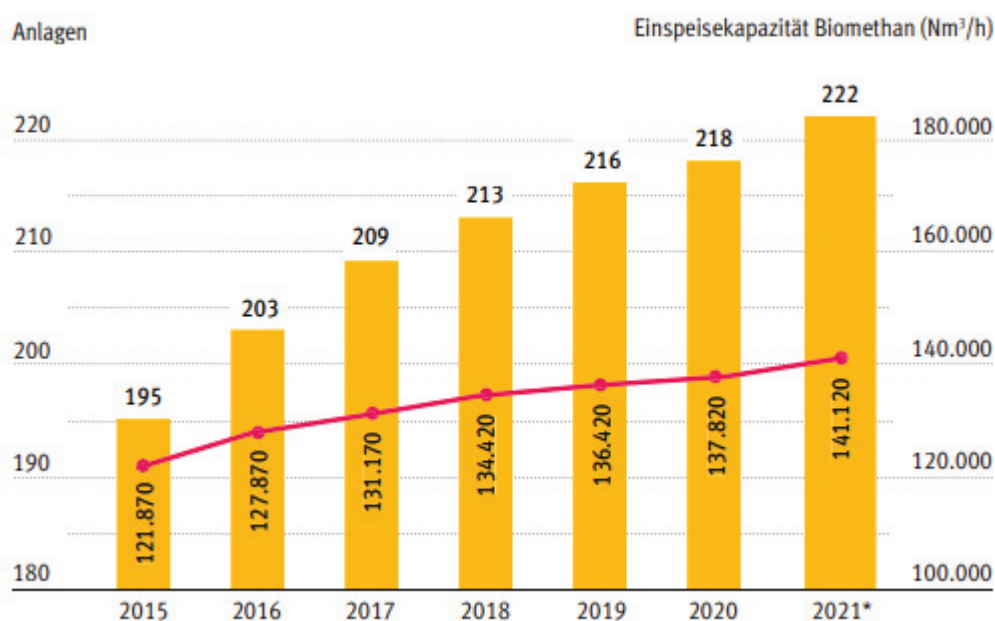
Kraftstoff	Ertrag/Jahr	Energie/Fläche in MWh/ha	Max. Anbau- fläche	Energie/Jahr in MWh/a	Max. Ertrag
Biomethan	35,4dt/ha*	48,99	3.900.000	191.061.000	138.060.000dt/a
BtL	4030l/ha*	37,5	3.900.000	146.250.000	15.717.000.000l/a
Biodiesel	1500l/ha*	14,22	3.000.000	42.660.000	4.500.000.000l/a
Bioethanol aus Weizen	2800l/ha*	14,67	3.900.000	57.213.000	10.920.000.000l/a

Quelle: eigene Darstellung

\* Biokraftstoffe Basisdaten Deutschland, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2008 [online] <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/methan-aus-biogas>

Energie produzieren, auch wenn keine Sonne scheint oder kein Wind weht, dass passiert in den 9.600 Biogasanlagen in Deutschland (BMEL 2022). Biogas entsteht in Biogasanlagen und aus Biogas wird Biomethan. Der Substrateinsatz in Biogasanlagen lag 2019 bei 46% aus nachwachsenden Rohstoffen, 49% aus Wirtschaftsdünger wie Gülle oder Mist, 3% kommunaler Bioabfall und 2% aus Reststoffen von Industrie oder Landwirtschaft (vgl. FNR 2021). In der Abbildung 4 ist zu erkennen, dass die Anzahl der Biogasanlagen, die Biomethan produzieren, immer weiter steigt und die Einspeisekapazität von Biomethan stetig ansteigt. 2015 stellten 195 Anlagen 121.870 Nm<sup>3</sup>/h Biomethan her, 2021 waren es schon 222 Anlagen mit einer Einspeisekapazität von 141.120 Nm<sup>3</sup>/h.

### Anlagen zur Biomethan-Produktion



**Abbildung 4: Anzahl Biogasanlagen und deren Biomethan Einspeisung**

Quelle: [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere\\_basisdaten\\_bioenergie\\_2022\\_06\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf)

In Deutschland gibt es circa 800 CNG-Tankstellen. Im Jahr 2021 kam das Biomethan in Tankstellen zu 80% aus Biogasanlagen (vgl. gibgas o. D.). CNG/Erdgasautos können kein Autogas (LPG) tanken.

Mit der „Kohle der Zukunft“ bezeichnet Jules Verne den Wasserstoff. In Deutschland wurden im Jahr 2020 57 Terawattstunden (TWh) Wasserstoff produziert, davon waren 18 TWh als Hauptprodukt mittels Dampfreformierung von Erdgas oder Naphtha (vgl. Flohr et al. 2021). Des Weiteren fällt Wasserstoff bei anderen Industrieprozessen an, wie zum Beispiel



bei dem Benzinreforming (Erhöhung der Oktanzahl). Grüner Wasserstoff spielt mengenmäßig noch keine Rolle in Deutschland. Jedoch wird geplant, dass für das Jahr 2030 der Ausbau der Elektrolysekapazität auf einem Niveau von fünf Gigawatt liegen soll und dadurch mehr grüner Wasserstoff in Deutschland zur Verfügung stehen wird. (vgl. Statista Research Department, 2023). Für Fahrzeuge mit Brennstoffzellen, wo aus Wasserstoff durch Verbrennung elektrische Energie entsteht, gibt es die Möglichkeit in Deutschland an 95 Tankstellen, Wasserstoff zu tanken (vgl. Statista Research Department, 2023).

Für die Stromversorgung in Deutschland sind die konventionellen Energieträger 2022 nach wie vor Vorreiter, mit 57,7% des gesamten produzierten Stroms. Kohle ist nach wie vor der wichtigste Energieträger in Deutschland. Im Jahr 2022 wurden 8,4% mehr Kohlestrom ins Netz eingespeist als 2021. Es wird nun fast so viel Strom aus Photovoltaikanlagen, wie aus Erdgas produziert, denn Erdgas geht um 11,3% zurück und Photovoltaik legt um 19,5% zu. Des Weiteren wurden 1,9% weniger Strom 2022 ins Netz eingespeist als im Vorjahr. Deutschland bekam auch 62% weniger Stromimporte aus Frankreich. Daraus folgt, dass die gesamte, von Deutschland importierte Strommenge, im Jahr 2022 zum Vorjahr um 4,8% zurück ging (vgl. Statistisches Bundesamt, 2023). Im Allgemeinen ist die Stromeinspeisung von konventionellen Energieträgern von 57,7 % auf 53,7% gesunken. Dieser Rückgang kommt vor allem durch die Halbierung der Einspeisung durch Kernenergie, nach Abschaltung dreier Kernkraftwerke. Dadurch folgt ein Zuwachs der Einspeisung durch erneuerbare Energieträger von 42,3% auf 46,3%. Dies finden wir vor allem bei der Einspeisung von Strom durch Windkraft und durch die erhöhte Einspeisung von Photovoltaik wieder. Der erzeugte Strom aus Biogasanlagen bleibt bei 5,8%, wie schon im Vorjahr (vgl. Statistisches Bundesamt, 2023). In Deutschland wurden im Jahr 2022 insgesamt 509,4 Mrd. kWh Strom eingespeist, davon kamen 273,5 Mrd. kWh aus konventionellen Energieträgern und 235,9 Mrd. kWh aus erneuerbaren Energieträgern. Die importierte Strommenge lag 2022 bei 49,3 Mrd. kWh und die exportierte Strommenge bei 76,3 Mrd. kWh (vgl. Statistisches Bundesamt, 2023). Der Bruttostromverbrauch lag im Jahr 2022 bei rund 547 Mrd. kWh (vgl. Statista Research Department, 2023).

Ein Kraftstoff ist noch nicht auf dem Markt erhältlich, jedoch wird er in Zukunft ein wichtiger Bestandteil im Verkehr und der Landwirtschaft werden. Die Rede ist von BtL-Kraftstoffen. Für die Herstellung kommen eigens angebaute Energiepflanzen, Wald- oder Schnellwuchsholz, Reststoffe wie Stroh oder Restholz oder auch organische Abfälle in Frage. Besonders gut eignet sich zellulosereiche, trockene Restbiomasse. Vorteil an BtL-Kraftstoffen ist, es können nicht nur einzelne Inhaltsstoffe oder Pflanzenteile verwendet werden, sondern die gesamte Pflanze (vgl. FNR, o. D.). Man geht von einem Jahresertrag von ca. 4000l/ha

auf Basis von Energiepflanzen aus (vgl. FNR, o. D.). Die Verfahren zur BtL-Kraftstoff-Herstellung in Deutschland befinden sich derzeit noch in der Entwicklung. Die Forschung beschäftigt sich hauptsächlich mit der Herstellung von BtL-Dieselmotorkraftstoff. Somit kann man, Stand heute, keine BtL-Kraftstoffe erwerben.

## 5.2 Kosten

Wenn man über alternative Energiequellen spricht, spielen die Kosten eine wichtige Rolle. Für die Landwirte muss die alternative Antriebstechnik schließlich auch bezahlbar sein. Es macht aus Unternehmerischer Sicht keinen Sinn auf eine andere Technik zu setzen die sich wirtschaftlich nicht rechnen lässt. Es geht nicht nur um die Kraftstoffkosten, sondern auch vor allem um die Anschaffungskosten der Maschinen und auch deren laufende Kosten für Wartung oder ähnliches.

Um die Kraftstoffe besser miteinander zu vergleichen, unter dem Aspekt der Kosten, schaut man sich deren Eigenschaften an. Die Kraftstoffe besitzen alle einen Heizwert und einen daraus resultierenden Dieselläquivalent. In Tabelle 2 wurde aus dem Heizwert und dem Dieselläquivalent des jeweiligen alternativen Kraftstoffs das Preisäquivalent ermittelt.

**Tabelle 2: Preisäquivalent für verschiedene Kraftstoffe**

Kraftstoff	Heizwert In MJ/l*	Preis In €**	Dieselläquiva- lent in l*	Preisäquivalent In €
BtL	33,45	1	0,97	1,04
Biodiesel	32,65	1,75	0,91	1,92
Bio-Wasserstoff	10,8	9,5	3,6	6,83
Biomethan	36	1,65	1,5	1,1
Konventioneller Diesel	35,87	1,64	1	1,64

Quelle: eigene Darstellung

\*Quelle: <https://basisdaten.fnr.de/bioenergie/biokraftstoffe/>

\*\*Preise basieren auf durchschnittliche Tankstellenpreise um Neubrandenburg

Bezieht man sich auf die in der Tabelle 2 aufgeführten Preise, so kann man erkennen, dass Biomasse to Liquid und Biomethan momentan günstiger sind als Diesel. Biodiesel liegt auf demselben Niveau wie konventionell hergestellter Diesel. Auch kann man sagen, dass Bio-Wasserstoff, also komplett aus erneuerbaren Energien hergestellter Wasserstoff, momentan noch nicht konkurrenzfähig gegenüber Diesel ist, mit Blick auf die Kosten.



In Tabelle 3 wird ein elektrisch angetriebener Hoflader mit 18kW Motor mit einem mit konventionellem Diesel angetrieben Hoflader, mit 24 PS verglichen, bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren. Es werden die Gesamtkosten verglichen. Dazu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Dieseldkosten 150ct/l, ohne Mehrwertsteuer aber inklusive Agrardieselvegütung
- Stromkosten 28ct/kWh, ohne Mehrwertsteuer (wenn eigens produzierter Strom verwendet wird, sinkt der Strompreis deutlich)
- Verluste durch Kühlung und Nebenantriebe bei Elektrovariante betragen die Hälfte der Diesel-Variante
- Reparaturkosten (Wartung und Instandsetzung) des Elektrohofladers betragen 2/3 der Diesel Variante
- Elektrohoflader kostet 50% mehr als Dieselhoflader (vgl. C.A.R.M.E.N., 2022)

**Tabelle 3: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen Hoflader**

Dieselantrieb			akku-elektrischer Antrieb		
Leistung	24	PS	Leistung	18	kW
Anschaffung	22.000	€	Anschaffung	33.000	€
Nutzungszeit	10	a	Nutzungszeit	10	a
Betriebsstunden	900	h/a	Betriebsstunden	900	h/a
Dieselbedarf	2.10	l/h	Strombedarf	6.60	kWh/h
Fixe Kosten	2.210	€/a	Fixe Kosten	3.288	€/a
davon Abschreibung (20% Restwert)	1.760	€/a	davon Abschreibung (20% Restwert)	2.640	€/a
davon Zins (3% Zinssatz)	396	€/a	davon Zins (3% Zinssatz)	594	€/a
davon Versicherung, Steuer, Überwachung	54	€/a	davon Versicherung, Steuer, Überwachung	54	€/a
variable Kosten	5.75	€/h	variable Kosten	3.58	€/h
davon Reparatur	2.60	€/h	davon Reparatur	1.73	€/h
davon Kraftstoffkosten	3.15	€/h	davon Kraftstoffkosten	1.85	€/h
Gesamtkosten	7.385	€/a	Gesamtkosten	6.510	€/a

Quelle: <https://www.carmen-ev.de/2022/08/10/rechnet-sich-die-umstellung-auf-elektroantrieb-in-der-landwirtschaft/>

Man kann in der Tabelle erkennen, dass trotz des höheren Anschaffungspreises der Elektrovariante, die Gesamtkosten im Jahr ca. 900€, unter denen der Dieseldieselvariante liegen. Auch zu erkennen sind geringere Kraftstoffkosten bei dem Elektro-Hoflader. Jedoch muss man bedenken, dass wenn die Maschine größer wird auch der Akku größer werden muss und das ist auch mit höheren Kosten verbunden. Eine ähnliche Kosteneinsparung können wir in der Abbildung 3 sehen, im Kapitel 3.1. Dort wurde von der Firma New Holland eine Kostenkalkulation erstellt, für die Nutzung eines 180PS Methangas Schleppers. Allerdings wurde in dieser Kalkulation kein Mehrpreis für den Methangas Traktor berechnet.

### 5.3 Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion

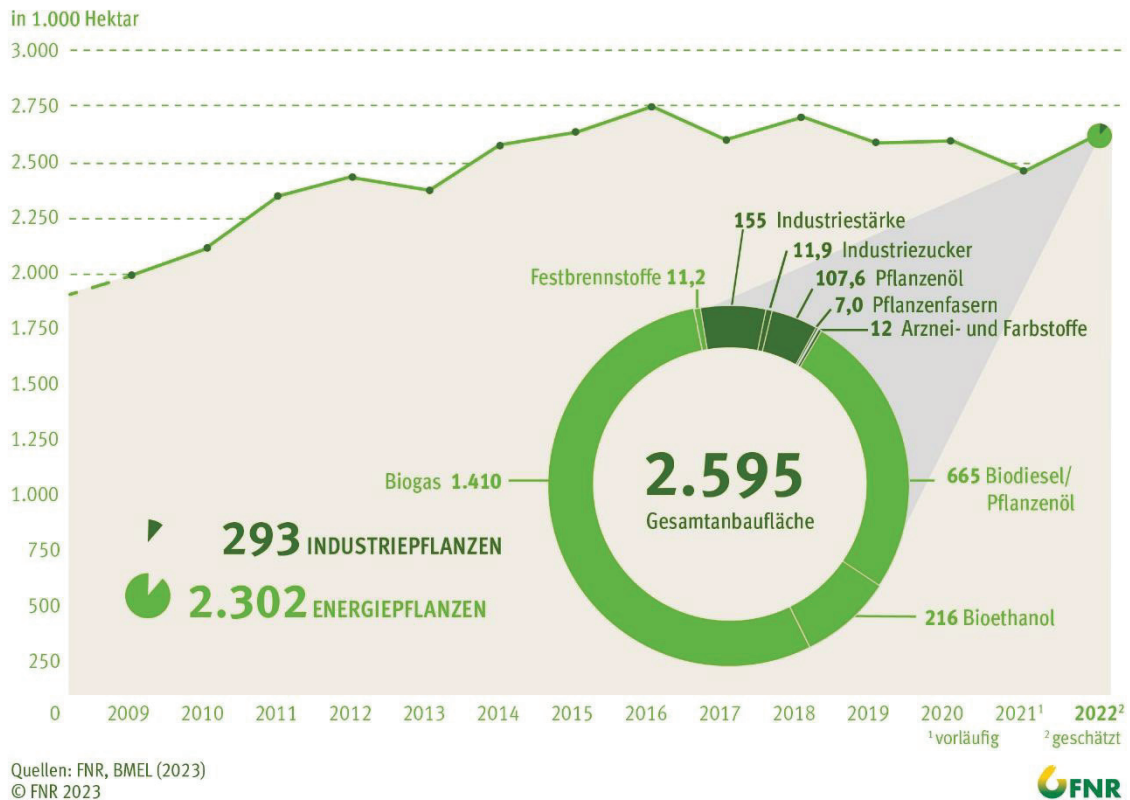
Die 17 „Ziele für nachhaltige Entwicklung“ sind politische Zielsetzungen der Vereinten Nationen und sollen zu einem umfassenden Wandel, zu einem nachhaltigen Wirtschaften im Ursprünglichen Sinne, bis zum Jahr 2030 dienen (vgl. Plattform Erneuerbare Antriebsenergie für die Land- und Forstwirtschaft, 2023). Unter den Zielen befinden sich unter anderem die Punkte „kein Hunger“ und „sauberes Wasser“. Es wurde beschrieben, dass beispielsweise bei der Erzeugung von Biogas, nur die organischen Abfälle, also die Reste der Lebensmittelverarbeitung für die Produktion genutzt werden. In diesen Fällen besteht zu keinem Zeitpunkt eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion. Es wurde auch beschrieben, dass bei der Verwendung von Biokraftstoffen mehr Schutz für den Boden gegeben sei, da es durch die biologische Abbaubarkeit nicht ins Grundwasser eindringt, wie bei fossilen Kraftstoffen.

Im Jahr 2022 lag die landwirtschaftliche Nutzfläche bei 16,6 Millionen Hektar (vgl. Ahrens, 2022). In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass von den 16,6 Millionen Hektar nur 2,595 Mio. Hektar zur Produktion von nachwachsenden Rohstoffen genutzt wurden. Davon 1,41 Mio. Hektar für die Biogasanlagen, 665.000 Hektar für die Herstellung von Biodiesel und 216.000 Hektar für die Herstellung von Bioethanol. Jedoch kann man auch erkennen, dass der Höhepunkt des Anbaus für nachwachsender Rohstoffe im Jahr 2015 lag, mit ca. 2,75 Mio. Hektar. Jedoch werden in Biogasanlagen nur 46% nachwachsende Rohstoffe genutzt. Der Rest setzt sich zusammen aus Gülle, Mist, Reststoffen aus Industrien und kommunalen Bioabfälle. (vgl. FNR 2021).

Bei BtL-Kraftstoffen kann man noch nichts zur Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion sagen. Jedoch kann man davon ausgehen, dass es eine ähnliche Situation wie bei Biodiesel oder Biomethan sein wird, denn zur Herstellung kann prinzipiell jede pflanzliche Biomasse genutzt werden. Ein großer Vorteil ist hier, dass die gesamte Pflanze zur Herstellung von

BtL-Kraftstoffen verwendet werden kann und nicht nur ein Teil der Pflanze wie es bei anderen Biokraftstoffen der Fall ist (vgl. FNR, o. D.). Man geht davon aus, dass wenn man zur Herstellung eigens angebaute Energiepflanzen, wie zum Beispiel Miscanthus verwendet, man einen Jahresertrag von 4000l/ha erhält (vgl. FNR, o. D.).

### Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland



**Abbildung 5: Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland**

Quelle: [https://www.fnr.de/fileadmin/Grafiken/abb\\_002.jpg](https://www.fnr.de/fileadmin/Grafiken/abb_002.jpg)

Wenn man sich nun im Hinblick auf den Elektroantrieb die Energieträger im Jahr 2022 anschaut, kann man sagen, dass 57,7% aus konventionellen Energieträgern stammen und 42,3% aus erneuerbaren Energieträgern (vgl. Statistische Bundesamt, 2023). Die konventionellen Energieträger wirken sich kaum auf die Lebensmittelproduktion aus. Allerdings müssen im Hinblick auf die Konkurrenz der Lebensmittelproduktion die erneuerbaren Energieträger erwähnt werden, denn diese Energie kommt zum größten Teil aus Windkraft, gefolgt von Photovoltaik (PV-Anlagen) und aus Biogasanlagen. Bei den Biogasanlagen haben wir dasselbe Szenario wie oben beschrieben. Für PV-Anlagen wurden im Jahr 2018 im Basis-DLM eine Flächennutzung von 25.500 ha aufgezeigt. Von denen waren 17.100 Hektar

landwirtschaftliche Nutzfläche (67%), darunter 13.300ha Ackerland und 3.800 ha Grünland (vgl. Böhm, 2022). Dies entspricht ca. 0,1% der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland. Laut Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) sollen in Deutschland bis 2030, 115 GW Windenergie an Land installiert sein, von ausgehend momentanen 58GW (aktuelle installierte Leistung Ende 2022) (vgl. Umweltbundesamt, 2023). Die amtierende Bundesregierung hat im Koalitionsvertrag festgehalten, dass 2% der Landesfläche für Windenergie zur Verfügung gestellt werden sollen, mit rechtlicher Grundlage durch das Windenergieflächenbedarfsgesetz, welches zum 1.02.2023 in Kraft getreten ist (vgl. Umweltbundesamt, 2023). Es wurde jedoch nicht beschrieben, welche Flächen dafür genutzt werden sollen. Jedoch kann man aus Erfahrung sagen, dass durch Windkraftanlagen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen, nicht viel Fläche verloren geht. In vielen Fällen ist um das Windrad eine Fläche von ca. 100m x 100m mit Schotter befestigt und ein zum Windrad führender Weg. Die Windenergie aus Windparks in der Nord- und Ostsee haben kaum einen Einfluss auf die Nahrungsmittelproduktion.

Beim „grünen Wasserstoff“ gibt es eine ähnliche Konkurrenz wie bei Windenergie, PV-Anlagen oder Biogasanlagen, denn grüner Wasserstoff wird aus erneuerbarer Energie hergestellt. Beim „grauen Wasserstoff“ besteht keine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion. Das Thema um die Konkurrenz zwischen erneuerbaren Antriebsenergien und der Lebensmittelproduktion umfasst einen sehr großen Konfliktbereich in der Gesellschaft und soll hier nur einen kurzen Überblick verschaffen.

#### **5.4 Praxistauglichkeit**

In diesem Kapitel geht es um die Praxistauglichkeit der oben aufgeführten alternativen Energiequellen. Wie zum Beispiel ist die Infrastruktur für die Stoffe, wie und wo kann ich tanken oder wie komfortabel wird die Maschine für den Praxiseinsatz sein?

Betrachten wir nun als erstes das Methangas. Biomethan kann ohne weiteres mit ins Erdgasnetz eingespeist werden und hat somit eine hervorragende Infrastruktur (vgl. FNR o. D.). Es kann somit an jeder Tankstelle getankt werden, die CNG vertreibt. Jedoch ist der Anteil an Biomethan an einer Tankstelle unbekannt. Es ist möglich, dass die nächste Tankstelle die CNG vertreibt, 30km entfernt liegt. Das stellt den Landwirt vor eine Herausforderung, denn nicht jeder Landwirt ist bereit so weit zu fahren. Zusätzlich ist es auch unrentabel. Wenn man also einen ganzen Fuhrpark auf Methangas umstellen möchte, braucht man eine andere Lösung. Hat man eine eigene Biogasanlage kann man sein eigenes Biomethan herstellen und für seinen Betrieb nutzen. Jedoch ist das mit hohen Kosten verbunden. Man braucht eine eigene Aufbereitung für das Biogas und dann muss man sich noch zusätzlich eine eigene

Tankstelle zur Speicherung und Entnahme des Biomethans bauen. Für die Nutzung von Methangas muss ein eigener, dafür vorgesehener, Motor gebaut werden. Die Nutzung eines normalen Diesel- oder Benzinmotors ist nicht möglich. Ein weiterer Punkt ist die Speicherung und Lagerung des Biomethans, denn durch die geringere Energiedichte benötigt das Gas mehr Raum. Das bedeutet, dass in Methangastanks das Gas auf 200bar verdichtet werden muss (vgl. FNR, o. D.). Ein 400PS Dieselschlepper zum Beispiel mit einem Tankvolumen von 400l Diesel, benötigt 1800l CNG. Diese 1800l in einem Standardtraktor unterzubekommen, ohne jegliche Einbußen, ist fast unmöglich. (vgl. Klaus Senghass, Market Leader Alternativ Fuels bei New Holland, 2022). Durch die Verwendung von Biomethan werden bis zu 80% weniger Schadstoffe ausgestoßen (vgl. FNR, o. D.).

Kommen wir nun zum Wasserstoff. Um den ganzen Energieverbrauch für die Mobilität, in Deutschland, mit Wasserstoff, bis zum Jahr 2030 zu decken müssten, 90 bis 110TWh nutzbarer Wasserstoff zur Verfügung stehen (vgl. Fryges 2022). Dafür müsste erstmal eine grundlegende Bereitstellungsinfrastruktur aufgebaut werden, um preislich überhaupt konkurrenzfähig zu werden. Will man Wasserstoff speichern oder transportieren, so muss er durch Abkühlung auf  $-252,77^{\circ}\text{C}$  verflüssigt oder durch Energiezufuhr auf 700bar verdichtet werden (vgl. Umwelt Bundesamt, 2022). Eine Kühlung auf  $-252,77^{\circ}\text{C}$  in der Landwirtschaft ist schwierig umzusetzen und flüssiger Wasserstoff enthält auch eine geringere Energiedichte als gasförmiger Wasserstoff. Bei den Tankstellen ist es ähnlich wie bei Methangas. Es gibt in Deutschland einige Wasserstofftankstellen (siehe Kapitel 5.1 Rohstoffbeschaffung). Jedoch ist es für einen Landwirtschaftsbetrieb nicht möglich weit zu fahren, um die Maschinen zu tanken. Also muss eine Hoftankstelle gebaut werden. Jedoch gibt es für Wasserstoff keine bestehende Infrastruktur wie beim Biomethan durch unterirdische Leitungen. Das bedeutet der Wasserstoff muss per LKW zum Hof geliefert werden, so wie es auch beim Diesel der Fall ist. Wasserstofftanks benötigen besondere Eigenschaften. Die Speichertanks bestehen häufig aus Aluminium, denn durch die geringe Dichte können, zum Beispiel bei Kunststoffen, die Wasserstoffmoleküle hindurch diffundieren (vgl. EMCEL, 2022). Um einen 400PS Schlepper mit einem Tankvolumen von ca.400l Diesel mit Wasserstoff zu versorgen, bräuchte man ca. 240kg gasförmigen Wasserstoff. (vgl. Klaus Senghass, Market Leader Alternativ Fuels bei New Holland, 2022). Grüner Wasserstoff ist zum heutigen Tag kaum vorhanden. Daher wird vor allem Wasserstoff genutzt, der bei der Erdgasdampfreformation entsteht. Wasserstoffmotoren sind lokal also emissionsfrei, jedoch aber häufig nicht bei der Herstellung. Motoren, die mit Wasserstoff betrieben werden, sind nicht geräuschar-

mer als ein Motor, der mit fossilen Energieträgern betrieben wird. Wenn das Fahrzeug jedoch einen Elektromotor besitzt, der durch eine Brennstoffzelle betrieben wird, sind kaum Motorgeräusche hörbar, ähnlich wie bei einem reinen Elektromotor.

Um einen Elektromotor zu betreiben, braucht man eine Stromquelle. Bei Fahrzeugen mit einer Brennstoffzelle ist diese die Stromquelle. Die meisten Fahrzeuge mit Elektromotoren besitzen aber einen wiederaufladbaren Akkumulator. Der Akku muss dann durch eine externe Stromquelle wieder aufgeladen werden. Jedoch kann man dies in der Regel nicht über eine normale Steckdose tun. Man braucht eine extra Ladestation, die mit weiteren Kosten verbunden ist. Dies erfordert im ländlichen Raum jedoch häufig besondere Anstrengungen, obwohl in Deutschland eine sehr gut ausgebaute Infrastruktur, durch ober- und unterirdische Leitungen vorherrscht. Private Haushalte sind meistens mit einer Absicherung von 32 Ampere an ein dreiphasiges Niederspannungsnetz angeschlossen, wie auch landwirtschaftliche Betriebe. Diese haben jedoch häufig eine höhere Stromstärke und dadurch eine höhere Leistung. Will man jedoch eine Ladeleistung von 150kW zur Verfügung haben braucht, man eine Stromstärke von 250 Ampere (vgl. C.A.R.M.E.N., 2023). Die Ladeleistung ist essenziell für die Verwendung von Elektrofahrzeugen, da der Akku möglichst schnell aufgeladen werden soll, wie es zum Beispiel bei der Betankung mit Diesel etc. der Fall ist, um schnell weiter arbeiten zu können. Der Akku von einem Tesla Model 3 mit 75kWh wiegt ca. 480kg (vgl. AutoBild, 2022). Errechnet man auf Basis dieses Gewichtes nun das Gewicht des Akkus für einen Fendt 1050 mit 368kW, so erhält man ein Akkugewicht von ca. 2352kg. Man muss aber bedenken, dass hier keine Aussagen über eine Reichweite gegeben werden kann, denn ein Traktor ist nicht mit einem Auto zu vergleichen. Man kann jedoch erkennen, dass das Gewicht deutlich erhöht wird und mit Blick auf Bodenschonung und zulässiges Gesamtgewicht im Straßenverkehr, nur schwer in der landwirtschaftlichen Praxis umzusetzen ist. Auch sollte der Akku nicht nach 5 Stunden leer sein und dann 5 Stunden geladen werden müssen. Dies wäre für die Landwirtschaft unrentabel. Ein Elektromotor arbeitet lokal ohne Emissionen. Jedoch kommt es bei der Einsparung von CO<sub>2</sub> darauf an, wie der Strom produziert wird, ob grüner Strom aus erneuerbaren oder aus konventionellen Energiequellen.

Von allen am Markt erhältlichen Energiequellen, wird nun der am Markt noch nicht erhältliche Kraftstoff „Biomasse to Liquid“ angeschaut. Da der Kraftstoff noch nicht am Markt erhältlich ist kann man nur wenig zur Praxistauglichkeit sagen. Jedoch sollen BtL-Kraftstoffe ohne jegliche Umbauten in Motoren verwendet werden können. Man geht davon aus, dass die CO<sub>2</sub>- Minderung gegenüber fossilem Diesel über 90% liegt (vgl. FNR, o. D.). Die vorhandene Infrastruktur der fossilen Kraftstoffe, kann weiterhin für BtL-Kraftstoffe genutzt werden. Somit könnte BtL ohne viel Aufwand, auf dem Markt etabliert werden.



## 6.Diskussion

In Kapitel 5 wurden die Vergleiche und Ergebnisse der alternativen Energiequellen unter den Aspekten der Rohstoffbeschaffung, der Kosten, der Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion und der Praxistauglichkeit dargestellt. In Kapitel 3 wurde dazu noch die aktuelle Marktsituation sowie Innovationen der Landtechnikhersteller dargestellt. Um die einzelnen Stoffe besser zu bewerten und einen guten Überblick über deren Stärken und Schwächen zu bekommen, wurden sie mit den Noten von 1 (Sehr gut geeignet) bis 6 (überhaupt nicht geeignet) bewertet, siehe Tabelle 4. In der Tabelle wurden die alternativen Antriebsstoffe Wasserstoff, Methan, BtL und Elektro aufgeführt, benotet und abschließend das arithmetische Mittel berechnet.

**Tabelle 4: Notenvergabe alternative Antriebsstoffe**

Kraftstoff	Wasserstoff	Biomethan	BtL	Elektro
Rohstoffbeschaffung	3	2	2	3
Kosten	4	1	1	3
Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion	2	2	2	2
Praxistauglichkeit	3	2	(1)	4
Aktuelle Marktsituation	3	1	(1)	3
Gesamtnote Ø	<b>Ø3</b>	<b>Ø1,6</b>	<b>Ø1,4</b>	<b>Ø3</b>

Quelle: eigene Darstellung

Am besten abgeschlossen hat der Biomasse to Liquid Kraftstoff mit der Gesamtnote 1,4. Man muss jedoch bedenken, dass dieser Kraftstoff zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht auf dem Markt erhältlich ist und sich alle Daten auf Versuche und Vermutungen beziehen. Man kann aber sagen, dass wenn dieser Kraftstoff die Stärken beweist, wie die Literatur es voraussieht, dieser eine reale Chance als alternativer Kraftstoff in der Landwirtschaft hat. Vorteile von diesem Kraftstoff sind zum einen, der erwartete hohe Energieertrag pro Hektar und zum anderen die vermuteten geringen Kosten dieses Kraftstoffs. Auch wenn man für BtL-Kraftstoff landwirtschaftliche Nutzfläche in Anspruch nehmen muss, kann hier die gesamte Pflanze zur Herstellung verwendet werden und nicht nur ein Teil, wie es bei anderen Kraftstoffen der Fall ist. In der Praxis wird von keinen Kompromissen ausgegangen, denn man kann die vorhandene Infrastruktur der fossilen Energieträger weiter nutzen und man kann BtL ohne weitere Umbaumaßnahmen in jeder beliebigen Maschine tanken. Jedoch muss man sagen, bis dieser Kraftstoff auf den Markt kommt, wird es noch einige Zeit benötigen.

Auch eine gute Gesamtnote hat das Methan erreicht. Wenn man sich nach Fritsche den maximalen Ertrag im Jahr anschaut, so schneidet Biomethan am besten ab. Jedoch muss man sagen, dass es sich hier nur um ein Modell von Fritsche handelt und man die maximale Anbaufläche der Zukunft nicht genau voraussehen kann. Da Biogasanlagen einen Großteil ihres Substrats aus Gülle, Mist oder anderen Reststoffen verwenden, kann man hier nur eine geringe Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion erkennen. Des Weiteren produziert eine Biogasanlage zusätzlich Strom, somit hat man noch einen Vorteil. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz muss man natürlich schauen, wo das Methan herkommt, ob es als Nebenprodukt aus der Erdölgewinnung kommt, oder aber aus Biogas hergestellt wird und somit zu einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Bilanz führt. Ein Vorteil des Biomethans, man kann die vorhandene Infrastruktur des Erdgases nutzen. Will man sein eigenes Biomethan mit seiner Biogasanlage herstellen, muss man das Biogas erst aufbereiten und dann noch eine Tankstelle zur Entnahme bauen. Einen praxistauglichen Traktor mit 180PS hat die Firma New Holland im Portfolio, mit einem eigens hergestellten Motor für die Verwendung von Methangas. Jedoch gibt es ein Limit für die Leistung der Maschine, denn je mehr Leistung eine Maschine benötigt, desto mehr Methangas wird benötigt. Dieses benötigte Methangas mitzuführen, stellt ein Problem dar, denn Methan hat eine sehr geringe Energiedichte.

Im Vergleich der alternativen Kraftstoffe haben Wasserstoff und Elektro jeweils mit der Gesamtnote 3 abgeschlossen. Wasserstoff benötigt viel Energie, um hergestellt zu werden. Zum jetzigen Zeitpunkt hat Deutschland nicht die erforderliche Energie zur Verfügung, um genügend Wasserstoff herzustellen. Für die CO<sub>2</sub>-Bilanz ist es wichtig zu wissen, welcher Strom für die Herstellung genutzt wird. Ob aus konventioneller Energie oder erneuerbarer Energie. Die Kosten für Wasserstoff sind momentan noch sehr hoch. Dies kann sich natürlich ändern, wenn die Landwirte ihren eigenen Strom produzieren, für die Herstellung von Wasserstoff. Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion besteht nur dann, wenn der benötigte Strom von einer Biogasanlage oder von PV-Anlagen kommt. Um Wasserstoff richtig auf den Markt zu bekommen, müsste die Infrastruktur besser ausgebaut werden, denn Speicherung und Transport des Wasserstoffs stellen ein Problem dar. Einige Landmaschinenhersteller wie Fendt, New Holland oder JCB haben sich auch schon mit dem Wasserstoffmotor auseinandergesetzt. Fendt zum Beispiel arbeitet gerade an einem Wasserstoffmotor auf zwei Pilotbetrieben und die Firma JCB hat zwei marktreife Baumaschinen im Portfolio, die bis 2024 in Serie auf den Markt gehen sollen. Jedoch sind dies noch keine leistungsstarken Motoren für Traktoren oder Erntemaschinen, die den Dieselmotor ersetzen können.

Beim Elektromotor können wir eine ähnliche Situation wie beim Wasserstoff erkennen. Denn auch hier haben wir in Deutschland momentan nicht genügend Energie zur Verfügung,



---

um alle landwirtschaftlichen Maschinen zu versorgen. Denn es macht keinen Sinn, Strom zu importieren, der in einem anderen Land aus konventionellen Energieträgern hergestellt wird. Auch hier ist für die CO<sub>2</sub>-Bilanz wichtig, woher der Strom kommt. Bei den Kosten können wir erkennen, dass Elektromotoren konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Dieselmotoren sind. Man muss aber bedenken, dass bei diesem Ergebnis nur kleine Maschinen miteinander verglichen worden sind und es bei großen Traktoren oder Erntemaschinen ein anderes Ergebnis geben könnte. In der Praxis haben die Elektromotoren den großen Vorteil, dass sie geräuscharm arbeiten. Jedoch muss man bedenken, dass ein Elektromotor auch einen Akku benötigt, der wieder aufgeladen werden muss. Aus der Automobilbranche kann man sagen, dass die Akkukapazitäten nicht konkurrenzfähig gegenüber Dieselmotoren sind. Ein ähnliches Bild wird sich auch in der Landwirtschaft zeigen. Wenn der Landwirt alle zwei Stunden seinen Traktor mindestens eine Stunde laden muss, bringt es für ihn nur Nachteile gegenüber eines Dieselschleppers. Auch das Gewicht des Akkus spielt eine große Rolle. Man muss bedenken, dass im Straßenverkehr nur ein Gesamtgewicht von 40t erlaubt ist und man ja häufig noch ein Gerät oder Anhänger mit sich führt. Damit sind diese 40t schnell erreicht. Auch Bodenschonung rückt immer mehr in den Vordergrund. Also dürfen die Maschinen nicht zu schwer werden, um Bodenverdichtung zu vermeiden. Einige Landtechnikhersteller haben schon Maschinen mit Elektroantrieb auf dem Markt, wie zum Beispiel Fendt mit dem e100 Vario oder JCB mit einem Teleskoplader oder Radlader der ETCH-Reihe. John Deere arbeitet an dem SESAM 2. Ein elektroantriebener 700PS Prototyp mit abnehmbarer Kabine für den Wechsel zwischen manuellem oder autonomem Arbeiten. Der Schlepper soll eine 1000kWh Batteriekapazität haben, um damit einen ganzen Tag zu arbeiten. Ob dieser Schlepper jemals marktreif wird, kann jetzt noch nicht gesagt werden. Diese Ergebnisse geben einen guten Einblick in den aktuellen Stand der alternativen Antriebstechnik. Man muss aber sagen, dass zum heutigen Stand kaum einer dieser alternativen Antriebstechniken in der deutschen Landwirtschaft genutzt wird.

## 7.Fazit

In den nächsten Jahren wird das Land immer weniger fossile Kraftstoffe zur Verfügung haben. Durch diese Verknappung wird es zu einer enormen Preissteigerung am Kraftstoffmarkt kommen. Auch werden die Auflagen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen immer größer. Aus diesem Grund ist es unumgänglich, sich mit alternativen Energiequellen zu beschäftigen.

Deshalb wurde in dieser Bachelorarbeit verglichen, welche erneuerbaren Antriebsenergien am besten für die moderne Landtechnik in Deutschland geeignet sind.

Aus der Diskussion lässt sich ableiten, dass Biomasse to Liquid- Kraftstoffe und Methan sich am besten als alternative Energietechnik eignen. Beide haben jedoch eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion, was in Deutschland sehr kritisch diskutiert wird. Man muss bedenken, dass ein Großteil der Rohstoffe für die Herstellung dieser Energien auf landwirtschaftlicher Nutzfläche angebaut wird, was aber momentan noch keinen großen Einfluss auf die Nahrungsmittelproduktion in Deutschland hat. Ein großer Vorteil von BtL-Kraftstoffen ist auch, dass er ohne Umbauten am Motor genutzt werden kann und lokal fast CO<sub>2</sub>-neutral betrieben werden kann. Auch die Infrastruktur der fossilen Kraftstoffe kann weiter genutzt werden. Beim Methangas kann auch die Infrastruktur des vorhandenen Erdgasnetzes weiter genutzt werden. Außerdem gibt es schon einen, in Serie produzierten, Schlepper von New Holland, der zur Kosten- und CO<sub>2</sub>-Einsparung beiträgt. Möchte man eine alternative Antriebstechnik, die kaum landwirtschaftliche Fläche in Anspruch nimmt, muss man sich die Möglichkeiten von Wasserstoffmotoren oder Elektromotoren anschauen. Da für beide Antriebsmöglichkeiten eine Menge Energie aufgebracht werden muss, ist es momentan noch schwierig, diese alternative Antriebstechnik „zukunftssicher“ zu nennen. Denn momentan wird in Deutschland nicht genügend Strom produziert, um den gesamten Haushalt zu decken. Wenn wir von CO<sub>2</sub>-Einsparung reden, müssen wir bedenken, dass momentan mehr Strom aus konventionellen Energieträgern produziert wird, als aus erneuerbaren Energieträgern. Die Regierung will eine Erhöhung der erneuerbaren Energieträger vorantreiben, um mehr „grünen Strom“ zu produzieren. Sollte dies in den nächsten Jahren der Fall sein, haben Wasserstoffmotoren und Elektromotoren eine reelle Chance, als alternative Antriebstechnik zu dienen. Wobei aus heutiger Sicht keine reelle Chance für Elektromotoren in hochmotorisierten Traktoren oder Erntemaschinen besteht. Ihre Aufgabenbereiche werden dann eher in der Kommunalarbeit oder in Hof- bzw. Stallarbeiten liegen, um immer dicht am Stromnetz zu sein.

Welche Antriebstechnik sich am Ende durchsetzt ist nur schwer zu sagen. Es gibt Strom, es gibt Wasserstoff, es gibt eine Mischung aus beiden, es gibt Methan und es gibt die BtL-

---

Kraftstoffe. Alle diese Antriebstechniken haben ihre Stärken und Schwächen auch im Hinblick auf die Kosten und der CO<sub>2</sub> Bilanz. Möglicherweise gibt es auch nicht nur eine Antriebstechnik, die in Zukunft für die Reduzierung die CO<sub>2</sub>-Bilanz und zur Reduzierung der Betriebskosten führt. Es ist auch gut möglich, dass Methan und BtL-Kraftstoffe für die höheren Leistungsklassen genutzt werden, während für Stall- und Hofarbeiten Elektromotoren zum Einsatz kommen können.

Es ist zu erkennen, dass ein Umstieg von konventionellen Kraftstoffen auf alternative Energiequellen nicht von heute auf morgen umsetzbar ist. Dies ist noch ein lang andauernder Prozess. Weder von der Verfügbarkeit der Rohstoffe noch von der Verfügbarkeit der landwirtschaftlichen Maschinen mit der Antriebstechnik für erneuerbaren Energien. Jedoch ist eine Umstellung auf erneuerbare Antriebstechnik unumgänglich. Zusätzlich muss geschaut werden, wo die politischen Grundsätze hinführen werden.

## **8.Zusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit sollte aufgezeigt werden, welche alternativen Energiequellen für die mobile Landtechnik der Zukunft, anstelle von fossilem Dieselmotor, verwendet werden können. Ziel sollte es sein, eine Energiequelle zu finden, die ohne Kompromisse für den Landwirt genutzt werden kann, um unabhängiger zu werden, Kosten zu sparen und CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Hierfür wurden Wasserstoff, Methan, Strom/Elektro und Biomasse to Liquid ausgewählt. Diese vier Energiequellen wurden dann kurz erklärt und anschließend verglichen. Der Vergleich bezog sich auf die Rohstoffbeschaffung, die Kosten, die Konkurrenz zu Lebensmittelproduktion und auf die Praxistauglichkeit. Um die Ergebnisse zu verdeutlichen wurde eine Bewertung vorgenommen. Für die Bewertung wurden die Stoffe mit Noten von 1 (sehr gut geeignet) – 6 (überhaupt nicht geeignet), bewertet. Die Stoffe Methan und Biomasse to Liquid wurden am besten bewertet, denn sie können mit den Kosten zur Herstellung, der Praxistauglichkeit und der Rohstoffbeschaffung überzeugen. Auch können sie zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Bilanz beitragen. Einziger Kritikpunkt ist bei diesen Energiequellen, dass sie eine leichte Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion aufweisen. Ein wenig schlechter wurden die Energiequellen Wasserstoff und Elektro bewertet. Der Grund dafür ist die Herstellung der dafür benötigten Energien, denn die meisten Energien werden in Deutschland noch aus konventionellen Energieträgern gewonnen und haben damit hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen. Sollte Strom zum großen Teil aus erneuerbaren Energieträgern kommen, haben auch Wasserstoff- und Elektromotoren eine Chance, den Dieselmotor zu ersetzen. Auch bei der Praxistauglichkeit haben beide Energien einige Schwachstellen. Der große Vorteil ist, dass es kaum eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion darstellt.

Als Ergebnis dieser Arbeit lässt sich zusammenfassen, dass zum heutigen Stand noch keine erneuerbare Energiequelle den Dieselmotor, im vollen Umfang, ersetzen kann. Es gibt jedoch Energiequellen, die in Zukunft sehr gut in der Lage dazu wären. Jedoch ist diese Entwicklung ein langer Prozess und wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

## 9.Literaturverzeichnis

### Literaturquellen:

Basshuysen Richard (2015): Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantriebs-Wege zur klimaneutralen Mobilität; Springer Fachmedien Wiesbaden

Korthauer Reiner (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien; Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Lehmann Jochen, Lushtinetz Thomas (2014) Wasserstoff und Brennstoffzellen-Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff; Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Puls Thomas (2006): Alternative Antriebe und Kraftstoffe, Was bewegt das Auto von morgen?; 15.Auflage, Deutscher Instituts-Verlag GmbH

Raggam August, Faißner Klaus (2008): Zukunft ohne Öl; Leopold Stocker Verlag

Schmitz Norbert, Henke Jan, Klepper Gernot (2006): Biokraftstoffe - eine vergleichende Analyse; WPR Communication Berlin

### Internetquellen:

Ahrens, Sandra (2022): Erwerbstätige in der Landwirtschaft in Deutschland bis 2018, Statista, [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/242856/umfrage/bedeutung-der-landwirtschaft-nach-anzahl-der-erwerbstaetigen/> [abgerufen am 20.04.2023].

Ahrens, Sandra (2022) Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland 2022 [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206250/umfrage/landwirtschaftliche-nutzflaeche-in-deutschland/?msclkid=3a3926e4ee101be2ab0942ac07df68f2> [abgerufen am 26.04.2023]

AutoBild (17.12.2022): So lange müssen wir auf den Wunderakku warten [online] <https://www.autobild.de/artikel/e-auto-akku-batterie-technik-fortschritt-kosten-recycling-16202315.html> [abgerufen am 03.05.2023]

Stegmaier Gerd (19.01.2022): So gut ist die Billig-Batterie ohne Lithium [online] <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/batterie-forschung-catl-natrium-akku-statt-lithium-ionen/> [abgerufen am 23.05.2023]

BVA/Bundesverband Agrarhandel E.V (07.05.2020) Flächennutzung 2019 in Deutschland [online] <https://bv-agrar.de/news/fl%C3%A4chennutzung-2019-deutschland> [abgerufen am 26.04.2023]

BMEL (23.08.2022) Biogas [online] <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/bioeconomie-nachwachsende-rohstoffe/biogas.html> [abgerufen am 26.04.2023]

Böhm Jonas (04.01.2022) Wie viele landwirtschaftlichen Flächen sind bereits durch PV-Freiflächenanlagen aus der Produktion genommen? [online] [https://www.dlg-mitteilungen.de/fileadmin/img/content/cover/heft/2022/22-02/DLG0222\\_Flaechennutzung\\_PV-FFA\\_Boehm.pdf](https://www.dlg-mitteilungen.de/fileadmin/img/content/cover/heft/2022/22-02/DLG0222_Flaechennutzung_PV-FFA_Boehm.pdf) [abgerufen am 30.04.2023]

C.A.R.M.E.N. (10.08.2022) Rechnet sich der Elektroantrieb in der Landwirtschaft? [online] <https://www.carmen-ev.de/2022/08/10/rechnet-sich-die-umstellung-auf-elektroantrieb-in-der-landwirtschaft/> [abgerufen am 28.04.2023]

C.A.R.M.E.N. (12.04.2023) Welche Schnellladeinfrastruktur im ländlichen Raum für Elektrofahrzeuge? [online] <https://www.carmen-ev.de/2023/04/12/welche-schnellladeinfrastruktur-im-laendlichen-raum-fuer-elektrofahrzeuge/> [abgerufen am 03.05.2023]

Deutscher Bundestag (2021): Aktuelle Förderung von mit Erdgas (CNG/LNG) betriebenen Kraftfahrzeugen [online] <https://www.bundestag.de/resource/blob/827040/cccf022e-afd91ce67d7ae203056f178/WD-5-007-21-pdf-data.pdf> [abgerufen am 16.05.2023]

Eder, Julia (2016): Damals und heute: Landtechnik im Wandel der Zeit, agrarheute, [online] <https://www.agrarheute.com/bilder/damals-heute-landtechnik-wandel-zeit-528141> [abgerufen am 20.04.2023]

EMCEL (16.06.2020) Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehältertypen gibt es? [online] <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/> [abgerufen am 02.05.2023]

Fritsche Uwe und weitere (05/2004) Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse [online] <https://elib.dlr.de/105702/2/bio-final.pdf> [abgerufen am 26.04.2023]

FNR (29.04.2022) Anbau nachwachsender Rohstoffe [online] <https://biokraftstoffe.fnr.de/service/presse/news-und-presse/aktuelle-nachricht/anbau-nachwachsender-rohstoffe-2021-konstant> [abgerufen am 29.04.2023]

FNR-Schütte Andreas (o. D.) Methan aus Biogas [online] <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/methan-aus-biogas#:~:text=Der%20Energiegehalt%20von%20einem%20Kilogramm,der%20Norm%20DIN%2051624%20gebunden.> [02.05.2023]

FNR (o. D.) Btl – Biomasse to Liquid [online] <https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/btl-biomass-to-liquid/> [abgerufen am 26.04.2023]

FNR (2021): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022 [online] [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere\\_basisdaten\\_bioenergie\\_2022\\_06\\_web.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf) [abgerufen am 26.04.2023]

Fryges Jürgen (17.05.2022): Grüner Wasserstoff – lokaler Bedarf global gedacht [online] <https://www.engie-deutschland.de/de/magazin/gruener-wasserstoff-lokaler-bedarf-global-gedacht#:~:text=Laut%20einer%20Prognose%20der%20Deutschen,40%20GW.> [abgerufen am 27.04.2023]

Flohr Udo, Hiller Sarah, Timm Matthias (21.07.2021) Welcher Wasserstoff wird in Deutschland wie hergestellt? [online] <https://www.heise.de/hintergrund/Welcher-Wasserstoff-wird-in-Deutschland-wie-hergestellt-6140164.html> [abgerufen am 27.04.2023]

Göggerle Thomas - agrarheute (16.04.2022): Neuer Elektro-Traktor von John Deere mit fast 700 PS! [online] <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/neuer-elektro-traktor-john-deere-fast-700-ps-592632> [abgerufen am 21.05.2023]

Gibgas (o. D.): CNG-Informationen für Deutschland [online] <https://www.gibgas.de/Tankstellen/Europainfos/Deutschland> [abgerufen am 27.04.2023]

JCB (o. D.): Etech-Range [online] <https://www.jcb.com/de-de/campaigns/etech-range> [abgerufen am 21.05.2023]

Michel-Berger Simon, Göggerle Thomas (17.02.2022): E-Traktor von Fendt: Serienproduktion e100 Vario startet 2024 [online] <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/e-traktor-fendt-serienproduktion-e100-vario-startet-2024-590427> [abgerufen am 21.05.2023]

Münchener Merkur (03.12.2022) Öl-Embargo und Preisdeckel gegen Russland[online] <https://www.merkur.de/wirtschaft/oel-embargo-und-preisdeckel-gegen-russland-was-bedeutet-das-zr-91954404.html> [abgerufen am 16.05.2023]

NewHolland Agriculture (o. D) Wasserstoff-Der energieunabhängige Betrieb [online] <https://agriculture.newholland.com/eu/de-de/uber-uns/new-holland/clean-energy-leader/energieerzeugung/wasserstoff-der-energieunabhangige-betrieb> [abgerufen am 17.05.2023]

Oswald (2010) Drehstromantriebe für Elektrokleinfahrzeuge. Endbericht [online] <https://www.studocu.com/de/document/friedrich-alexander-universitat-erlangen-nurnberg/elektrische-maschinen-ii/009-endbericht-drehstromantriebe/32407341> [abgerufen am 15.05.2023]

Plattform Erneuerbare Antriebsenergie für die Land- und Forstwirtschaft (2023) Mit alternativer Antriebsenergie die Ziele der UN unterstützen [online] <https://www.erneuerbar-tanken.de/erneuerbare/17ziele-der-un> [abgerufen am 29.04.2023]

Pascher, Peter; Hemmerling, Udo; Stork Simon (2022): Situationsbericht 2021/22 - Jahrhundertvergleich, Deutscher Bauernverband e.V., [online] <https://www.situationsbericht.de/1/12-jahrhundertvergleich> [abgerufen am 25.04.2023]

Schütte, Andreas (2023) Kraftstoffverbrauch in Deutschland [online] <https://mediathek.fnr.de/kraftstoffverbrauch-in-deutschland.html#:~:text=In%202022%20wurden%20in%20Deutschland,Prozent%20%2D%20bezogen%20auf%20den%20Energiegehalt> [abgerufen am 25.04.2023]

Statista Research Department (12.04.2023) Wasserstofftankstellen in Deutschland 2022 [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/820836/umfrage/anzahl-der-wasserstoff-tankstellen-in-deutschland/> [abgerufen am 27.04.2023]

Statistisches Bundesamt (9.03.2023) Stromerzeugung 2022: Ein Drittel Kohle, ein Viertel aus Windkraft [online] [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23\\_090\\_43312.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/03/PD23_090_43312.html) [abgerufen am 27.04.2023]

Statista Research Department (14.04.2023) Bruttostromverbrauch in Deutschland 2022[online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256942/umfrage/bruttostromverbrauch-in-deutschland/> [abgerufen am 27.04.2023]



---

Statista Research Department (14.04.2023) Produktion und Verwendung von Wasserstoff weltweit im Jahr 2019 [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1195241/umfrage/produktion-und-verwendung-von-wasserstoff-weltweit/> [abgerufen am 27.04.2023]

Statista Research Department (14.04.2023) Durchschnittlicher Preis für Dieseldieselkraftstoff [online] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/779/umfrage/durchschnittspreis-fuer-dieseldieselkraftstoff-seit-dem-jahr-1950/> [abgerufen am 25.04.2023]

Siedenbidel Christian, Papon Kerstin (11.01.2023) Wie entwickelt sich der Ölpreis? [online] <https://www.faz.net/aktuell/finanzen/oelpreis-prognose-fuer-2023-oel-embargo-zeigt-erster-wirkungen-18594861.html> [abgerufen am 23.05.2023]

Umweltbundesamt (16.02.2023) Windenergie an Land [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie-an-land#flaeche> [abgerufen am 30.04.2023]

Umwelt Bundesamt (09.08.2022): Wasserstoff im Verkehr [online] <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/kraftstoffe-antriebe/wasserstoff-im-verkehr-haeufig-gestellte-fragen#einleitung> [abgerufen am 02.05.2023]

Persönliche Informationen:

Persönliches Gespräch Klaus Senghass, Market Leader Alternativ Fuels bei New Holland, 2022

Persönliches Gespräch Helai Haniss, Bauer Kompressoren, 2022



**Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich, Stefan Furmella, an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Bachelorarbeit in der Hochschulbibliothek eingestellt wird.

Stefan Furmella

Putzar, 29.05.2023