KTBL

Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen

Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen

Henning Eckel | Edgar Remmele | Ludger Frerichs | Johannes Hipp | Franziska Müller-Langer | Jörg Schröder

Herausgeber
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) | Darmstadt

Fachliche Begleitung

KTBL-Arbeitsgruppe „Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen"

Prof. Dr. Christian Beidl | Johannes Buhl | Henning Eckel | Prof. Dr. Ludger Frerichs | Dr.-Ing. Paul Grzeschik | Dr.-Ing. Johannes Hipp | Helge Jahn | Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer | Sabrina Reckziegel (Gast) | Dr. Edgar Remmele | Dr.-Ing. Magnus Schmitt | Jörg Schröder | Jens Stalter

Bitte zitieren Sie dieses Dokument bzw. Teile daraus wie folgt:
KTBL (2023): Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

© KTBL 2023

Herausgeber und Vertrieb
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 7001-0 | E-Mail: ktbl@ktbl.de
vertrieb@ktbl.de | Telefon Vertrieb +49 6151 7001-189
www.ktbl.de

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Titelfoto
© KTBL | Jonas Groß

Druck und Bindung
Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG
Sontraer Straße 6 | 60386 Frankfurt am Main

Vorwort

Vor rund 100 Jahren nahm die Motorisierung der Landwirtschaft Fahrt auf: Traktoren erleichterten die Arbeit und ersetzten fortan immer mehr die Zugkraft von Mensch und Tier.

Mit der Weltwirtschaftskrise ab 1929 wurden die fossilen Kraftstoffe teuer und es begann die Suche nach Alternativen. Versuche mit Holzvergasern wurden gestartet und wenige Jahre später im Zuge des 2. Weltkriegs intensiviert. Das Reichskuratorium für Technik in der Landwirtschaft (RKTL) – der Vorgänger des KTBL – förderte die Anstrengungen, während es parallel für das Deutsche Reich einen Verteilschlüssel für den kontingentierten Dieselkraftstoff erstellte.

Nach 1945 wurden vom westdeutschen Kuratorium für Technik in der Landwirtschaft e.V. Versuche mit Biogas betriebenen Traktoren begleitet. In den Folgejahren gab es keinen Mangel an Diesel auf dem Weltmarkt, Biogasmotoren setzen sich nicht durch. Die Traktorzulassungen erreichten Mitte der 1950er-Jahre ihren Höhepunkt. Ab 1967 profitierte die Landwirtschaft von einer Gasölverbilligung – heute Agrardieselvergütung.

Die Ölpreiskrise ab 1973 veranlasste das KTBL, sich erneut intensiv mit Alternativen zum Diesel zu beschäftigen. In zahlreichen Projekten wurden Möglichkeiten diskutiert, den Bedarf und den Verbrauch von Diesel zu senken. Die Potenziale von Ölsaaten wurden intensiv untersucht.

Warum dieser geschichtliche Exkurs? Er zeigt, dass fossile Energieträger seit Anbeginn der Motorisierung in der Landwirtschaft hinterfragt wurden. Und dies immer dann besonders intensiv, wenn Krisen herrschten.

Aktuell ist es nicht nur die Energiekrise, sondern auch der Klimawandel, der die Branche und mit ihr das KTBL veranlasst, Alternativen zu fossilen Energieträgern zu suchen: 2013 hat das KTBL mit dem Technologie- und Förderzentrum Straubing (TFZ) ein Fachgespräch zu alternativen Energieträgern und Antriebskonzepten ausgerichtet; 2020 und 2022 folgten weitere Veranstaltungen. Aus diesen Projekten ist die KTBL-Arbeitsgruppe „Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen" hervorgegangen, die mit dieser Sonderveröffentlichung den mit der Thematik befassten Ministerien – aber auch Vertreterinnen und Vertretern von Industrie, Verbänden und Forschungseinrichtungen – ihr Ergebnis vorlegt.

Den Mitgliedern der Arbeitsgruppe sowie allen Autorinnen und Autoren danke ich für ihre ehrenamtliche Arbeit, durch die diese Veröffentlichung möglich wurde. Sie stimmt mich zuversichtlich, dass wir in der Klimakrise den Bedarf an fossilem Dieselkraftstoff und die Emissionen nachhaltig senken können. Um dem Inhalt dieser Schrift etwas vorwegzugreifen: Technisch ist das machbar.

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Dr. Martin Kunisch
Hauptgeschäftsführer

Darmstadt, Oktober 2023

Inhalt

Zusammenfassung 5

1 Einführung 8

2 Status quo und Perspektive 9
2.1 Technische Entwicklung von landwirtschaftlichen Maschinen 9
2.2 Kraftstoffbedarf für die landwirtschaftliche Produktion 12
2.3 Leistungsanforderungen an landwirtschaftliche Maschinen 15
2.4 Bereitstellung von Energieträgern und elektrischer Energie 16
2.5 Kosten klimafreundlicher Antriebssysteme 22
2.6 Maschinenbestand 23
2.7 Endenergiebedarf und damit verbundene Treibhausgasemissionen 25
2.8 Rechtlicher Rahmen 27
2.9 Eignung und Verfügbarkeit von Energieträgern und Antriebstechniken für landwirtschaftliche Maschinen 29
2.10 Szenarien für die Entwicklung des Bedarfs an Energieträgern in der Landwirtschaft 33
2.11 Entwicklungstrends der Landwirtschaft 34

3 Handlungsoptionen 36

4 Kommunikation und Wissenstransfer 40

Literatur 43

Abkürzungen 45

Glossar 47

Mitwirkende 48

Zusammenfassung

In der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland wurden im Durchschnitt der Jahre 2016 bis 2020 jährlich etwa 2,1 Milliarden Liter Kraftstoff verbraucht, was einem Energieäquivalent von 74,4 PJ entspricht. Abzüglich des geschätzten Anteils von 12 % aus der Forstwirtschaft reduziert sich das Energieäquivalent der in der Landwirtschaft eingesetzten Kraftstoffe auf rund 66 PJ/a. Dabei wurde nahezu ausschließlich fossiler Dieselkraftstoff der Qualitäten B7 oder B0 eingesetzt. Aus diesem Dieselkraftstoffverbrauch sind dem deutschen Treibhausgasinventar Landwirtschaft jährlich mindestens 3,8 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid(CO_2)-Äquivalente zuzuordnen. Die Treibhausgasemissionen aus der Dieselkraftstoffnutzung müssen innerhalb der nächsten 20 Jahre, spätestens bis zum Jahr 2045, dem Zieljahr für eine bundesweite Treibhausgasneutralität, auf „null" reduziert werden. Dies kann durch Kraftstoffeinsparung und durch die Substitution von fossilem Kraftstoff durch erneuerbare Antriebsenergien geschehen.

Landmaschinen – von Traktoren über Erntemaschinen bis zu Futtermischwagen

Mobile Landmaschinen werden für den jeweiligen Einsatzzweck konzipiert und ihre Ausführung wird dabei vor allem durch die landwirtschaftlichen Gegebenheiten und Anforderungen bestimmt. Dadurch grenzen sie sich von Fahrzeugen für die reine Nutzung im Straßenverkehr ab. Zu den landwirtschaftlichen Maschinen zählen universelle mobile Zugmaschinen wie Traktoren und spezialisierte selbstfahrende Arbeitsmaschinen wie Mähdrescher. Hinzu kommen Transportfahrzeuge, Fahrzeuge für Lade- und Umschlagarbeiten, wie Teleskop- und Hoflader, sowie Maschinen, die in der Tierhaltung Verwendung finden, wie z. B. Futtermischwagen. Die Maschinen unterscheiden sich im Wesentlichen hinsichtlich des Einsatzzwecks und damit verbunden der Leistung, die sie erbringen können, des Einsatzortes, ob nahe am oder weiter entfernt vom Hof, und der Häufigkeit der Nutzung, die zwischen täglich und saisonal sowie zwischen wenige Stunden am Tag bis zu 24 Stunden bei Ernteeinsätzen variieren kann. Davon abhängig sind die Energiemengen, die für die Verrichtung der Arbeit auf den jeweiligen Maschinen mitgeführt werden müssen und die Zeiträume, die für das Betanken oder Stromladen zur Verfügung stehen.

Maschinenbestand und Neuzulassungen

Das Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) beziffert den Bestand landwirtschaftlicher Zugmaschinen (Traktoren) in der Haltergruppe „Land- und Forstwirtschaft, Fischerei" zum 1. Januar 2022 auf rund 340.000 Maschinen. Dazu kommen noch gewerblich zugelassene Traktoren, beispielsweise von landwirtschaftlichen Dienstleistern. Eine eigene Fahrzeugklasse bilden selbstfahrende Arbeitsmaschinen, zu deren Bestand vom KBA keine Zahlen veröffentlicht sind. Ein nicht unerheblicher Anteil der Maschinen ist deutlich älter als 10 Jahre. Im Schnitt werden jährlich rund 32.000 Traktoren neu zugelassen. Aufgrund der langen Einsatzdauer der Maschinen ist es erforderlich, nicht nur für Neumaschinen, sondern auch für Bestandsmaschinen Lösungen für die Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien zu schaffen.

Landwirtschaft im Wandel

Aktuelle Entwicklungen deuten auf einen Rückgang des Tierbestands hin, auf eine zunehmende Anzahl von Feldüberfahrten für Pflegemaßnahmen bei der Flächenbewirtschaftung als Folge einer Reduzierung von Pflanzenschutzmitteln, größere Hof-Feld-Entfernungen und auf eine zunehmende Nutzung autonomer Systeme. Die meisten Veränderungen nehmen Einfluss auf den Energiebedarf für den Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen. Eine gesicherte Aussage, wie dieser sich bis 2045 verändern wird, ist gegenwärtig aber nicht zu treffen.

Die Vielfalt landwirtschaftlicher Arbeiten erfordert angepasste Antriebsenergien

Ein Viertel des Kraftstoffverbrauchs mobiler Maschinen entfällt aktuell auf die Tierhaltung und drei Viertel auf die pflanzliche Erzeugung. Innerhalb der pflanzlichen Erzeugung wird jeweils rund ein Drittel des Kraftstoffs für die Verrichtung leichter Arbeiten mit einem Kraftstoffverbrauch von weniger als 5 l/ha, für mittelschwere Arbeiten mit einem Kraftstoffverbrauch zwischen 5 und 15 l/ha und für schwere Arbeiten mit einem Kraftstoffverbrauch von mehr als 15 l/ha aufgewendet. Aus dieser Verteilung des bisherigen Kraftstoffeinsatzes lässt sich, unter Berücksichtigung der geringeren Verluste der 2045 zu erwartenden elektrischen Antriebe, ein Energiebedarf von 10 bis 15 PJ für die elektrifizierten Maschinen ableiten. Zusätzlicher Energiebedarf in vor- und nachgelagerten Prozessen bleibt dabei unberücksichtigt. Weitere 30 bis 42 PJ müssen 2045 weiterhin in Form nachhaltiger Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren bereitgestellt werden. Der Gesamtenergiebedarf für den Antrieb landwirtschaftlicher Maschinen lässt sich für das Jahr 2045 mit 45 bis 52 PJ abschätzen, was einer Reduktion um rund 22 bis 33 % gegenüber dem heutigen Energieeinsatz entspricht. Dazu kommen mögliche Effizienzgewinne durch optimierte Antriebe und veränderte Produktionsverfahren.

Für die Bereitstellung von erneuerbaren Antriebsenergien gibt es eine Vielzahl technologischer Pfade, die zum Teil synergistisch verknüpft sein können und einen unterschiedlichen Technologie- und Kraftstoff-Reifegrad aufweisen. Die Verfügbarkeit von erneuerbaren Kraftstoffen für die Landwirtschaft ist daher im Einzelfall unter Berücksichtigung von Nachfragekonkurrenzen aus anderen Verkehrssektoren zu bewerten. Die Landwirtschaft kann bei der Bereitstellung von Antriebsenergie mit selbst erzeugtem erneuerbarem Strom und auch eigenen Agrarrohstoffen und Agrarreststoffen an der Herstellung von pflanzenölbasierten Kraftstoffen und Methan partizipieren. Zum Teil fallen bei der Kraftstofferzeugung wertvolle Koppelprodukte an. Es besteht die Chance, auf Basis einer regionalen Kreislaufwirtschaft bei der Erzeugung und Nutzung von erneuerbaren Antriebsenergien in der Landwirtschaft einen signifikanten Anteil zu einer importunabhängigen Energieversorgung zu leisten. Dadurch kann die Resilienz der Nahrungsmittelproduktion gesteigert werden.

Kraftstoffe müssen Qualitätsanforderungen erfüllen, die, wie das Inverkehrbringen, in der 10. BImSchV (2010) geregelt sind. Ausnahmen für die Nutzung in eigenen Fahrzeugen sind bei Vorliegen der Typgenehmigung durch den Hersteller und bei betriebsinterner Betankungsinfrastruktur nach § 16 möglich. Wichtige Unterscheidungsmerkmale von verschiedenen gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen sowie in einer Batterie gespeichertem elektrischen Strom sind die auf das Volumen und die auf das Gewicht bezogene Energiedichten. Aufgrund des begrenzten Bauraums auf mobilen Maschinen, aber auch aufgrund des Gewichts und der damit verbundenen Gefahr der Bodenverdichtung, ist die Energiedichte häufig limitierender Faktor für die Nutzung bestimmter Antriebsenergien in spezifischen Arbeitsmaschinen. Eine geringe gravimetrische und volumetrische Energiedichte weist elektrische Energie, gespeichert z. B. in Lithium-Ionen-Akkus, auf. Die volumetrische Energiedichte gasförmiger Kraftstoffe liegt deutlich unter der von flüssigen Kraftstoffen. Weitere Unterschiede bestehen in den human- und umweltgefährdenden Eigenschaften der Energieträger. Zudem unterscheiden sich die Antriebsenergien in den Gestehungskosten und schließlich auch in den Marktpreisen. Marktpreise für erneuerbare Antriebsenergien sind dabei nicht nur durch den Wettbewerb beeinflusst, sondern auch durch politisch gesetzte Rahmenbedingungen wie Energiesteuer, Mehrwertsteuer, CO_2-Bepreisung, Treibhausgas-Quotenhandelserlöse usw.

Für eine ökonomische Betrachtung schlagen neben den Betriebskosten der Maschine auch die Investitions- oder Umrüstkosten für die Maschinen sowie Lade- und Betankungsinfrastruktur zu Buche.

Fazit und Handlungsoptionen

Die Autoren haben Antriebssysteme mit unterschiedlichen Antriebsenergien für den Einsatz in der Landwirtschaft für das Jahr 2030 und perspektivisch für 2045 anhand von 12 Kriterien in einer fünfgliedrigen Abstufung bewertet. Dies führte zu folgendem Ergebnis:

- Eine Elektrifizierung des Antriebs von Maschinen für leichte Arbeiten, gegebenenfalls auch für schwere, aber zeitlich eng begrenzte Arbeiten, ist bereits bis 2030 für Neufahrzeuge anteilig möglich, sodass die Maschinen für diese Arbeiten bis 2045 nahezu vollständig elektrifiziert werden könnten. Durch die geringeren Verluste im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Antrieben lässt sich allein dadurch der Energiebedarf für mobile Maschinen in der Landwirtschaft insgesamt um etwa 22 bis 33 % senken.
- Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel können sich langfristig als die bevorzugten und geeigneten Energieträger für die nicht elektrifizierbaren Arbeiten, wie mittelschwere bis schwere sowie zeitintensive Arbeiten, erweisen. Eine überbordende Produktion von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse aufgrund der Nachfrage aus der Landwirtschaft, die zu unerwünschten Landnutzungsänderungen führen könnte, ist nicht zu befürchten, da die Verbrauchsmengen im Sektor bekannt und in Relation zu anderen Verkehrssektoren vergleichsweise niedrig sind. Zudem werden durch die Elektrifizierung, z. B. von Personenkraftwagen, künftig signifikante Mengen an Biokraftstoffen zur Beimischung nicht mehr benötigt und könnten gezielt im Sektor Landwirtschaft als Reinkraftstoffe Dieselkraftstoff ersetzen.
- Paraffinische Dieselkraftstoffe wie HVO-Diesel und Fischer-Tropsch-Diesel aus Biomasse (BtL) oder auf Basis elektrischer Energie (PtL) sind sehr gut geeignete erneuerbare Energieträger für heutige dieselbetriebene Bestandsfahrzeuge. Neufahrzeuge sollten vorzugsweise mit den in der Landwirtschaft regional gut verfügbaren Kraftstoffen betrieben werden, um die Konkurrenz um paraffinische Kraftstoffe zu entschärfen und die Vorteile zu nutzen, die sich durch Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel für die Landwirtschaft ergeben können.
- Erneuerbares komprimiertes Methan (CNG) und verflüssigtes Methan (LNG) werden vor allem bei landwirtschaftlichen Betrieben mit eigener oder mit nahegelegener Biomethananlage, im Falle des LNG mit Verflüssigungsanlage, als sinnvolle Alternative bewertet, eine flächendeckende Anwendung ist jedoch aufgrund der auch perspektivisch geringen Versorgungsdichte nicht möglich. Wasserstoff in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen in der landwirtschaftlichen Anwendung sind aus heutiger Sicht noch keine bevorzugten Optionen.

Um die Umstellung von fossilen Energieträgern auf Antriebssysteme mit erneuerbaren Antriebsenergien in Landmaschinen einzuleiten und zu forcieren, ist umgehendes Handeln erforderlich. Von Seiten der Politik sollten Zwischenziele vereinbart und kommuniziert sowie ein Monitoring aufgebaut werden. Die lange Lebensdauer der landwirtschaftlichen Maschinen bedingt, dass die Fahrzeugflotte nur langsam ausgetauscht wird. Damit muss im Umkehrschluss in vielen Fällen die nächste Kaufentscheidung auf eine Maschine fallen, die mit klimafreundlichen Energieträgern betrieben werden kann. Von den Marktbeteiligten werden für das Gelingen eines Markthochlaufs langfristige Planungssicherheit durch stabile Rahmenbedingungen eingefordert. Als Leitplanken für ein künftiges Handeln können sich Instrumente mit ökonomischer Auswirkung wie Emissionshandel, Steuern, Abgaben und Investitionsförderung, aber auch politische Vorgaben sowie die Transformation flankierende Maßnahmen wie Best-Practice-Beispiele und Wissenskommunikation erweisen. Diese Instrumente und Maßnahmen sollten bei den Marktakteuren nicht zu einer Mehrung bürokratischer Abläufe führen, sondern es sollte im Gegenteil ein Bürokratieabbau angestrebt werden.

1 Einführung

Klimaschutz ist eine der zentralen Aufgaben unserer Gesellschaft. Um die Ziele zur Minderung von Treibhausgasmissionen zu erreichen, müssen auch die in der Landwirtschaft eingesetzten Maschinen künftig ohne fossilen Dieselkraftstoff betrieben werden. Die Möglichkeiten, die sich dazu bieten, werden in der vorliegenden Veröffentlichung beschrieben und mit Blick auf ihren Entwicklungsstand und die Umsetzbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis bewertet – dies schließt Maschinen im Garten- und Weinbau mit ein. Damit wird allen beteiligten Akteuren aus Politik, landwirtschaftlicher Praxis und Beratung, Forschung, Entwicklung und Handel ein Handlungsleitfaden für den Weg hin zur Nutzung erneuerbarer, klimafreundlicher Antriebsenergien zur Verfügung gestellt.

Für den sinnvollen Einsatz von Energieträgern und den dazugehörigen Antriebssystemen in der Landwirtschaft müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein. So müssen Systeme mit erneuerbaren Antriebsenergien jetzigen und künftigen Funktions- und Leistungsanforderungen hinsichtlich Bewirtschaftungsformen, Betriebsstrukturen und Betriebsgrößen an die landwirtschaftlichen Maschinen genügen. Zudem müssen sie praxisgerecht, also auf den landwirtschaftlichen Betrieben und bei landwirtschaftlichen Dienstleistern nutzbar sein. Auch dürfen die Kosten den für die landwirtschaftlichen Akteure realistischen Rahmen nicht sprengen. Darüber hinaus müssen die gewählten Antriebssysteme eine hohe Resilienz der Nahrungs-, Rohstoff- und Energieproduktion gewährleisten. Dazu zählt auch die Ausschöpfung von Möglichkeiten zur Selbstversorgung mit Energie bzw. Energieträgern zur Verringerung der Importabhängigkeit und die Integration der Bereitstellung von Energieträgern in die Wertschöpfungsketten im Sinne der Bioökonomie. Zentrale Voraussetzung ist, dass die Lösung den nationalen Klimaschutzzielen für den Sektor Landwirtschaft dient.

Der Umstieg auf klimafreundliche Antriebssysteme hat vielfältige Auswirkungen auf die Landwirtschaft, aber auch auf die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen, wie sie in der Agenda 2030 festgelegt sind (Vereinte Nationen 2015). Alle Lösungsansätze, die in Betracht gezogen werden, müssen diese Ziele fördern. Neben dem Nachhaltigkeitsziel „Maßnahmen zum Klimaschutz" (Ziel 13) sind weitere Ziele der Agenda 2030 eng mit der Frage der Energieversorgung mobiler Maschinen verknüpft. Dazu zählen insbesondere

- der Zugang zu bezahlbarer und sauberer Energie (Ziel 7),
- Innovationen in der Industrie und eine leistungsfähige Infrastruktur (Ziel 9) sowie
- eine nachhaltige und effiziente Nutzung natürlicher Ressourcen (Ziel 12).

2 Status quo und Perspektive

2.1 Technische Entwicklung von landwirtschaftlichen Maschinen

Landwirtschaftliche Maschinen werden für den jeweiligen Einsatzzweck konzipiert. Ihre Gestaltung ist beeinflusst durch die landwirtschaftlichen Gegebenheiten und Anforderungen, die technischen Möglichkeiten und die regulatorischen Rahmenbedingungen. Der Einsatz richtet sich nach der jeweiligen betrieblichen Ausrichtung – wie Ackerbau, Tierhaltung, Gartenbau, Obst- und Weinbau – mit den zugehörigen Verfahrensketten und durchzuführenden Prozessen. Die Technik orientiert sich an der Funktionalität, am Zusammenwirken mit Anwender und Umgebung sowie an der gesamtheitlichen Wirtschaftlichkeit.

Es finden sich auf den Betrieben sehr unterschiedliche universelle wie auch anwendungsspezifische Maschinenkonzepte. Diese lassen sich im Wesentlichen gliedern in

- selbstfahrende Arbeitsmaschinen (z. B. Mähdrescher oder Futtermischwagen),
- mobile Antriebs- und Zugmaschinen (v. a. Traktoren),
- extern angetriebene Maschinen (z. B. Sämaschinen oder Mähwerke) und
- Trägerfahrzeuge (z. B. Überladefahrzeuge).

So verschieden wie die Maschinen, so verschieden sind auch deren Antriebsstrangkonzepte. Übergeordnet betrachtet, setzen sich diese zusammen aus der maschinenseitigen Bereitstellung der Nutzenergie (Energiespeicher und Wandler zusammengefasst), der Energieübertragung und gegebenenfalls weiterer Wandlungsstufen sowie der Verwendung für Arbeits-, Fahr- und Hilfsfunktionen (Abb. 1).

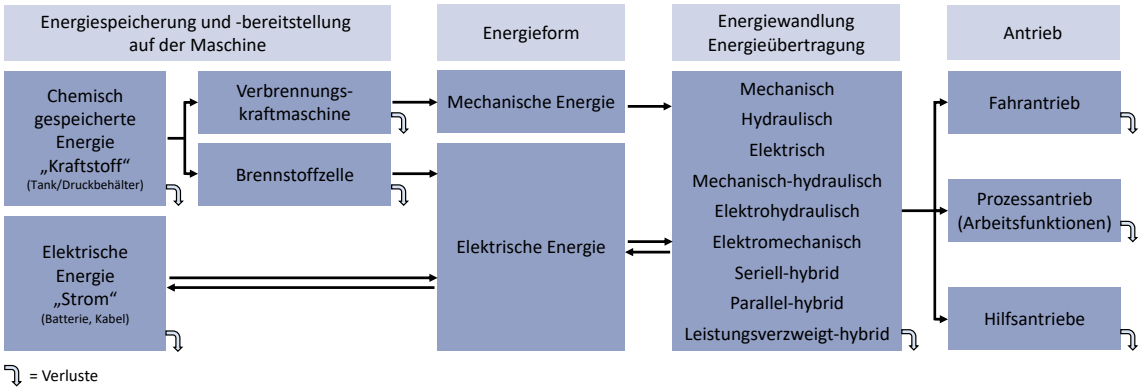


Abb. 1: Struktur und Übersicht von Antriebsstrangkonzepten für mobile Arbeitsmaschinen wie sie in der Landwirtschaft zur Anwendung kommen (© L. Frerichs, verändert)

Auch wenn entwicklungsmethodisch Baukasten- und Modulkonzepte angestrebt werden, so bestimmen doch vorrangig die spezifischen Prozessaggregate einerseits und die primäre Energiebereitstellung anderseits die jeweiligen Grundkonzepte der Antriebssysteme und der Maschinen. In KTBL (2020), Frerichs und Buck (2022) und Geimer (2020) sind konkrete Ausführungsbeispiele dargestellt.

In heutigen Landmaschinen finden sich überwiegend Verbrennungsmotoren mit einem Kraftstofftank als Energiespeicher, ausreichend für mindestens einen Arbeitstag. Der flüssige Energieträger kann – unter Rückgriff auf technische Hilfsmittel – zum Nachfüllen an den Einsatzort transportiert werden. Die Möglichkeit, große Energiemengen mitzuführen in Verbindung mit einer immer effizienteren Prozess- und Maschinentechnik, hat es erlaubt, mit dem kontinuierlichen Produktivitätszuwachs in der Pflanzenproduktion Schritt zu halten. Dies findet sichtbaren Ausdruck in den leistungsstarken und effizienten Maschi-

nen, die heute für die Sicherstellung der Produktion von Lebensmitteln und Rohstoffen notwendig sind. Darüber hinaus ist die Landwirtschaft geprägt von einer Vielzahl mittlerer und kleinerer Landmaschinen und Traktoren. Während stationäre Maschinen der Innenwirtschaft in dieser Kategorie weitgehend elektrifiziert worden sind, haben für mobile Maschinen Verfügbarkeitsgründe und wirtschaftliche Gründe fast immer zu Antriebssystemen mit Verbrennungsmotoren geführt. Alternativen wie elektrische Antriebe, für die es zwar immer wieder Lösungsansätze gab, konnten aber in der Vergangenheit nicht mit den Energie- und Kraftdichten verfügbar gemacht werden, als dass sie in der Landwirtschaft wettbewerbsfähig sein konnten.

In mobilen Maschinen kommen überwiegend Dieselmotoren zur Anwendung. Aufgrund der höheren Effizienz gegenüber anderen Motorkonzepten, aber auch wegen des günstigen Drehmomentverhaltens und aus weiteren Gründen wird diese Motorenart bevorzugt. Der Aufwand für die immer effizientere Schadstoffemissionsminderung hat zu einer Systemverteuerung geführt und wirkt sich vor allem bei kleinen Motorleistungen übermäßig aus.

Standardkraftstoff ist bislang der fossile Diesel mit seiner hohen Energiedichte. Diesen ersetzen zu wollen, hat eine lange Geschichte und die Motorenentwicklung immer begleitet. Die verschiedenen alternativen Kraftstoffe und deren Verfügbarkeit werden in Kapitel 2.4 behandelt. Wichtig zu erkennen ist, dass nicht alle Kraftstoffe für alle Motorbauarten und Einspritzsysteme gleichermaßen geeignet sind. So sind üblicherweise für gasförmig eingespeiste Kraftstoffe wie Erdgas oder auch Wasserstoff Ottomotoren erforderlich. Viele biobasierte Kraftstoffe in den unterschiedlichen Aufbereitungsformen (Biodiesel, HVO-Diesel, Pflanzenölkraftstoff) sind für Dieselmotoren geeignet. Es gibt zudem diverse technische Entwicklungen, die – mehr oder minder aufwendig – bivalente Betriebsformen ermöglichen, d. h. mehrere Kraftstoffe können alternativ oder gleichzeitig verwendet werden (KTBL 2020).

Durch die Fokussierung bei landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen auf ein Motorkonzept und eine Kraftstoffart haben sich wesentliche systemische Vorteile eingestellt. Motoren werden produkt- und marktübergreifend entwickelt und in großer Stückzahl produziert, effiziente und schnelle Servicenetze sind installiert und für den landwirtschaftlichen Betrieb ist die Energieinfrastruktur technisch und wirtschaftlich handhabbar.

Synthetische Kraftstoffe können in den Aggregatzuständen flüssig oder gasförmig und für Diesel- und Ottomotoren hergestellt werden. Für den Dieselmotor geeignete flüssige synthetische Kraftstoffe würden motor- und maschinentechnisch den geringsten Anpassungsaufwand erfordern, wären kompatibel mit Bestandsmaschinen und würden bei Verfügbarkeit eine zügige Defossilisierung ermöglichen.

Unter der Voraussetzung, dass Wasserstoff auch für die Landwirtschaft in ausreichendem Umfang verfügbar gemacht werden könnte, wäre die Nutzung in Verbrennungsmotoren und Brennstoffzellen möglich. Für beide Wege laufen Arbeiten in Forschung und Entwicklung. Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff zu betreiben, ist weit entwickelt – Gaswechselvorgänge und Materialfragen sind aktuell noch Gegenstand der Forschung. Der Antriebsstrang hinter dem Motor muss nicht umfangreich adaptiert werden. Maschinenseitig ist eher die Wasserstoffspeicherung, also das Tankkonzept und die Unterbringung der Tanks, die komplexeste Aufgabe. Serientaugliche Tankkonzepte (Druck, Kühlung, Materialien usw.) und Betankungskonzepte (Tankstelle, Feldbetankung usw.) sind noch zu entwickeln, ebenso wie die Integration von Wasserstofftanks in den verfügbaren Bauraum der Maschinen noch zu optimieren ist. Es ist zu erwarten, dass sich durch die geringere Energiedichte kürzere tägliche Nutzungsdauern und längere Tankzeiten ergeben. Die Auswirkungen und Anpassungen in Technik und Verfahren sind noch unklar. Darüber hinaus sind Fragen zur Funktion und Sicherheit zu klären sowie zum Entweichen von Wasserstoff während längerer Standzeiten von Landmaschinen.

Diese offenen Punkte der Wasserstoffspeicherung treffen gleichermaßen für die Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellensystemen zu. Außerdem wäre in den Landmaschinen, wo Verlustwärme wegen des fehlenden Fahrtwinds – anders als beim Lkw – aktiv abgeführt werden muss, noch ein den Temperaturniveaus und den landtechnischen Umgebungsbedingungen angepasstes Kühlsystem unterzubringen. Des Weiteren wirkt Ammoniak, wie es in der Stallluft vorkommt, lebensdauerreduzierend auf Brennstoffzellen, auch dies muss technisch berücksichtigt werden. Eine aktuelle Begrenzung liegt zudem noch in der Leistungsfähigkeit üblicher Protonenaustauschmembran(PEM)-Brennstoffzellensysteme. Werden mehr als 150 bis 200 kW an Leistung benötigt, sind aktuell mehrere einzelne Brennstoffzellensysteme zu kombinieren.

Da Brennstoffzellen die Nutzenergie auf der Maschine in elektrischer Form bereitstellen, liegt ein weiterer wesentlicher Unterschied zu konventionellen Systemen in der erforderlichen Elektrifizierung des nachfolgenden Antriebsstrangs. Auf die Komplexität, dass Prozess-, Fahr- und Hilfsantriebe zu versorgen und zu regeln sind, wurde eingangs hingewiesen. Das heißt daher auch, dass hier für jede einzelne Landmaschine, ob Traktor, Mähdrescher oder Futtermischwagen, eine individuelle Lösung zu schaffen ist. Die Entwicklungszyklen liegen bei Landmaschinen häufig bei 8 Jahren, die Entwicklungsdauern oft bei 3 bis 5 Jahren. Mit einer signifikanten Marktdurchdringung kann daher erst in den 2030er-Jahren gerechnet werden.

Diese Aussagen gelten generell und gleichermaßen für die anderen Antriebssysteme, in denen Energie in elektrischer Form bereitgestellt oder in einem Speicher mitgeführt wird. Am bekanntesten sind neben den Brennstoffzellen die batterieelektrischen Systeme. Es gibt zudem Konzeptstudien zu via Kabel direkt versorgte mobile Landmaschinen. Aufgrund der geringen Energiedichte sind im landwirtschaftlichen Umfeld Batterien in der Nutzbarkeit zwar eingeschränkt, aber es sind bereits heute erfolgversprechende Entwicklungen vor allem bei Maschinen kleiner bis mittlerer Leistung, aktuell bis ca. 100 kW, zu sehen. Maschinen, die vom Einsatzprofil her nicht dauerhaft große Energiemengen benötigen und daher Ladezeiten vorhanden sind, z. B. bei Futtermischwagen zwischen Fütterungszeiten, oder die nahe am Betriebshof eingesetzt werden und daher zum Laden oder zum Batteriewechsel nur kurze Strecken zurückzulegen müssen, sind sehr gut für diese Umstellung geeignet. Sie bringen auch diverse Vorteile mit sich, wie das Ausbleiben lokaler Luftschadstoffemissionen.

Anders sieht das bei Maschinen aus, die beispielsweise für die Feldarbeit kontinuierlich hohe Leistungen liefern müssen. Hier wären die erforderlichen Batteriegrößen vom Bauraum und von den Gewichten her nicht handhabbar. Dies gilt auch hinsichtlich der Ladezeiten. Ob Batteriewechselsysteme hier Abhilfe schaffen können, ist Gegenstand von Untersuchungen. Hierfür müssten nicht nur die Maschinen, sondern auch die Infrastruktur, die Logistik und in der Konsequenz das Produktionssystem angepasst werden. Umfängliche systemische Entwicklungen dieser Art wären ebenfalls für die Einführung von kabelgebundenen Maschinen erforderlich. Solche Systeme sind prinzipiell aus dem Bergbau bekannt. Innovative Lösungen für die Anwendung in der Landwirtschaft werden gegenwärtig hinsichtlich technischer Realisierbarkeit, Akzeptanz und Nachhaltigkeit untersucht.

Hybride Kombinationen verschiedener Energieformen, -speicher und -wandler sind konzeptionell auch für Landmaschinen denkbar. Sie finden bislang aber wenig Anwendung, weil häufig das Potenzial für die Rekuperation, die Rückgewinnung eingesetzter Energie, und damit ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit fehlt. Ansätze, wie sie für elektrifizierte Lkw untersucht werden, die Reichweite und Einsatzbarkeit durch Range-Extender zu erweitern, könnten bei Übertragbarkeit der Erfahrungen und der Technik gewisse Anwendung finden.

Hinsichtlich der Vielfalt der angedeuteten Lösungsansätze muss auf die reale Umsetzbarkeit geachtet werden. Nicht nur, dass in allen Aspekten der Nachhaltigkeit tragfähige Lösungen geschaffen werden, sondern es müssen die Rahmenbedingungen und Handhabbarkeit gegeben sein. So würde sich nach heutigem Stand auf manchen Betrieben eine Elektrifizierung der Maschinen als nicht umsetzbar erweisen, weil die elektrischen Netze die Leistungsspitzen nicht abdecken könnten.

Insbesondere Traktoren sind universell eingesetzte Maschinen. Eine Elektrifizierung oder der Einsatz alternativer Kraftstoffe setzt hier voraus, dass die breite Funktionalität bei Betrieben erhalten bleibt, die nicht für jede Anwendung eine spezifische Maschine besitzen, sondern den Traktor variabel für eine Vielzahl von Aufgaben einsetzen.

Am konkreten Beispiel mag deutlich werden, dass es nicht handhabbar sein wird, den Hoflader elektrisch, den Futtermischwagen mit Biogas, den Traktor mit synthetischem flüssigem Dieselkraftstoff und den Mähdrescher mit Wasserstoff zu betreiben.

2.2 Kraftstoffbedarf für die landwirtschaftliche Produktion

Der größte Teil des Energiebedarfs in der Landwirtschaft entsteht durch den Einsatz mobiler Maschinen bei der Feldarbeit, beim Transport, bei Umschlagarbeiten und in der Tierhaltung, insbesondere in der Rinderfütterung. Ein kleinerer Teil ist auf Trocknung landwirtschaftlicher Güter und die Wärmebereitstellung für Stallanlagen zurückzuführen. Tabelle 1 zeigt den Dieselbedarf für den Anbau der Hauptkulturen nach KTBL (2022b), aufgeteilt in leichte, mittelschwere und schwere Arbeiten. Die Einteilung erfolgt nach dem Dieselbedarf je Hektar (< 5 l/ha, 5–15 l/ha, > 15 l/ha) für die einzelnen Arbeitsgänge des jeweiligen Produktionsverfahrens. Die betrachteten Kulturen decken rund 90 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland ab.

Tab. 1: Dieselbedarf im Pflanzenbau und in der Tierhaltung

Einsatzgebiet	Anbaufläche 2021	Dieselbedarf[4)]							
		Gesamtbedarf		davon					
				leichte Arbeiten < 5 l/ha		mittelschwere Arbeiten 5-15 /ha		schwere Arbeiten > 15 l/ha	
	1.000 ha	l/ha	1.000 l/a	1.000 l/a	%	1.000 l/a	%	1.000 l/a	%
Pflanzenbau									
Getreide[1)] inklusive Körnermais	6.064	78	476.000	75.000	16	178.000	37	223.000	47
Raps	997	74	74.000	13.000	18	24.000	32	37.000	50
Silomais, Feldgras/ Ackergras	2.543	138	314.000	45.000	14	103.000	33	166.000	53
Ackerkulturen gesamt	**9.604**		**864.000**	**133.000**		**305.000**		**426.000**	
Wiesen und Weiden	4.482	108	485.000	268.000	55	216.000	45		
Summe pflanzliche Erzeugung	**14.086**		**1.349.000**	**401.000**	**30**	**521.000**	**39**	**426.000**	**32**
Summe pflanzliche Erzeugung inklusive Korrektur[2)]			**1.438.000**	**428.000**	**30**	**555.000**	**39**	**454.000**	**32**
Landwirtschaftliche Nutzfläche gesamt	**15.697**								
	%								
Anteil Hauptkulturen an Gesamtanbaufläche	90								

Fortsetzung Tabelle nächste Seite

Einsatzgebiet	Anbaufläche 2021	Dieselbedarf[4]							
		Gesamtbedarf		davon					
				leichte Arbeiten < 5 l/ha		mittelschwere Arbeiten 5–15 /ha		schwere Arbeiten > 15 l/ha	
	1.000 ha	l/ha	1.000 l/a	1.000 l/a	%	1.000 l/a	%	1.000 l/a	%
Tierhaltung									
Futtervorlage Rind			325.000						
Entmistung Rind			60.000						
Einstreuen Rind			33.000						
Summe Tierhaltung[3]			**418.000**						
	%								
Anteil Tierhaltung am Gesamtbedarf	23								
Gesamtbedarf inklusive Korrektur			**1.856.000**						

[1] Winterweizen stellvertretend für alle Getreidearten.
[2] Die Korrektur gleicht den Unterschied zwischen der Berechnung nach KTBL-Planungsdaten und dem über die Steuerrückvergütung erfassten Verbrauch ab.
[3] Der Dieselbedarf in den sonstigen Produktionsrichtungen der Tierhaltung ist gering und bleibt in dieser Berechnung unberücksichtigt.
[4] Abweichungen der Summenwerte durch Rundung sind möglich.

Bezogen auf die landwirtschaftliche Nutzfläche werden 31 % des in der Landwirtschaft eingesetzten Dieselkraftstoffs für schwere Arbeiten verwendet, 39 % für mittelschwere und 30 % für leichte Arbeiten. Werden nur die Ackerflächen betrachtet, steigt der Anteil schwerer Arbeiten auf 49 %, während bei der Grünlandbewirtschaftung schwere Arbeiten in der hier gewählten Definition keine Rolle spielen (Abb. 2).

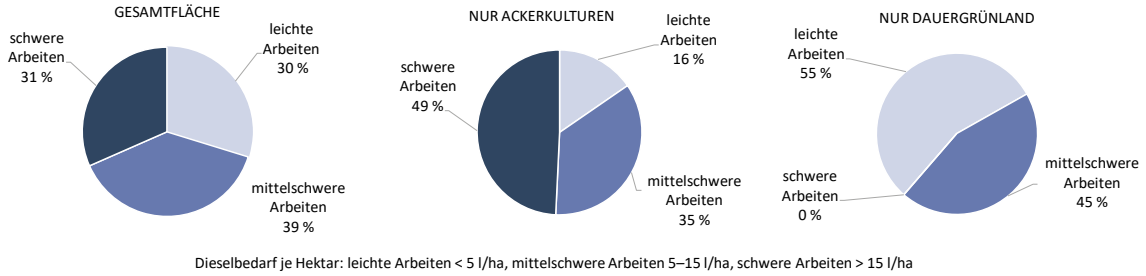


Abb. 2: Verteilung des Dieseleinsatzes nach Arbeitsschwere bei der Bewirtschaftung von Acker- und Grünlandflächen (© KTBL)

In der Tierhaltung entfällt der größte Teil des Dieselbedarfs auf die Futtervorlage, das Einstreuen und die Entmistung in der Rinderhaltung. Hier werden etwa 418.000.000 Liter pro Jahr eingesetzt, dies entspricht 23 % des gesamten Dieselbedarfs der Landwirtschaft. Der hohe Verbrauch ergibt sich durch den täglichen mehrstündigen Einsatz der Maschinen rund ums Jahr.

Abbildung 3 zeigt den Dieselbedarf für typische landwirtschaftliche Arbeitsvorgänge am Beispiel der Erzeugung von Silomais und der Fütterung von Milchvieh einschließlich Einstreuen und Entmisten. Im Unterschied zu Tabelle 1 wird der Dieselbedarf hier auf die Zeit (Liter/Stunde), statt auf die Fläche bezogen.

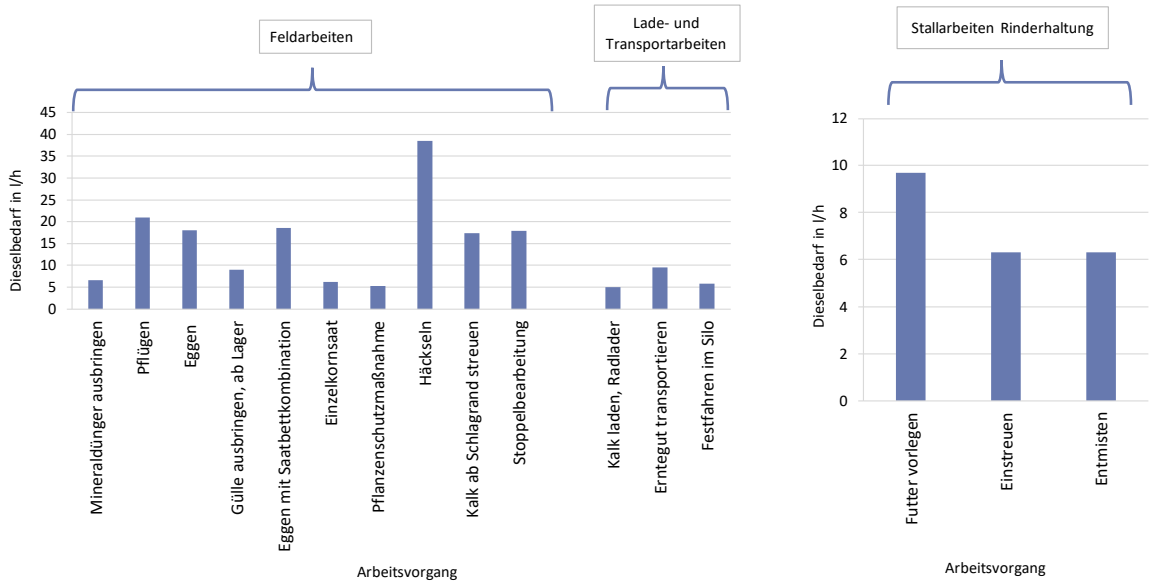


Abb. 3: Dieselbedarf (l/h) für typische Arbeitsvorgänge in der Landwirtschaft am Beispiel der Erzeugung von Silomais (links) (Pflug, gezogene Saatbettbereitung, Saat, Schlaggröße 10 ha, Ertragsniveau mittel, mittlerer Boden, 102-kW-Mechanisierung, Hof-Feld-Entfernung 2 km) und von Stallarbeiten in der Rinderhaltung (rechts) (Boxenlaufstall, Festmist, 120 Kuhplätze) (© KTBL)

Für eine Abschätzung, welche Laufzeiten ohne Nachtanken oder Nachladen mit alternativen Antriebssystemen zur Bewältigung der unterschiedlichen Arbeitsvorgänge machbar wären, muss der Wirkungsgrad der jeweiligen Antriebssysteme und die vorhandene Speicherkapazität auf der Maschine (Tank, Batterie) berücksichtigt werden (KTBL 2020). Einen Vergleich des benötigten Speichervolumens für Energieträger in Relation zu Dieselkraftstoff und unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade der verschiedenen Antriebssysteme zeigt Tabelle 2.

Tab. 2: Benötigtes Speichervolumen und -gewicht für Energieträger im Vergleich zu Dieselkraftstoff

1 l Dieselkraftstoff B7 entspricht 35,6 MJ im Tank und 14 MJ am Rad (Wirkungsgrad Antrieb 32 %)

entspricht

Energieträger	Wirkungsgrad Antrieb %	Energie im Tank MJ	Benötigter Speicher l	Benötigter Speicher kg
Pflanzenölkraftstoff (Dieselmotor)	32	36	1,03	0,95
Biodiesel (Dieselmotor)	32	36	1,09	0,96
HVO (Dieselmotor)	32	36	1,03	0,81
Paraffinischer Dieselkraftstoff (FT-Diesel (Dieselmotor))	32	36	0,99	0,83
CNG, 200 bar (Gas-Otto-Motor)	29[1)]	40[1)]	4,88[1)]	0,79[1)]
LNG, -162 °C (Gas-Otto-Motor)	29[1)]	40[1)]	1,86[1)]	0,79[1)]
Elektrischer Strom (Batterie, Elektromotor)	81	14	12,78	20,08
Wasserstoff, 700 bar (Brennstoffzelle, Elektromotor)	49	23	5,58	0,20

[1)] Werte aktualisiert Februar 2025

Neben der Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien ist auch die Reduktion des Kraftstoffbedarfs ein wesentlicher Hebel zum Klimaschutz in der Landwirtschaft. Im Projekt „EKoTech – Effiziente Kraftstoffnutzung in der AgrarTechnik" wurde der Effekt verschiedener Maßnahmen zur Reduktion des Kraftstoffbedarfs in der Landwirtschaft betrachtet (Götz und Köber-Fleck 2019, Trösken et al. 2020). Wesentliche Einsparpotenziale liegen demnach in der Kombination von Arbeitsgängen, um Überfahrten zu sparen, der Maschineneffizienz, der Optimierung des Zusammenspiels von Zugmaschine und Anbaugeräten sowie in der Maschinenbedienung.

Abbildung 4 beschreibt die Weiterentwicklung der Prozesseffizienz der Maschinen im Vergleich zu 1990 und 2015 sowie Simulationsszenarien für 2030. Die berechneten Simulationsmodelle berücksichtigen sowohl Änderungen in der Betriebsstruktur und der Maschinenausstattung als auch Verfahrensänderungen (z. B. Reduzierung von Bearbeitungstiefen oder Änderung des Pflanzenschutzaufwandes). Für Zukunftsszenarien, die das Jahr 2030 betreffen, sind Annahmen mit beteiligten Landtechnikherstellern und Landwirten der jeweiligen Musterregion getroffen worden. Auch bei konservativen Annahmen werden im Beispiel Rückgänge beim Kraftstoffverbrauch zum Basisjahr 2015 für das Jahr 2030 prognostiziert, die beispielsweise bei der Ernte zwischen 9 und 26 % betragen können.

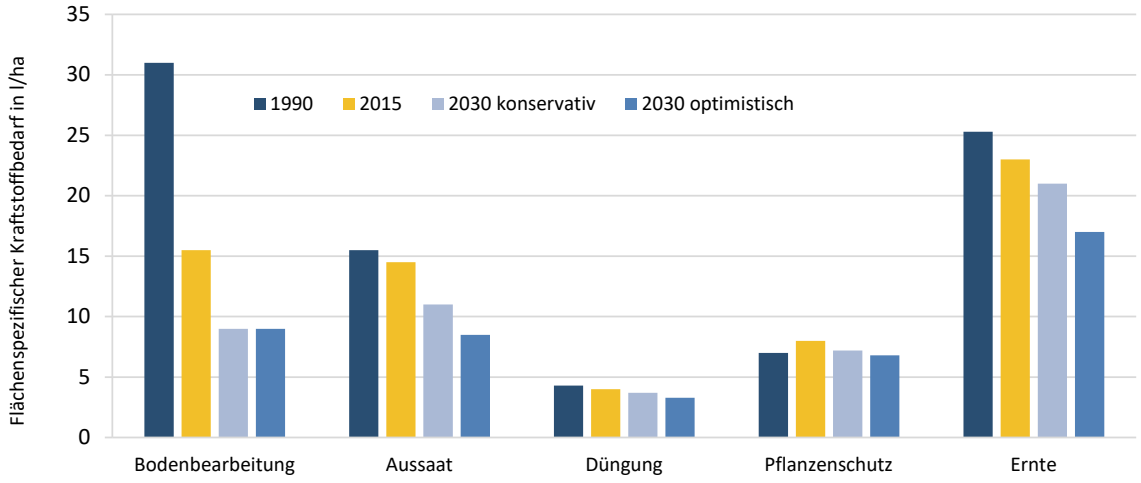


Abb. 4: Flächenspezifischer Kraftstoffbedarf für einzelne Verfahrensschritte des Weizenanbaus in der Region „Südhannover" (Götz und Köber-Fleck 2019, verändert)

2.3 Leistungsanforderungen an landwirtschaftliche Maschinen

Die Leistungsanforderungen an landwirtschaftliche Maschinen sind je nach Einsatzzweck sehr unterschiedlich. Hohe kontinuierliche Leistungen mit entsprechend hohem Energiebedarf werden insbesondere in der Bodenbearbeitung und der Ernte verlangt. Hier müssen Einsatzzeiten von 12 Stunden und mehr gewährleistet werden. Für die termingerechte und produktive Durchführung von Feldarbeit muss eine gewisse energetische Autonomie gewährleistet werden. Die Felder in ländlichen Regionen liegen oft weitab von öffentlicher und betriebseigener Lade- und Betankungsinfrastruktur. Trotzdem muss die Arbeit, der landwirtschaftlichen Notwendigkeit folgend, im richtigen Zeitfenster und dann, falls nötig, pausenlos zu Tag- wie auch zu Nachtzeiten durchgeführt werden.

Durch die engen Zeitfenster für viele landwirtschaftliche Arbeiten und die hohen Kosten, die durch den Maschineneinsatz entstehen, sind Fahrzeiten und Leerlaufzeiten zum Tanken oder Nachladen zu minimieren. Der parallele Einsatz unterschiedlicher Antriebssysteme und Kraftstoffe im landwirtschaftlichen Betrieb erhöht den Aufwand und die Kosten.

In der Tierhaltung und in hofnahen Bereichen sind häufiger Intervallarbeiten zu verrichten, z. B. in der Fütterung von Nutztieren. Hier sind die Leistungsanforderungen im Vergleich zu Feldarbeiten niedriger und längere Zeitfenster zum Tanken oder Laden verfügbar.

2.4 Bereitstellung von Energieträgern und elektrischer Energie

Für die Defossilisierung von Kraftstoffen und elektrischer Energie für Antriebe sind auf Basis von erneuerbaren Ressourcen vielfältige Technologieoptionen möglich. Neben dem direkten Einsatz von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen stehen momentan eine Reihe von flüssigen und gasförmigen Kraftstoffen im Fokus. Diese werden im Regelfall gemeinsam mit anderen in verschiedenen Wertschöpfungsketten nutzbaren Koppel- und Nebenprodukten in erneuerbaren (Bio-)Raffinerien produziert. Eine vereinfachte Übersicht dieser Optionen und möglichen Synergien von biomasse- und strombasierten Technologien zeigt Abbildung 5. Details zu den einzelnen Technologien sind in Schröder und Naumann (2022) zu finden.

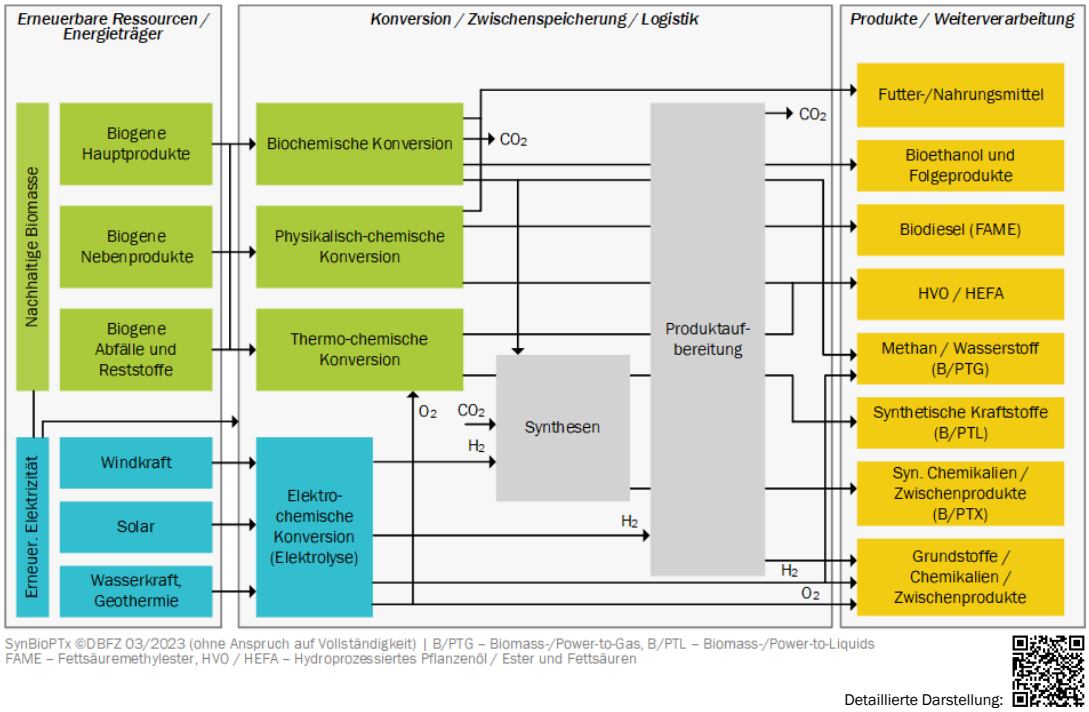


Abb. 5: Vereinfachte Übersicht zu Technologieoptionen und Synergien (© DBFZ)

Ein wichtiger Indikator für die Einordnung des technischen Entwicklungsstandes und damit auch der Verfügbarkeit der jeweiligen Optionen ist der sogenannte „Technology Readiness Level" (TRL). Dieser wurde ursprünglich durch die NASA für die Raumfahrt entwickelt und durch die Internationale Energieagentur (IEA) erweitert. Sollen ebenso Aspekte der Markteinführung inklusive der Kraftstoffzertifizierung und der Prüfung der Eignung für die Anwendung („fit for purpose") abgebildet werden, eignet sich der sogenannte „Fuel Readiness Level" (FRL), der von der Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative (CAAFI) entwickelt wurde. Beide Indikatoren, TRL und FRL, können komplementär verwendet werden, wie Abbildung 6 zeigt.

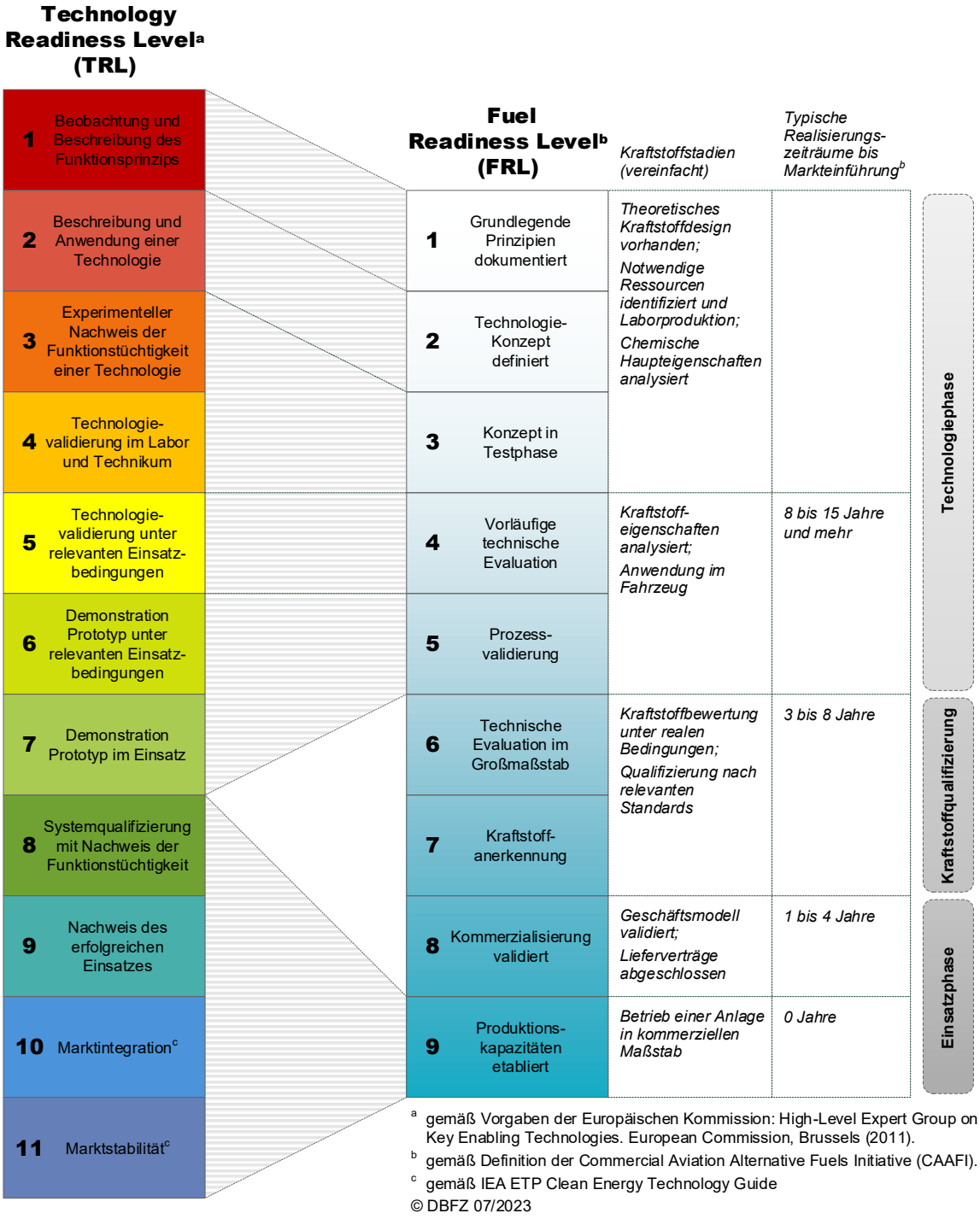


Abb. 6: Übersicht zum Technologie-Reifegrad (TRL) und zum Kraftstoff-Reifegrad (FRL) (© DBFZ)

Damit sich Wertschöpfungsketten ausgehend von den Ressourcen hin zur Anwendung etablieren können, sind infrastrukturelle Voraussetzungen erforderlich. Dies betrifft zahlreiche Aspekte

- der Bereitstellung von Ressourcen (u. a. Erzeugung, Lagerung respektive Speicherung und Transport von Biomasse als erneuerbarer Kohlenstoffträger über Anbaubiomasse sowie Abfall- und Reststoffe oder elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen),
- der Kraftstoffproduktion (u. a. Erzeugung, Lagerung respektive Speicherung und Transport von Prozessenergie und Hilfsmitteln sowie Abwasser und Abfälle),
- der Produktdistribution (u. a. Lagerung respektive Speicherung und Transport für Kraftstoffe, Neben-/Koppelprodukte) und der Produktanwendung (hier Maschinen der Landwirtschaft).

Sowohl die Ressourcen als auch die Produkte sind häufig Teil eines internationalen Handels mit jeweiligen Im- und Exportmöglichkeiten und auch damit verbundenen Chancen und Risiken. Vor dem Hintergrund der weltweit teils anfälligen und unsichereren Lieferketten kommt dem Aspekt der nationalen Versorgungssicherheit eine besondere Bedeutung zu und damit auch den Energieträgern, die regional bereitgestellt und dort auch zum Einsatz kommen können.

Eine Bewertung des Status quo erfolgt für die Produktionstechnologien der geläufigsten erneuerbaren Energieträger in Tabelle 3. Neben erneuerbarem Strom, welcher aktuell nur zu geringen Anteilen im Verkehr eingesetzt wird, sind vor allem Energieträger basierend auf Anbaubiomasse, Abfall- und Reststoffen im Markt etabliert. Elektrolyse-Wasserstoff und Bioethanol aus lignocellulosehaltigen Abfall- und Reststoffen sind auf dem Sprung zur marktrelevanten Produktion. Für alle anderen Optionen sind Anlagen maximal im Demonstrationsmaßstab vorhanden und benötigen für einen Markteintritt entsprechende Investitionen in die Entwicklung. Kurzfristig werden vor allem die Kapazitäten von erneuerbarem Strom und von Kraftstoffoptionen aus fortschrittlichen Ressourcen (Ressourcen nach RED II Anhang IX A (EU RL 2018/2001 2018) stark zuwachsen, erst mittel- bis langfristig zusätzlich strombasierte Optionen (RFNBOs, kurz PtX). Nach aktuellem Stand können die bis 2035 weltweit geplanten Projekte zur Herstellung von strombasierten Kraftstoffen nur einen Bruchteil des Bedarfs allein für Deutschland abdecken (Odenweller und Ueckerdt 2023).

Tab. 3: Einordnung Status quo von erneuerbaren Energieträgern (Schröder und Naumann 2022)

Energieträger/ Energieform	Entwicklungsstand (TRL/FRL)	Derzeitige Anlagenkapazität DE	Derzeitige Anlagenkapazität EU	Kraftstoffnorm	Energiedichte	Klassifizierung als Gefahrstoff
Strom[1)] (Batterie)	11	894 PJ	5.344 PJ	-	Li-Ionen-Batterie 1 MJ/l$_{\text{Akku Li Ionen}}$	
Pflanzenöl	11	188 PJ Raps, Soja Sonnenblume	677 PJ	DIN 51605 (Raps) DIN 51623	35 MJ/l (Raps)	-
Bioethanol (E85)	11 (Saccharide) 8 (Lignocellulose)	23 PJ < 1 PJ	202 PJ 3 PJ	DIN EN 15293	23 MJ/l (E85)	
Biodiesel (FAME)	11 (Pflanzenöle, Rest- und Abfallöle, tierische Fette) 4 (Algen)	144 PJ -	714 PJ -	DIN EN 14214	33 MJ/l	-
Paraffinischer Diesel (HVO)	9–11 (Pflanzenöle, Rest- und Abfallöle, tierische Fette) 4–9 (Algen, Biocrudes wie Tallöl/Pyrolyseöl)	- -	149 PJ -	DIN EN 15940	34 MJ/l	
Paraffinischer Diesel (FT-Diesel)	6–7 (BtL, PtL)	< 1 PJ	< 1 PJ	DIN EN 15940	34 MJ/l	
Methan	9–11 (anaerob/Biogas) 6–7 (BtG, PtG)	36 PJ < 1 PJ	68 PJ -	DIN EN 16723-2	8 MJ/l (200 bar) 23 MJ/l (LNG)	
Wasserstoff	9–11 (Elektrolyse/PtG) 5–8 (BtG)	< 1 PJ -	1 PJ -	DIN EN 17124	3 MJ/l (350 bar) 5 MJ/l (700 bar) 9 MJ/l (LH2)	
Referenz: Diesel	11	unbekannt	DIN EN 590	35 MJ/l		

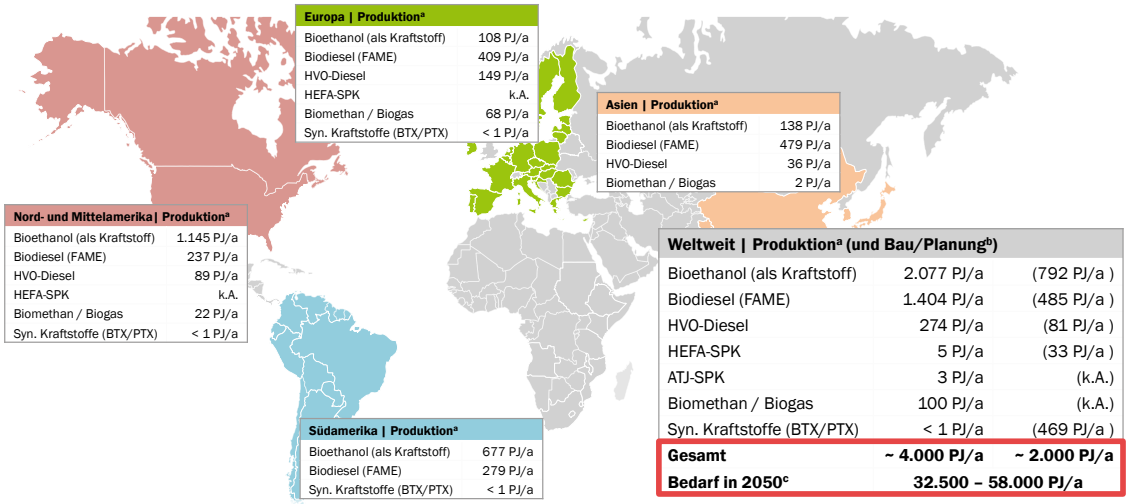
1) Stromanlagenkapazität entspricht der produzierten Menge an erneuerbarem Strom in Europa im Jahr 2019. Strom ist kein Gefahrstoff, jedoch besteht in Kombination mit Traktionsbatterien eine elektrische Gefährdung.

Alle in Tabelle 3 aufgeführten Optionen verfügen über eine entsprechende Normierung als Kraftstoff und sind an öffentlichen Tankstellen zugelassen. Eine Ausnahme sind derzeit noch (Stand Juni 2023) die paraffinischen Dieselkraftstoffe wie HVO- und FT-Diesel. Für die landwirtschaftliche Anwendung waren und sind jedoch nur für die Optionen paraffinischer Dieselkraftstoff, Methan sowie Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff (teilweise) Freigaben der Fahrzeughersteller vorhanden.

Auffallend sind bei den beschriebenen Optionen die großen Differenzen in der Energiedichte, welche entsprechend größere Tankvolumina oder häufigere Wiederbetankungen für eine mit konventionellem Diesel vergleichbare Reichweite erfordern. Zudem sind je nach Kraftstoff unterschiedliche motorische Brennverfahren zu verwenden. Während die Energiedichte von Pflanzenöl, Biodiesel und paraffinischem Diesel mit konventionellem Diesel vergleichbar ist, weist sie für E85 und verflüssigtes Methan (LNG) nur ca. 65 % und für alle weiteren Optionen weniger als 25 % der Energiedichte von Diesel auf. Die geringste Energiedichte wird aktuell mit Strom in einer Traktionsbatterie (Lithium-Ionen-Batterie) für Elektroantriebe erzielt.

Die dieselähnlichen Kraftstoffe sind aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften sehr gut für die Lagerung und Betankung vor Ort, am Hof oder Feld, geeignet. Wenn erhöhte Anforderungen an den Boden- und Gewässerschutz – beispielsweise in Wasser- oder Naturschutzgebieten – beachtet werden müssen, sind vor allem Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, Methan, Wasserstoff und Strom zu bevorzugen. Strom und Wasserstoff sind unter Beachtung der geltenden Sicherheitsvorgaben zusätzlich für Arbeiten in geschlossenen Räumen oder beengten Arbeitsverhältnissen aufgrund der nicht entstehenden Luftschadstoffemissionen als Energieträger geeignet.

Gemäß dem technischen Entwicklungsstand sind die Anlagenkapazitäten in der Europäischen Union ohne Berücksichtigung des jeweiligen Einsatzbereichs neben erneuerbarem Strom derzeit hoch für Pflanzenöle, Biodiesel, hydrierte Pflanzenöle und Biomethan aus anaerober Vergärung (Biogas). Entwicklungstrends für Europa sind stark beeinflusst vom rechtlichen Rahmen und der Entwicklung auf den internationalen Märkten. Insgesamt ist davon auszugehen, dass vor allem die Nachfrage nach Dieselkraftstoffen stark zunehmen wird, insbesondere auch durch verbindliche Ziele in der Luft- und Schifffahrt. Auch für Biomethan wird ein weiterer starker Ausbau erwartet, das in verschiedenen Bereichen genutzt werden wird. Eine vereinfachte Übersicht für die weltweite Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, sowie in Bau und Planung befindlicher Kapazitäten, gibt Abbildung 7.



© DBFZ 03/2023 auf Basis [Schröder et al. 2022], ohne Anspruch auf Vollständigkeit
[a] für 2021; für Biomethan Kapazitäten 2019; [b] Kapazität, k.A. keine dezidierten Angaben; [c] Bedarf nach IEA World Energy Outlook 2022 und IRENA Global Energy Transformation 2018

Abb. 7: Übersicht zur weltweiten Produktion erneuerbarer Kraftstoffe (© DBFZ)

Exkurs | Biokraftstoffe für die Landwirtschaft

Mit Blick auf biomassebasierte regionale Wertschöpfungskreisläufe hat die Landwirtschaft eine Sonderrolle, da sie gleichermaßen Produzentin der nachwachsenden Rohstoffe und Nutzerin der daraus in Bioraffinerien hergestellten Produkte ist (BMEL 2020). Von der derzeit in Deutschland landwirtschaftlich genutzten Fläche (ca. 16,6 Mio. ha, rund 46 % der Landesfläche) dienen 80 % dem Anbau von Futter- und Nahrungsmitteln, 13 % entfallen auf Energiepflanzen (davon ca. 29 % für Pflanzenöl/Biodiesel, also 4 % der Gesamtfläche und ca. 9 % für Bioethanol, also 0,6 % der Gesamtfläche), 2 % auf Industriepflanzen und 5 % auf sonstige Pflanzen (FNR 2023a, 2023b).

Die Produktion von Biokraftstoffen ist über anfallende Koppelprodukte eng mit stofflichen Nutzungen in verschiedenen Wertschöpfungsketten verbunden (z. B. Futter-/Lebensmittel, chemische Industrie).

So fallen beispielsweise bei der Verarbeitung je Tonne Raps nicht nur 400 kg Rapsöl, sondern auch rund 600 kg Rapsschrot als wichtiges Proteinfuttermittel an. Wird Rapsöl zu Biodiesel weiterverarbeitet, fallen je Tonne rund 100 kg Glycerin für die Pharmaindustrie sowie Lecithin für z. B. Lebensmittel an (VDB 2022). Allein 2022 waren dies bei etwa 1,9 Mio. Tonnen in Deutschland produziertem Biodiesel aus Raps ca. 1,2 Mio. Tonnen Futterprotein und bezogen auf die insgesamt in Deutschland produzierten ca. 3,5 Mio. Tonnen Biodiesel ungefähr 0,35 Mio. Tonnen Glycerin (VDB 2022).

Je nach Bilanzierungsmethodik oder gewählten Systemgrenzen fällt der emissionsmindernde Effekt im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen unterschiedlich hoch aus. Insbesondere die begrenzte Verfügbarkeit landwirtschaftlicher Flächen und die sich daraus ergebende Konkurrenzsituation zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln (Teller-Tank-Konkurrenz) und Naturschutzzielen ist der Anlass für kritische Betrachtungen des Anbaus von Ölpflanzen und anderen Kulturen für eine energetische Nutzung. Auch Biomasserest- und -abfallstoffe für die Kraftstoffproduktion sind limitierte Ressourcen, die einer hohen Nachfrage aus verschiedenen Sektoren unterworfen sind.

Sämtliche in Verkehr gebrachte Biokraftstoffe müssen definierten Nachhaltigkeitsanforderungen genügen (Biokraft-NachV 2021, siehe Kap. 2.8). Um dem Aspekt der indirekten Landnutzungsänderungen Rechnung zu tragen, ist seit 2022 in Deutschland der Anteil sogenannter konventioneller Biokraftstoffe auf maximal 4,4 % energetisch innerhalb der THG-Quote begrenzt (siehe Kap. 2.8). Dies bedeutet bezogen auf einen Mittelwert der zwischen 2015 und 2021 quotenpflichtigen Kraftstoffmenge im Verkehr von 2.176 PJ eine maximale Menge an konventionellen Biokraftstoffen von rund 96 PJ. In der Landwirtschaft werden ca. 66 PJ/a Kraftstoff verbraucht, was bezogen auf die quotenpflichtige Kraftstoffmenge im Verkehr bei etwa 3,1 % läge.

Je nach getroffenen Annahmen, insbesondere zur Elektrifizierung, würden für die Deckung des Bedarfs an flüssigen Kraftstoffen der Landwirtschaft im Jahr 2045 zwischen 28 und 40 % der aktuell beigemischten Menge an Biokraftstoffen zu fossilem Diesel ausreichen.

Verknüpft mit den verfügbaren Anlagenkapazitäten in Deutschland (z. B. allein für Biodiesel von ca. 144 PJ (Tab. 3) wäre eine Eigenversorgung der Landwirtschaft grundsätzlich möglich. Eine überbordende Nachfrage aus der Landwirtschaft nach Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse ist nicht zu befürchten, da die Verbrauchsmengen im Sektor bekannt und in Relation zu anderen Verkehrssektoren vergleichsweise niedrig sind. Die anteilige Nutzung von Anbaubiomasse für die Kraftstoffbereitstellung zur Sicherstellung einer treibhausgasarmen Nahrungsmittelproduktion ist daher verantwortbar.

2.5 Kosten klimafreundlicher Antriebssysteme

Erneuerbare Energieträger

Die Produktions- bzw. Gestehungskosten für erneuerbare Kraftstoffe sind im Regelfall höher als für fossile Kraftstoffe. Eine vereinfachte Darstellung, in welcher die aus verschiedenen Veröffentlichungen ausgewerteten Gestehungskosten (normalisiert auf das Bezugsjahr 2020) für sogenannte fortschrittliche Biokraftstoffe und PtX-Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom gegenübergestellt sind, zeigt Abbildung 8. Diese weisen große Bandbreiten auf. Einfluss auf die Gestehungskosten haben neben den TRL/FRL (Abb. 6) auch die jeweiligen regionalen Randbedingungen und je nach Geschäftsmodell und Betrieb ebenso die Investitionsausgaben sowie Betriebsausgaben. Während für biomassebasierte Anlagen im Regelfall, neben den regional teils sehr unterschiedlichen Kosten für die Ressource Biomasse, die Investitionen maßgeblichen Einfluss auf die Gestehungskosten haben, sind es bei PtX-Kraftstoffen neben dem Strompreis die Investitionen für die Elektrolyseure sowie – je nach Herkunft – für die Bereitstellung des erforderlichen Kohlenstoffdioxids.

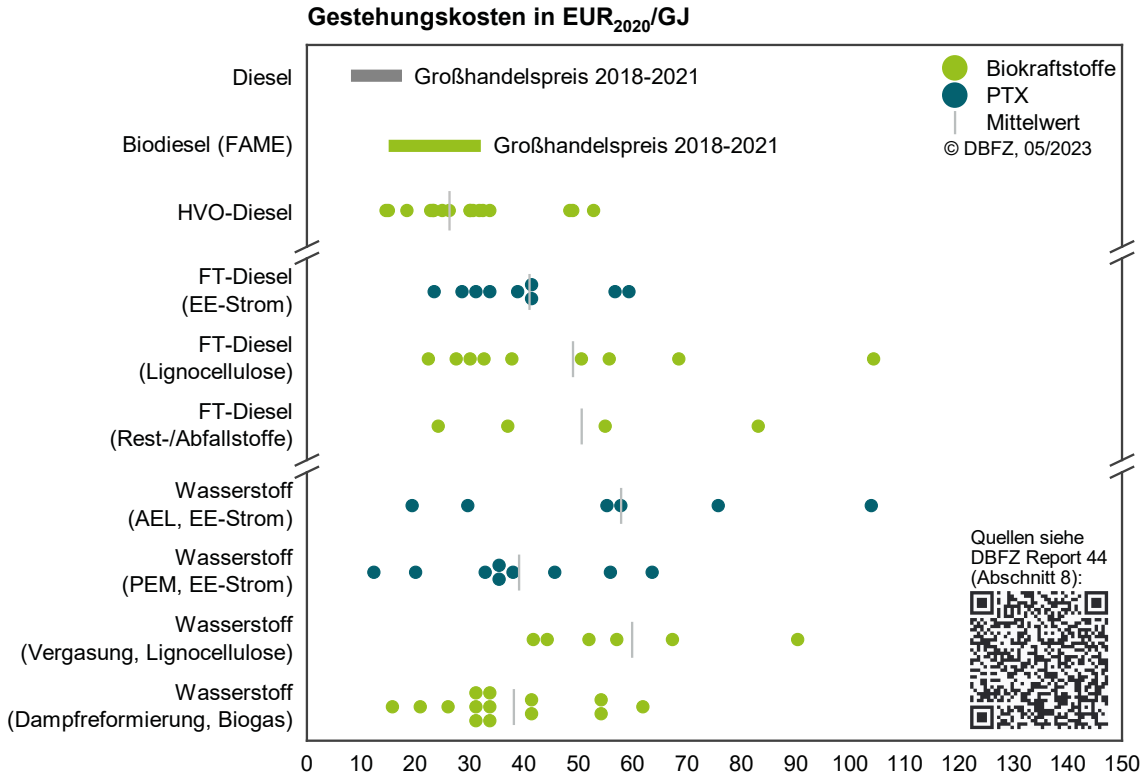


Abb. 8: Gestehungskosten für fortschrittliche Biokraftstoffe, PtX-Kraftstoffe und HVO-Diesel und Preiseniveaus (2020) (ohne Steuern) für Dieselkraftstoff und Biodiesel (FAME) (Schröder und Naumann 2022)

Einfluss auf die von den Kosten zu unterscheidenden Preise und deren Bildung am Markt haben bei Kraftstoffen, die in Deutschland innerhalb der Treibhausgasquote (siehe Kap. 2.8) Anrechnung finden, auch die spezifischen Treibhausgasemissionsminderungen und die im Quotenhandel erzielbaren Erlöse für die Treibhausgaseinsparung. Zusätzlich wird die Preisbildung von vielerlei weiteren Faktoren beeinflusst, die typischerweise zu teils sehr volatilen Preisentwicklungen führen.

Ebenso volatil ist die Preisentwicklung für elektrischen Strom in Deutschland; hier lagen die Preise für Nichthaushalte im zweiten Halbjahr 2019 bei durchschnittlich 1,79 EUR/GJ und stiegen bis zum zweiten Halbjahr 2022 auf ein Niveau von 5,08 EUR/GJ an (Durchschnittspreise aller Jahresverbrauchsklassen ohne Steuern, Abgaben und Umlagen; Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online 2023). Im Jahr 2023 war eine leichte Entspannung der Strompreisentwicklung zu sehen.

Investitions- und Umrüstkosten

Da aufgrund fehlenden Angebots und fehlender Nachfrage aktuell kein Markt für unterschiedliche Maschinen mehrerer Anbieter besteht, sind auch keine verlässlichen Marktpreise für Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien bekannt. Einzig ohne Preisaufschlag werden in größerem Umfang Neumaschinen mit einer zusätzlichen Freigabe für paraffinischen Dieselkraftstoff neben der Freigabe für Diesel nach DIN EN 590 angeboten. Nach Auswertung eines Investitionsförderprogramms der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung für Neumaschinen und Umrüstungen auf erneuerbare Antriebsenergien lässt sich anhand der kleinen Stichprobe feststellen, dass Maschinen mit elektrischem Antrieb ca. 30 bis 40 % teurer sind als Vergleichsmaschinen und mit CNG-Antrieb ca. 25 % teurer verkauft wurden. Für pflanzenöltaugliche Maschinen liegen keine Daten vor. Maschinen mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor und mit Wasserstoff-Brennstoffzelle sind bisher nur als Prototypen für Forschungs- und Entwicklungszwecke bekannt.

Kosten für Lagerung und Betankung

Lager- und Betankungsanlagen für paraffinischen Dieselkraftstoff, Biodiesel und Pflanzenölraftstoff unterscheiden sich im Anschaffungspreis nicht von denen für konventionellen Dieselkraftstoff. Tanks und Tankanlagen für Dieselkraftstoff lassen sich nach einer empfohlenen Reinigung auch für Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff nutzen. Gegebenenfalls müssen im Einzelfall spezielle Anforderungen, wie zum Beispiel eine Eichung, erfüllt werden, die dann zu weiteren Kosten führen können. Um ein Vielfaches teurer als Lager- und Betankungsanlagen für flüssige Kraftstoffe sind solche für gasförmige Kraftstoffe wie CNG, LNG und für Wasserstoff. Bei der Lagerung von gasförmigen Kraftstoffen, z. B. in Gasflaschenbündeln, kommen noch wiederkehrende Sicherheitsprüfkosten der Lageranlagen hinzu.

2.6 Maschinenbestand

Der Bestand an motorisierten Maschinen, die in der Landwirtschaft eingesetzt werden, setzt sich im Wesentlichen aus mobilen Antriebsmaschinen wie Traktoren und selbstfahrenden Arbeitsmaschinen wie Mähdreschern und Maishäckslern zusammen. Dazu kommen Transportfahrzeuge, Fahrzeuge für Lade- und Umschlagarbeiten, wie Teleskop- und Hoflader sowie Spezialmaschinen, die ausschließlich in der Tierhaltung zum Einsatz kommen, z. B. Futtermischwagen. Viele dieser Maschinen haben nur geringe jährliche Laufzeiten aufgrund der Saisonalität von Feldarbeiten. Dies führt in vielen Fällen dazu, dass die Maschinen sehr lange in der Nutzung bleiben. Bei unterstellt jährlich 750 Betriebsstunden Einsatzzeit, kann ein Traktor bis zum Ende der theoretischen Nutzungsdauer über 13 Jahre betrieben werden.

Darüber hinaus werden zahlreiche Traktoren nach dem Verkauf weiterhin im Inland in einem zweiten und teilweise dritten Einsatzumfeld verwendet. Abbildung 9 (links) zeigt den Traktorbestand in der Haltergruppe Land- und Forstwirtschaft in Deutschland für die Jahre 2010 bis 2022 aufgeschlüsselt nach Leistungsklassen. Hier sind gewerblich zugelassene Traktoren, beispielsweise von Lohnunternehmen, nicht enthalten. Abbildung 9 (rechts) stellt den Gesamtbestand an Traktoren aller Haltergruppen nach Leistung und Alter dar. Diese Abbildung enthält auch Maschinen, die gewerblich zugelassen sind und in der Land-

wirtschaft oder anderen Anwendungen zum Einsatz kommen. Maschinen mit einer Leistung von weniger als 30 kW oder einem Alter von mehr als 14 Jahren sind hier nicht berücksichtigt.

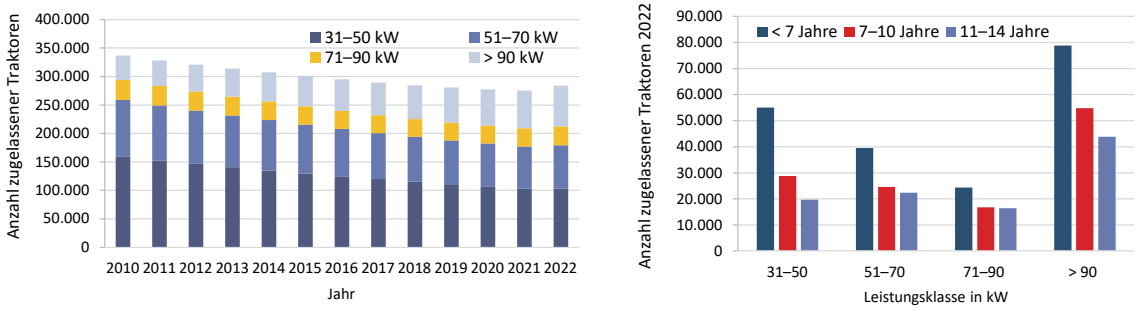


Abb. 9: Entwicklung der Bestandsflotte – Anzahl zugelassener Traktoren in der Haltergruppe Land- und Forstwirtschaft nach Leistungsklassen (ab 31 kW) in Deutschland (links); Bestandsflotte – Anzahl zugelassener Traktoren 2022 in allen Haltergruppen nach Leistungsklasse (ab 31 kW) und Fahrzeugalter (bis 14 Jahre) (rechts)
(© KTBL; Quelle: VDMA-Traktorbericht (unveröffentlicht) und Kraftfahrt-Bundesamt (KBA 2022))

Im Vergleich dazu stellt Abbildung 10 die Anzahl an Neuzulassungen nach Leistungsklassen für die Jahre 2020 und 2021 dar. Hier zeigt sich für Deutschland ein hoher Bedarf an Traktoren kleiner wie auch hoher Leistungsklassen. Die Neuzulassungen in der Haltergruppe Land- und Forstwirtschaft enthalten ebenso Traktoren, die in Branchen außerhalb der Landwirtschaft zum Einsatz kommen. Eine zahlenmäßige Abgrenzung ist aus der Zulassungsstatistik nicht sicher abzuleiten.

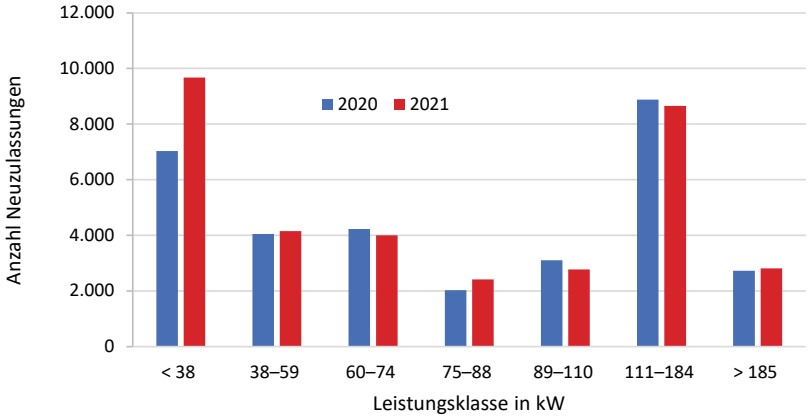


Abb. 10: Neuzulassungen von Traktoren in den Jahren 2020 und 2021 in Deutschland nach Leistung
(© KTBL; Quelle: VDMA-Traktorbericht (unveröffentlicht))

Die Zahlen geben keine Aussage über die konkrete Verwendung der einzelnen Maschinen. Besonders Traktoren geringer Leistungsklassen werden teilweise auch außerhalb der Landwirtschaft im privaten Umfeld eingesetzt.

Dem steht eine große Anzahl an Neuzulassungen von Traktoren hoher Leistungsklassen gegenüber. Diese Maschinen werden in der Landwirtschaft für schwere Arbeiten auf den Feldern und zum Transport eingesetzt. Hier wird ein Antrieb benötigt, der den Anforderungen an eine hohe Leistungsdichte und schnelle Vor-Ort-Betankungsmöglichkeit entsprechend dem Einsatzzweck und Prozess genügt.

Abbildung 11 zeigt die Verkaufszahlen von Mähdreschern und Feldhäckslern für die Geschäftsjahre 2019 bis 2022. Hier stehen die örtliche Unabhängigkeit und die saisonale und zeitliche Flexibilität beim Einsatz im Vordergrund. Die Maschinen werden nur saisonal, meist im Umfang von etwa 250 bis 300 h/a, eingesetzt (KTBL 2022a).

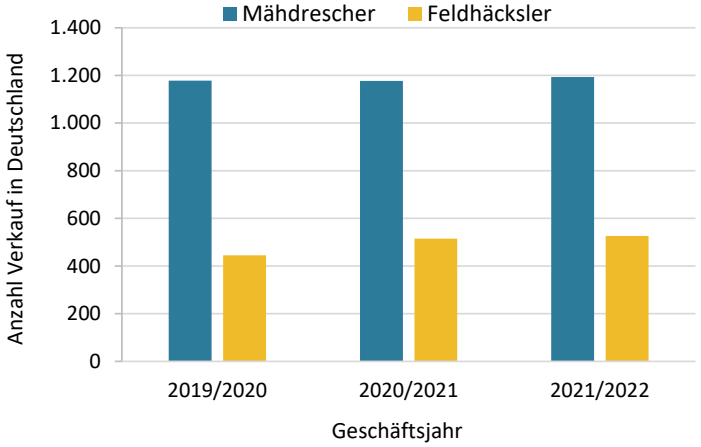


Abb. 11: Verkaufszahlen Mähdrescher und Feldhäcksler nach Geschäftsjahren (© KTBL; Quelle: VDMA-Traktorbericht (unveröffentlicht))

2.7 Endenergiebedarf und damit verbundene Treibhausgasemissionen

Der Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft ist über das Beantragungsverfahren zur Agrardieselentlastung nach § 57 Energiesteuergesetz (EnergieStG 2018) gut dokumentiert. Abbildung 12 zeigt die in Land- und Forstwirtschaft verwendeten steuerbegünstigte Mengen von Bio- und konventionellen Kraftstoffen.

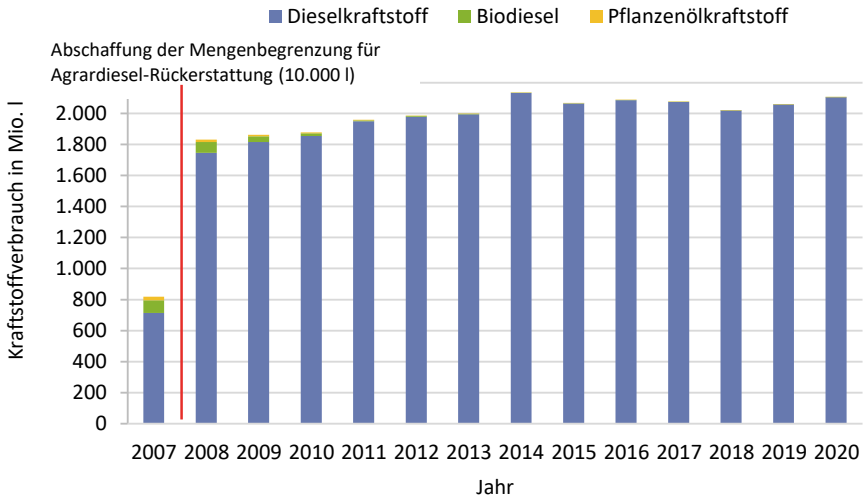
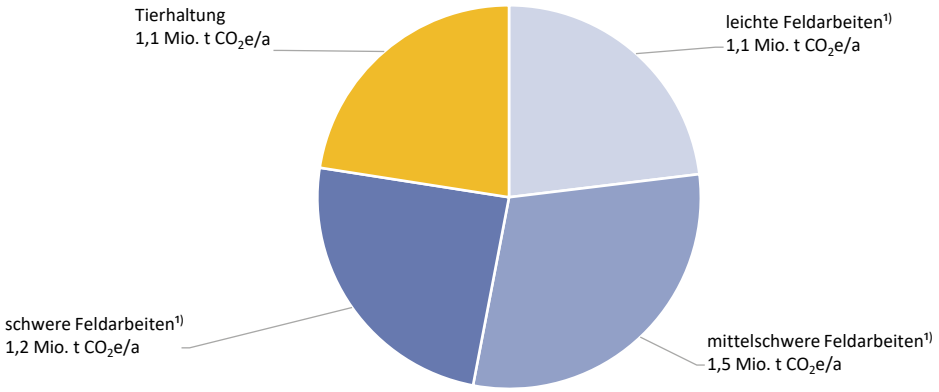


Abb. 12: Kraftstoffverbrauch der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland – steuerbegünstigte Mengen von Bio- und konventionellen Kraftstoffen (Agrardieselentlastung nach § 57 EnergieStG) der Jahre 2007 bis 2020 (© TFZ; Quelle: Generalzolldirektion, Neustadt a. d. Weinstraße 2018 und 2022 (unveröffentlicht))

In der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland wurden im Durchschnitt der Jahre 2016 bis 2020 jährlich ca. 2,1 Milliarden Liter Kraftstoff verbraucht, was einem Energieäquivalent von 74,4 PJ (eigene Berechnungen nach Daten der Generalzolldirektion, Neustadt a. d. Weinstraße 2018 und 2020, unveröffentlicht) entspricht. Abzüglich der geschätzten 12 % aus der Forstwirtschaft (berechnet nach UBA (2022)) reduziert sich das Energieäquivalent der in der Landwirtschaft eingesetzten Kraftstoffe auf rund 66 PJ/a. Mit einem energetischen Anteil von 99,94 % kam Dieselkraftstoff der Qualitäten B7 oder B0 zum Einsatz. Die Reinkraftstoffe Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff wurden in Summe zu einem energetischen Anteil von 0,6 Promille eingesetzt.

In der Quellgruppe CRF 1.A.4.c für den Sektor Landwirtschaft werden im Nationalen Emissionsinventar (UBA 2022) für den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr in Deutschland im Mittel der Jahre 2016 bis 2020 4,2 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente (eigene Berechnungen nach Daten UBA 2022) in den Nationalen Inventarberichten zum Deutschen Treibhausgasinventar des Umweltbundesamtes ausgewiesen. Dieser Wert berücksichtigt nur die direkten Emissionen aus der Verbrennung („tank-to-wheel"), ohne vorgelagerte Emissionen für die Bereitstellung der Energieträger. Dem Kraftstoffverbrauch ausschließlich in der Landwirtschaft werden 3,8 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente zugeordnet. Dies entspricht in etwa einem Anteil von 5 % am gesamten Ausstoß an Treibhausgasen im Sektor Landwirtschaft in Deutschland. Hinweise zur Methodik der Ermittlung von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren gibt UBA (2022). Die Berechnung der Kraftstoffmengen erfolgt mithilfe des Transport-Emissionsmodells TREMOD-MM (Heidt et al. 2020).

Werden die Treibhausgasmissionen für den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr in Deutschland anhand der zur Steuerbegünstigung angemeldeten Kraftstoffmengen für eine B7-Kraftstoffqualität berechnet, werden über die Kraftstoffverbrennung im Fünfjahresmittel mindestens 5,1 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente (eigene Berechnungen: Emissionsfaktor für Dieselkraftstoff B0 („tank-to wheel") ist 74,0 g CO_2/MJ, Energiedichte von B0 ist 35,87 MJ/l) ausgestoßen. Diese Abschätzung legt den Schluss nahe, dass der Kraftstoffverbrauch für den land- und forstwirtschaftlichen Verkehr in der Inventarberichterstattung möglicherweise zu niedrig angesetzt wurde. Die Aufteilung der Emissionen auf unterschiedliche Arbeitsvorgänge für Feldarbeiten und Tierhaltung zeigt Abbildung 13. Basis ist die in Tabelle 1 und Abbildung 2 dargestellte Verteilung der Kraftstoffverbräuche auf unterschiedliche Arbeitsgänge und der Emissionsfaktor von 74 g CO_2/MJ Dieselkraftstoff.



Dieselbedarf je Hektar: leichte Arbeiten < 5 l/ha, mittelschwere Arbeiten 5-15 l/ha, schwere Arbeiten > 15 l/ha,
[1)] Inklusive Transporte.

Abb. 13: Zuordnung von Treibhausgasemissionen aus der Kraftstoffnutzung der deutschen Landwirtschaft zu unterschiedlichen Arbeitsvorgängen in Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten je Jahr – Abschätzung anhand des Kraftstoffverbrauchs 2020 über die Agrardieselentlastung nach § 57 EnergieStG und KTBL-Planungsdaten, ohne Forstwirtschaft (© KTBL)

2.8 Rechtlicher Rahmen

Die Treibhausgasminderungsziele für den Sektor Landwirtschaft sind im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG 2021) festgeschrieben. Der Sektor Landwirtschaft muss bis zum Jahr 2030 die Jahresemissionsmenge auf maximal 56 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalente senken. Energiebedingte Treibhausgasemissionen (Quellkategorie CRF 1.A.4.c Verbrennung von Brennstoffen in Land- und Forstwirtschaft und in der Fischerei), zum Beispiel aus der Wärmebereitstellung und der Kraftstoffnutzung, werden gemäß Klimaschutzgesetz Anlage 1 dem Sektor Landwirtschaft zugeordnet. Rund zwei Drittel der Treibhausgasemissionen aus der Quellgruppe 1.A.4.c entfallen auf die Verbrennung fossiler Kraftstoffe. Die Verringerung des Kraftstoffverbrauchs und die Substitution fossiler Kraftstoffe durch erneuerbare Kraftstoffe und Strom tragen daher dazu bei, die dem Sektor Landwirtschaft zugeordneten Treibhausgasemissionen zu senken. Neben dem Klimaschutzgesetz des Bundes haben Bundesländer ihre Klimaschutzziele in eigenen Gesetzen definiert.

Die Wettbewerbsfähigkeit von erneuerbaren Energieträgern gegenüber fossilen Energieträgern richtet sich nach dem Preis, der unter anderem durch die Produktionskosten, aber auch durch Steuern und Abgaben bestimmt wird. Auf europäischer Ebene wird eine neue Richtlinie zur Besteuerung von Energieerzeugnissen und elektrischem Strom vorbereitet. Der Entwurf vom 14. Juni 2021 sieht vor, dass für Kraftstoffe, die für Arbeiten in der Landwirtschaft, im Gartenbau und in der Forstwirtschaft verbraucht werden, von den Mitgliedsstaaten sowohl für fossilen Dieselkraftstoff als auch für erneuerbare Kraftstoffe niedrigere Mindeststeuerbeträge festgelegt werden dürfen. Neu ist, dass sich die Steuerbeträge auf den Energiegehalt beziehen und nicht auf das Volumen. Die Mindeststeuerbeträge variieren außerdem innerhalb der Kraftstoffarten. Gemäß § 57 EnergieStG (2018) wird den Betrieben der Land- und Forstwirtschaft auf Antrag eine Energiesteuerentlastung auf Dieselkraftstoff „Gasöle" in Höhe von 21,48 Eurocent je Liter gewährt. Diese Beihilfe für Gasöl muss von der EU-Kommission entsprechend der Verordnung (EU) Nr. 651/2014 freigestellt werden (EU VO 651/2014 2014) (EnergieStG § 57 Absatz 9). Das Energiesteuergesetz sieht zudem eine Entlastung in Höhe von 45,03 Eurocent je Liter für Fettsäuremethylester und 45,00 Eurocent je Liter für Pflanzenöl vor. Seit 2022 wird diese Energiesteuerentlastung auf Fettsäuremethylester und Pflanzenöl jedoch nicht mehr gewährt. Beihilfen werden auch in den Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen (KUEBLL) (Europäische Kommission 2022/C 80/01 2022) geregelt. Hierin ist festgelegt, dass Biokraftstoffe nur dann gefördert werden können, wenn Sie den Nachhaltigkeitskriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU (EU RL 2018/2001 2018) entsprechen (Randziffer 80). Außerdem werden die Obergrenzen für Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen adressiert (Randziffer 130). Die Notwendigkeit, die Aufrechterhaltung und die erforderliche Höhe von Steuerentlastungen für Biokraftstoffe müssen durch die Mitgliedsstaaten geprüft werden (Randziffer 303). Die KUEBLL lösten am 27.02.2022 die Leitlinien für staatliche Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2014–2020 (UEBLL) (Europäische Kommission 2014/C 200/01 2014) ab. Über das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG 2020) erhalten Treibhausgasemissionen die aus der Nutzung z. B. von fossilem Kraftstoff (Benzin, Gasöle) entstehen, einen Preis, der sich aus den Preisen für Emissionszertifikate ableitet. Da Biokraftstoffe vom BEHG ausgenommen sind, entsteht ein Kostenvorteil gegenüber Kraftstoffen aus fossilen Quellen.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG 2023) regelt die Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen und legt bis zum Jahr 2030 stufenweise Minderungsziele der Treibhausgasemissionen (Treibhausgasminderungsquote) fest, die durch das Inverkehrbringen von fossilen Otto- und fossilen Dieselkraftstoffen entstehen. Die Quotenverpflichteten sind Inverkehrbringer von Kraftstoffen, die gewerbsmäßig oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen handeln. Ein Anreiz klimaschonende Energieerzeugnisse in Verkehr zu bringen, entsteht dadurch, dass bei Nichterfüllung der Quote Abgaben zu entrichten sind. In der Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen wird

im § 13 der 38. BImSchV (2017) eine jährliche Obergrenze für die Anrechenbarkeit von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen von 4,4, bezogen auf den Energiegehalt, und im § 13a eine Obergrenze für die Anrechenbarkeit von abfallbasierten Biokraftstoffen von 1,9 % festgelegt. Seit 2023 sind Biokraftstoffe aus Rohstoffen mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung, wie zum Beispiel Palmöl, nicht mehr anrechenbar (§ 13b).

Die EU-Richtlinie 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen „EU RED II" (EU RL 2018/2001 2018) und künftig die „EU RED III" bzw. die nationale Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung (Biokraft-NachV 2021) regeln, dass durch die Verwendung von Biokraftstoffen mehr als ein Mindestmaß an Treibhausgasemissionen reduziert werden und dass es zu keinen Konflikten bei der Landnutzung für Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Rohstoffproduktion sowie dem Umweltschutz kommt. Eine vergleichbare Nachhaltigkeitsverordnung für fossile Kraftstoffe, Strom als Antriebsenergie oder die Gewinnung Seltener Erden für die Herstellung von Batterien existiert nicht. Ein jährlich von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung vorgelegter „Evaluations- und Erfahrungsbericht" zur Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung gibt Auskunft, welche Biokraftstoffe in den jeweiligen Mengen in Verkehr gebracht und welche Rohstoffe für deren Produktion verwendet wurden, woher geografisch die Rohstoffe stammten und wie viele Treibausgase dadurch emittiert oder eingespart wurden.

Fahrzeuge der Klasse T (Traktoren) müssen zur Erlangung einer europaweit gültigen EU- Typgenehmigung die Anforderungen der Verordnung (EU) Nr. 167/2013 (EU VO 167/2013 2013) über die Genehmigung und Marktüberwachung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen sowie der dazugehörigen Delegierten- und Durchführungsrechtsakte erfüllen. Hierzu zählt die Delegierte Verordnung (EU) 2018/985 (EU VO 2018/985 2018) in Bezug auf die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die Leistung der Antriebseinheit land- und forstwirtschaftlicher Fahrzeuge und ihrer Motoren. Mobile Maschinen, die in Verkehr gebracht werden, müssen demnach auch Anforderung hinsichtlich des Emissionsverhaltens erfüllen. Grundlage hierfür ist die Typgenehmigung. Bis 31.12.2016 war die Typgenehmigung in der Richtlinie 97/68/EG (EG RL 97/68 1997) geregelt, danach trat die Verordnung (EU) 2016/1628 (EU VO 2016/1628 2016) in Kraft. Verordnung (EU) 2016/1628 regelt beispielsweise in Artikel 25 die Durchführung von Messungen und Prüfungen und verlangt, dass der Motortyp oder die Motorenfamilie mit dem Bezugskraftstoff und mit allen spezifizierten Kraftstoffen, Kraftstoffmischungen oder Kraftstoffemulsionen, die von einem Motorenhersteller in einen Antrag auf EU-Typgenehmigung aufgenommen werden, die festgelegten Abgasemissionsgrenzwerte einhält. Die Prüfung zusätzlicher Kraftstoffe neben dem Bezugskraftsoff ist daher mit erheblichem Aufwand und Kosten für den Motorenhersteller verbunden.

Die Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (10. BImSchV 2010) regelt, welche Kraftstoffe an öffentlichen Tankstellen in Verkehr gebracht werden dürfen, welche Mindestqualitätsanforderungen diese erfüllen und wie die Kraftstoffe gekennzeichnet werden müssen. Ausnahmen sind bei Vorliegen der Typgenehmigung durch den Hersteller für die Eigennutzung und bei betriebsinterner Betankungsinfrastruktur nach § 16 der 10. BImSchV möglich. Paraffinischer Kraftstoff nach DIN EN 15940, unter anderem HVO, darf beispielsweise derzeit nicht an öffentlichen Tankstellen in Verkehr gebracht werden. Im Referentenentwurf zur Änderung der 10. BImSchV vom 18.06.2023 wird jedoch vorgeschlagen, paraffinischen Dieselkraftstoff (XtL) aus Synthese oder Hydrierungsverfahren als Reinkraftstoff nach der Norm DIN EN 15940 in die 10. BImSchV aufzunehmen.

Bis zum Jahr 2045 soll eine Treibhausgasneutralität realisiert werden. Hierzu sollte der Verkehrssektor so weit wie möglich elektrifiziert sein. Die Elektrifizierung von Pkw und Nutzfahrzeugen wird vor allem durch regulatorische Vorgaben forciert, die sich in der EU insbesondere durch Verordnungen über CO_2-Flottenzielwerte abbilden. Letztere beziehen sich jedoch nur auf das Fahrzeug („tank-to-wheel") und

machen keine Aussage über die tatsächliche Treibhausgasminderung, da die Treibhausgasemissionen aus der Bereitstellung des Stroms nicht berücksichtigt werden. Vergleichbare Vorgaben, welche beispielsweise die Elektrifizierung von mobilen Maschinen, die nicht für den Straßenverkehr bestimmt sind, vorantreiben, gibt es bislang weder auf nationaler noch auf EU-Ebene

2.9 Eignung und Verfügbarkeit von Energieträgern und Antriebstechniken für landwirtschaftliche Maschinen

Heute werden landwirtschaftliche Maschinen im Wesentlichen mit handelsüblichem Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 (fossiler Diesel mit maximal 7 Volumenprozent FAME) betrieben. In geringem Umfang werden bereits Maschinen mit den erneuerbaren Kraftstoffen Pflanzenölkraftstoff, FAME, HVO oder Biomethan betrieben sowie elektrisch angetrieben.

Die Eignung von erneuerbaren Energieträgern für landwirtschaftliche Maschinen ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig und sollte zumeist in der Kombination mit dem verwendeten Antriebssystem (Elektromotor – Batterie oder Brennstoffzelle sowie Verbrennungsmotor) bewertet werden. Maßgebliche Einflussfaktoren sind

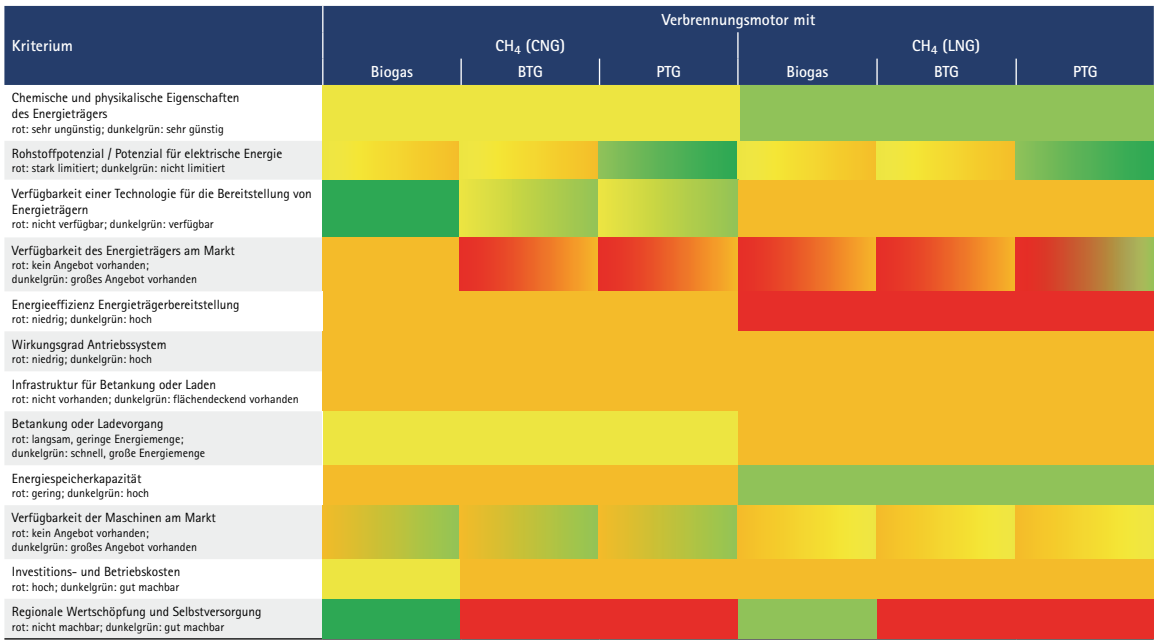
- das Nutzungsprofil der Maschinen (Leistungsbedarf, Einsatzdauer, Einsatzort),
- die Wechselwirkung der verrichteten Arbeit mit der Umwelt (Klima, Boden, Wasser, Luft) und
- die Realisierbarkeit der Marktetablierung neuer Antrieb-Energieträger-Konzepte (rechtlicher Rahmen, Infrastruktur, Verfügbarkeit von Energieträgern und Fahrzeugen, Akzeptanz).

Eine detaillierte Bewertung von Antriebssystemen mit diesen Faktoren erfolgt in der KTBL-Schrift 519 „Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen" (KTBL 2020) und im DBFZ-Report Nr. 44 „Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr" (Schröder und Naumann 2022).

Abbildung 14 zeigt eine Einschätzung der wesentlichen Kriterien für die Bewertung von Antriebssystemen für die Jahre 2030 und 2045. Wo zwischen diesen Jahren eine Veränderung erwartet wird, ist dies durch einen Farbverlauf dargestellt. Links in der Zelle jeweils die Einschätzung für das Jahr 2030, rechts für das Jahr 2045.

Kriterium	Verbrennungsmotor mit					Elektromotor mit		
	Pflanzenöl-kraftstoff	Biodiesel	paraffinischem Diesel			H_2 (ICE)	H_2 (FC)	Strom (Batterie)
	Raps	allgemein[1)]	HVO	FT (BTL)	FT (PTL)		Elektrolyse	Wind/PV
Chemische und physikalische Eigenschaften des Energieträgers rot: sehr ungünstig; dunkelgrün: sehr günstig								nicht bewertbar
Rohstoffpotenzial / Potenzial für elektrische Energie rot: stark limitiert; dunkelgrün: nicht limitiert								
Verfügbarkeit einer Technologie für die Bereitstellung von Energieträgern rot: nicht verfügbar; dunkelgrün: verfügbar								
Verfügbarkeit des Energieträgers am Markt rot: kein Angebot vorhanden; dunkelgrün: großes Angebot vorhanden								
Energieeffizienz Energieträgerbereitstellung rot: niedrig; dunkelgrün: hoch								
Wirkungsgrad Antriebssystem rot: niedrig; dunkelgrün: hoch								
Infrastruktur für Betankung oder Laden rot: nicht vorhanden; dunkelgrün: flächendeckend vorhanden								
Betankung oder Ladevorgang rot: langsam, geringe Energiemenge; dunkelgrün: schnell, große Energiemenge								
Energiespeicherkapazität rot: gering; dunkelgrün: hoch								
Verfügbarkeit der Maschinen am Markt rot: kein Angebot vorhanden; dunkelgrün: großes Angebot vorhanden								
Investitions- und Betriebskosten rot: hoch; dunkelgrün: gut machbar								
Regionale Wertschöpfung und Selbstversorgung rot: nicht machbar; dunkelgrün: gut machbar								

Fortsetzung Tabelle nächste Seite



[1] Verschiedene Rohstoffe.

Abb. 14: Bewertung von Antriebssystemen in der Perspektive 2030 (jeweils links in der Tabellenzelle) und 2045 (jeweils rechts in der Tabellenzelle) (© DBFZ)

Die in Abbildung 14 gezeigte Einschätzung bildet die Basis auf der die folgende kurz- bis mittelfristige Perspektive der Antriebssysteme bis 2030 sowie die langfristige Perspektive bis 2045 abgeleitet und grafisch zusammengefasst werden (Abb. 15). In der Abbildung sind die zum jeweiligen Zeitpunkt nach der Einschätzung der Autoren dieser Schrift am Markt verfügbare und nach den obigen Kriterien für einen Einsatz in der Landwirtschaft als sinnvoll erachtete Lösungen für neue oder umrüstbare Maschinen und die dafür notwendigen Energieträger dargestellt.

Lesebeispiel für Abbildung 14:
Die Farbskala hat 5 Stufen von rot (sehr ungünstig) bis dunkelgrün (sehr günstig) (Details siehe Spalte 1).
Lesebeispiel: Paraffinischer Diesel (Fischer-Tropsch) aus erneuerbarem Strom (PtL):
Die Verfügbarkeit im Jahr 2030 wird mit „kein Angebot vorhanden" (rot, Stufe 1), im Jahr 2045 mit „begrenzt" (gelb, Stufe 3) bewertet.

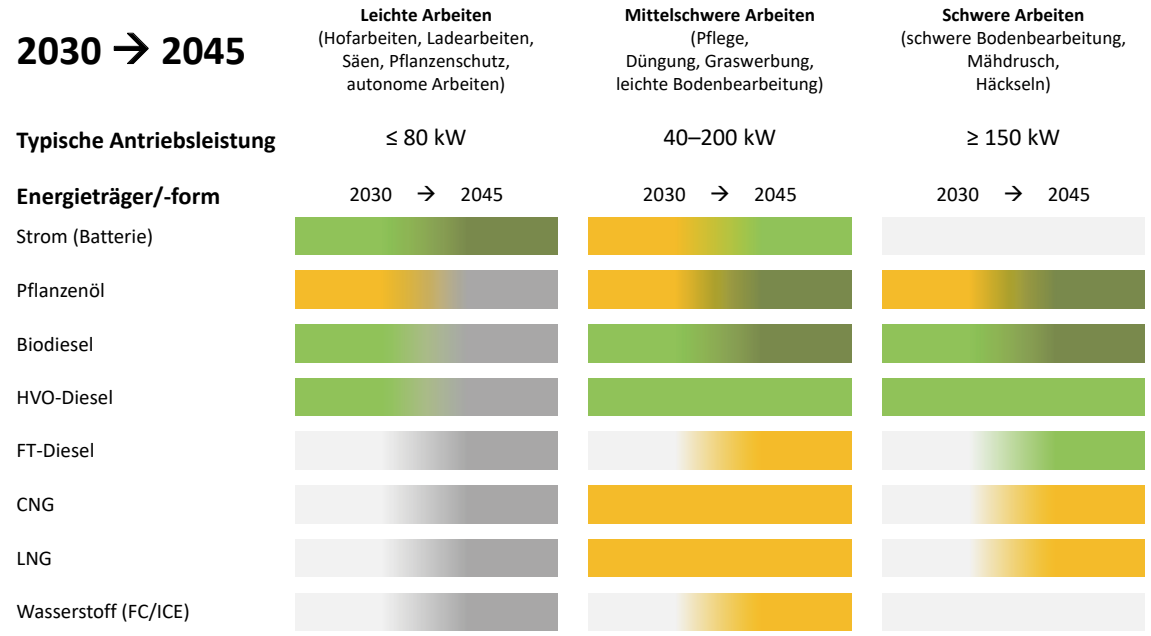


Abb. 15: Perspektive 2030 und 2045 für ausgewählte erneuerbare Energieträger und Antriebe in der landwirtschaftlichen Anwendung (© KTBL)

Legende:

- Für landwirtschaftliche Maschinen umsetzbare bevorzugte Optionen:
  Maschine und Energieträger sind am Markt verfügbar, eignen sich für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten, sind kostengünstig, der Ressourceneinsatz ist effizient. Eine regionale Bereitstellung der Energieträger ist möglich.
- Für landwirtschaftliche Maschinen umsetzbar:
  Maschine und Energieträger sind am Markt verfügbar und eignen sich für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten.
- Für landwirtschaftliche Maschinen teilweise umsetzbar:
  Maschine und Energieträger sind am Markt unter optimistischen Annahmen verfügbar, die Eignung für die jeweiligen landwirtschaftlichen Arbeiten ist teilweise gegeben.
- Für landwirtschaftliche Maschinen umsetzbar:
  Es sind aber besser geeignete Alternativen verfügbar.
- Geeignete erneuerbare Energieträger und dazu passende Antriebe sind nicht verfügbar.

Dabei ist zu beachten:

- Es werden nur Energieträger betrachtet, welche aus erneuerbaren Ressourcen hergestellt werden können.
- Die Fahrzeugflotte besteht im Jahr 2030 zu großen Teilen aus Bestandsfahrzeugen oder aus Neufahrzeugen mit bereits heute etablierten Antrieben.
- Der erwartete Marktanteil 2030/2045, also die Durchdringung einer Technologie in der Praxis, wird in der Übersicht nicht berücksichtigt, dargestellt wird nur die erwartete Verfügbarkeit.

- Wo technisch sinnvoll und praktisch umsetzbar, wird die Elektrifizierung der Antriebe unter Verwendung regenerativen Stroms als bevorzugte Option aufgrund des hohen energetischen Wirkungsgrades und der insbesondere bei Eigenstromnutzung geringen Energiekosten betrachtet, um die mengenmäßig knappen, energiedichten flüssigen Kraftstoffe gezielt in Bereichen einsetzen zu können, in denen eine Elektrifizierung nicht infrage kommt.
- Regional bereitstellbare Energieträger werden bevorzugt, um den Vorteilen bei der Versorgungssicherheit und der regionalen Wertschöpfung Rechnung zu tragen.

Die wesentlichen Erkenntnisse sind, dass

- eine Elektrifizierung des Antriebs von Maschinen für leichte Arbeiten sowie schwere, zeitlich eng begrenzte Arbeiten bereits bis 2030 für Neufahrzeuge anteilig möglich ist, sodass diese Maschinen bis 2045 nahezu vollständig elektrifiziert werden könnten. Zusätzlich können neue technologische Konzepte zu einer Verschiebung der Prozesse und der Maschinen unter den Leistungsklassen führen. Eine Prozessaufteilung von einer großen Maschine auf mehrere kleine Maschinen erhöht das Potenzial zur Elektrifizierung, muss aber gesamtenergetisch und unter Berücksichtigung der Prozessqualität und des Ernteertrags betrachtet werden.
- durch die Elektrifizierung der leichten und anteilig der mittelschweren Arbeiten sich für das Zieljahr 2045 der Bedarf an flüssigen Kraftstoffen um etwa 0,7 bis 1 Mrd. Liter verringern ließe.
- Pflanzenölkraftstoff und Biodiesel (FAME) sich langfristig als die bevorzugten und geeigneten Energieträger für die nicht elektrifizierbaren Arbeiten, wie mittelschwere bis schwere sowie zeitintensive Arbeiten, erweisen, um – insbesondere aufgrund der regionalen Bereitstellungsmöglichkeiten – eine nationale Versorgungssicherheit mit Nahrungsmitteln und anderen landwirtschaftlichen Produkten zu ermöglichen.
- paraffinische Dieselkraftstoffe wie HVO-Diesel und FT-Diesel aus Biomasse (BtL) oder auf Basis elektrischer Energie (PtL) aufgrund ihrer Kraftstoffeigenschaften sehr gut geeignete erneuerbare Energieträger für heutige dieselbetriebene Bestandsfahrzeuge sind. Neufahrzeuge sollten mit anderen Kraftstoffen betrieben werden, um die Konkurrenz um diesen Kraftstoff zu entschärfen. Paraffinische Kraftstoffe werden zukünftig in anderen Sektoren, wie Luftfahrt und Schifffahrt, eine sehr starke Nachfrage erhalten und voraussichtlich nur begrenzt und zu entsprechend hohen Kosten verfügbar sein.
- erneuerbares komprimiertes Methan (CNG) und verflüssigtes Methan (L*N*G), vor allem bei landwirtschaftlichen Betrieben mit eigener oder mit nahegelegener Biomethananlage, im Falle des L*N*G mit Verflüssigungsanlage, als sinnvolle Alternative bewertet wird, jedoch eine flächendeckende Anwendung aufgrund der auch perspektivisch geringen Versorgungsdichte nicht möglich ist. L*N*G eignet sich aufgrund der höheren volumetrischen Energiedichte im Vergleich zu CNG eher für schwerere Arbeiten. Bei der L*N*G-Nutzung muss zudem vorausgesetzt sein, dass von der Bereitstellung, Lagerung, Betankung bis hin zur motorischen Verbrennung keine Methanverluste auftreten.
- Wasserstoff in Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen in der landwirtschaftlichen Anwendung zwar technisch machbar, aber keine bevorzugten Optionen sind. Einsatzmöglichkeiten würden sich für Wasserstoff vor allem im mittleren Leistungsbereich ergeben, wenn eine Elektrifizierung nicht möglich ist. Vor allem die im Vergleich zu flüssigen Kraftstoffen geringe Energiedichte sowie die komplexen Anforderungen an die Bereitstellung, Lagerung und Betankung erschweren eine großflächige Anwendung, sodass andere Optionen zu bevorzugen sind. Das größte Handicap kann aber auch in der gegenüber anderen Anwendungen nachrangigen Verfügbarmachung von Wasserstoff liegen.

2.10 Szenarien für die Entwicklung des Bedarfs an Energieträgern in der Landwirtschaft

In Abhängigkeit der getroffenen Annahmen zu den eingesetzten Energieträgern kann sich der Energiebedarf für die mobilen Maschinen in der Landwirtschaft unterschiedlich entwickeln. An dieser Stelle soll eine vereinfachte Betrachtung möglicher Entwicklungen mit einer Abschätzung der Größenordnungen erfolgen (Abb. 16).

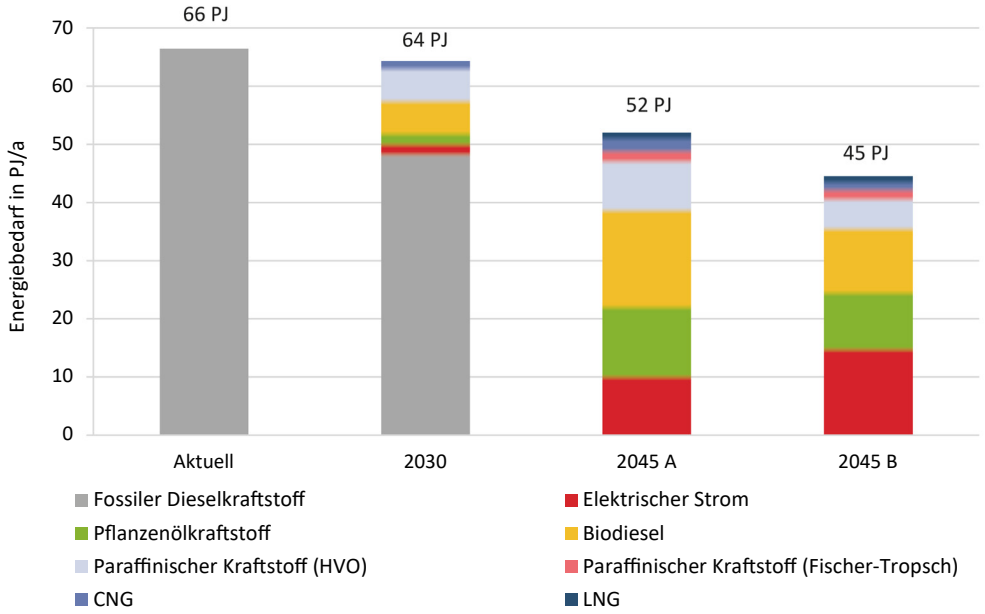


Abb. 16: Bedarf an Energieträgern für mobile Maschinen in der Landwirtschaft in den Szenarien „Aktuell", „2030", „2045 A" und „2045 B" (© KTBL)

Der zukünftige Bedarf an Energieträgern hängt insbesondere von den Annahmen zur Elektrifizierung ab. Eine starke Elektrifizierung senkt den Energiebedarf durch den besseren Wirkungsgrad der elektrischen Antriebe im Vergleich zu verbrennungsmotorischen Konzepten. Bei den in Abbildung 15 dargestellten Optionen wird von einer unveränderten landwirtschaftlichen Produktion ausgegangen. Veränderungen in der Flächennutzung oder des Umfangs der Tierhaltung werden nicht betrachtet. Ebenso sind bei dieser vereinfachten Abschätzung die Minderungspotenziale, wie sie beispielsweise im Projekt „Effiziente Kraftstoffnutzung der AgrarTechnik – EKoTech" (Götz und Köber-Fleck 2019) erarbeitet wurden, nicht berücksichtigt. Für das Szenario 2030 wird davon ausgegangen, dass nur schon heute verfügbare Energieträger eingesetzt werden. Der größte Teil des Energiebedarfs wird weiterhin über fossilen Dieselkraftstoff abgedeckt, die Elektrifizierung ist von nur untergeordneter Bedeutung, da bis 2030 nur ein begrenztes Maschinenangebot verfügbar ist und viele Bestandsmaschinen mit Verbrennungsmotoren zu diesem Zeitpunkt noch in der Nutzung sind. Ein kleiner Teil der mittelschweren Arbeiten kann mit CNG betriebenen Maschinen abgedeckt werden, der restliche Bedarf verteilt sich auf Biodiesel, HVO und Pflanzenölkraftstoff.

Für das Zieljahr 2045 werden zwei verschiedene Optionen dargestellt. Beide kommen ohne den Einsatz von fossilen Kraftstoffen aus.

In Szenario 2045 A (weniger ambitionierte Elektrifizierung) sind 70 % der leichten und Intervallarbeiten und 20 % der mittelschweren Arbeiten elektrifiziert. Der restliche Bedarf wird schwerpunktmäßig über Biodiesel und Pflanzenölkraftstoffe abgedeckt, ergänzt durch HVO-Diesel und einen kleinen Anteil FT-Diesel für die schweren Arbeiten. Im Bereich der mittelschweren Arbeiten kommt außerdem CNG zum Einsatz, für die schweren Arbeiten auch ein kleiner Teil LNG.

Im Szenario 2045 B (sehr ambitionierte Elektrifizierung) wird davon ausgegangen, dass 90 % der leichten und Intervallarbeiten und 50 % der mittelschweren Arbeiten elektrifiziert sind. Der restliche Bedarf wird schwerpunktmäßig über Biodiesel und Pflanzenölkraftstoffe abgedeckt, wie oben ergänzt durch CNG, LNG sowie HVO-Diesel und FT-Diesel. Für die beiden letzteren Kraftstoffe wird von einer begrenzten Verfügbarkeit bzw. hohen Kosten ausgegangen, sodass nur Bedarfe abgedeckt werden, die anderweitig nicht zu decken sind, beispielsweise in den noch vorhandenen älteren Bestandsmaschinen.

Tab. 4: Bedarf an Energieträgern in den Szenarien „Aktuell", „2030", „2045 A" und „2045 B"

Eingesetzte Energieträger	Szenario			
	Aktuell	2030	2045 A	2045 B
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. Liter/a			
Fossiler Dieselkraftstoff	1.900	1.300	0	0
Pflanzenölkraftstoff	0	100	300	300
Biodiesel	0	200	500	300
Paraffinischer Kraftstoff (HVO)	0	200	200	100
Paraffinischer Kraftstoff (Fischer-Tropsch)	0	0	50	50
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. kg/a			
CNG	0	30	40	30
LNG	0	0	20	20
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. kWh/a			
Elektrischer Strom	0	400	2.700	4.100

Der Gesamtenergiebedarf für die mobilen Maschinen verändert sich in den Szenarien von 66 PJ (aktuell) über 64 PJ im Jahr 2030 auf 52 PJ (Szenario 2045 A) bzw. 45 PJ (Szenario 2045 B).

2.11 Entwicklungstrends der Landwirtschaft

Die Veränderung von Betriebsgrößen, Bewirtschaftungsformen und eingesetzten Maschinenkonzepten kann einen Effekt auf den Energiebedarf für die Bewirtschaftung haben. Die Veränderungen lassen sich häufig nicht zuverlässig quantifizieren, Trends sind aber ableitbar.

Eine Bewirtschaftung von landwirtschaftlichen Flächen mit einer Reduzierung des chemischen Pflanzenschutzes verändert die Produktionsverfahren und damit auch den Maschineneinsatz und den damit verbundenen Kraftstoffbedarf. Der Reduktion von Pflanzenschutzmaßnahmen mit der Feldspritze hin zu einem vermehrten Einsatz von Verfahren der mechanischen Unkrautbekämpfung erfordern einen höheren Leistungsbedarf und gegebenenfalls zusätzliche Überfahrten. Sollten hingegen zukünftig weniger Wiederkäuer in Deutschland gehalten werden und dies auf den Ackerflächen zu einer Verschiebung des Anbaus von Futtermitteln hin zu Nahrungsmitteln, insbesondere Getreide führen, könnte daraus ein Rückgang des Kraftstoffbedarfs resultieren.

Der kontinuierliche Rückgang der Rinderzahl in Deutschland, der zwischen 2010 und 2022 rund 14 % betrug (BMEL 2022), kann einen deutlichen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf der mobilen Maschinen in der Landwirtschaft haben. Der hohe Energiebedarf mobiler Maschinen in der Rinderhaltung, insbesondere durch die Fütterung bedingt, lässt sich gut mit Strom decken. Damit wäre nur eine geringere zusätzliche Reduktion des Bedarfs an knappen, flüssigen Kraftstoffen durch den Rückgang der Bestände zu erwarten.

Ein verstärkter Einsatz von elektrisch betriebenen Agrarrobotern, die konventionelle mit flüssigen Kraftstoffen betriebene Maschinen ersetzen, würde zumindest zu einer Verschiebung hin zu elektrischem Strom als Antriebsenergie führen, aber nicht zwingend zu einem insgesamt verringerten Energiebedarf.

Die Größe der bewirtschafteten Schläge hat ebenso einen Einfluss auf den Kraftstoffbedarf wie die Hof-Feld-Entfernungen. Bei gleichbleibender Mechanisierungsstufe (Beispiel: 102 kW, Silomais, wendende Bearbeitung) summiert sich der Kraftstoffbedarf für die Bewirtschaftung eines 1-ha-Schlages nach KTBL (2023) auf 135 l/ha, bei einer Schlaggröße von 20 ha auf 116 l/ha. Hier kann der Trend zu größeren Bewirtschaftungseinheiten bzw. Betriebsgrößen einen entsprechenden Rückgang des Kraftstoffbedarfs bewirken. Die Teilung von Schlägen durch Maßnahmen zur Biodiversitätssteigerung steht dieser Reduktion unter Umständen entgegen.

3 Handlungsoptionen

Um die Umstellung von fossilen Energieträgern auf Antriebssysteme mit erneuerbaren Antriebsenergien in Landmaschinen einzuleiten und zu forcieren, müssen sich Angebot und Nachfrage möglichst parallel entwickeln. Von den Marktbeteiligten werden für das Gelingen eines Markthochlaufs langfristige Planungssicherheit durch stabile Rahmenbedingungen eingefordert.

Maßnahmen, die förderliche Rahmenbedingungen schaffen und sich als Leitplanken für künftiges Handeln erweisen können, lassen sich hierbei gliedern in politische Maßnahmen zur Schaffung finanzieller Anreize, in weitere politische Vorgaben sowie Maßnahmen, die die technischen und logistischen Grundvoraussetzungen für die Transformation schaffen oder sie flankieren. Nachfolgend ist eine Auflistung von Optionen zu finden, die sich deutlich untereinander hinsichtlich ihrer Wirkung, der Belastung für die öffentliche Haushalte usw. unterscheiden. Eine Priorisierung der Maßnahmen ist mit der Reihenfolge der Nennung nicht verbunden. Die Maßnahmen können einzeln oder in Kombination, nach entsprechender Folgenabschätzung, für eine Umstellung von landwirtschaftlichen Maschinen auf erneuerbare Antriebsenergien förderlich sein.

Politische Handlungsoptionen zur Schaffung finanzieller Anreize

- Gleichstellung, idealerweise Besserstellung erneuerbarer Antriebsenergien in der Land- und Forstwirtschaft gegenüber fossilen Energieträgern bei der Erhebung der Energiesteuer. Die Bezugsgröße für die Energiesteuer sollte die Energie und nicht das Volumen sein. Die Regelung sollte technologieoffen alle erneuerbaren Energieerzeugnisse einschließen.
- Fortführung der stufenweisen Erhöhung der Preise für Emissionszertifikate im Brennstoffemissionshandelsgesetz, um eine steigende „CO_2-Abgabe“ auf fossile Energien zu bewirken.
- Investitionsförderung für Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien, für Betankungs- und Ladeinfrastruktur, dabei Konzentration auf Systeme mit Antriebsenergien, die in besonderem Maße Nachhaltigkeitsanforderungen erfüllen und einen besonderen Nutzen, z. B. hinsichtlich regionaler Kreislaufwirtschaft, oder Mehrwert generieren.
- Implementierung der Nutzung erneuerbarer Antriebsenergien in dem nationalen GAP-Strategieplan ab 2027. Maximale Höhe der Beihilfe je Bezugsgröße (Fläche, Tierbestand usw.) verringert sich, falls nicht bestimmte Mengen erneuerbarer Antriebsenergien eingesetzt werden. Zusätzliche Anreize könnten für Eigenverbrauch oder regionalen Bezug der Antriebsenergien gesetzt werden.
- Fortschreibung ambitionierter THG-Minderungsziele im Verkehrssektor bzw. Neufassung für Antriebsenergien im Landwirtschaftssektor, um THG-Quotenerlöse zu generieren, die bei der Abgabe von klimaschonenden Energieerzeugnissen für den Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen eingepreist werden können.

Weitere politische Handlungsoptionen

- Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG 2023) im Dritten Teil, Zweiter Abschnitt um eine Treibhausgasminderungsquote für kraftstoffbedingte Emissionen in der Landwirtschaft ergänzen, mit Quotenverpflichteten entsprechend § 37a BImSchG.
- Aufforderung an die Inverkehrbringer von Landmaschinen, ab einem Stichtag nur noch Maschinen am Markt anzubieten, die entweder ausschließlich eine Typgenehmigung für erneuerbare Antriebsenergien aufweisen oder zumindest neben einer Typgenehmigung für Kraftstoffe nach DIN EN 590 und DIN EN 15940 mindestens eine weitere Typgenehmigung für eine erneuerbare Antriebsenergie haben.

- Streichung der Ausnahme von landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen aus dem Anwendungsbereich des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (§ 4 Absatz 1 Ziffer 1), mit dem Ziel, einen initiativen Markt für Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien durch die Nachfrage der öffentlichen Hand (Bund, Länder und Kommunen) zu schaffen.

Flankierende Maßnahmen von Politik und Verwaltung

- Zwischenziele bei der Umstellung auf erneuerbare Energieträger in der Landwirtschaft bis 2045 vereinbaren, kommunizieren und überwachen.
- Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse sowie aus Rest- und Abfallstoffen für die Nutzung in der Landwirtschaft in der nationalen Biomassestrategie der Bundesregierung verankern.
- Die Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien z. B. auf den Leitbetrieben im Rahmen der BMEL-Ackerbaustrategie 2035 vorführen.
- Die Vorbildfunktion der öffentlichen Hand ausbauen: Künftig ausschließlich Maschinen mit erneuerbaren Antriebsenergien auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene, auch über die Vorgaben des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungsgesetzes hinaus, beschaffen.
- Beibehaltung bzw. Fortschreibung des „Bundesprogramms Energieeffizienz und CO_2-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau", das derzeit eine Förderung für die Umrüstung oder Neuanschaffung elektrisch bzw. biokraftstoffbetriebener Landmaschinen oder auch autonom arbeitender Roboter in der Innenwirtschaft vorsieht. Förderanreize tragen mittelfristig bei, Investitionshemmnisse abzubauen und eine Durchdringung der landwirtschaftlichen Praxis mit Landmaschinen elektrifizierter oder alternativer Antriebstechnologien zu erreichen.
- Auflage von Programmen zu Forschungsförderungen, die die Entwicklung, Erprobung und Begleitforschung von alternativen Antriebssystemen, einschließlich der dazugehörigen Infrastruktur der Energiebereitstellung, unterstützen.
- Schaffung von Rahmenbedingungen, die die heimische Produktion und ergänzend den Import erneuerbarer Energieträger unterstützen. Dabei sind die Nachhaltigkeitskriterien, z. B. hinsichtlich der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung, einzuhalten.

Akteursspezifische Maßnahmen von Landmaschinenindustrie, Agrartechnikindustrie und Landmaschinenhandel

- Die Entwicklung und Markteinführung von landwirtschaftlichen Maschinen mit erneuerbaren Energieträgern einschließlich der zum Energiesystem landwirtschaftlicher Betriebe und Dienstleister passenden Infrastruktur voranbringen: insbesondere von elektrifizierten Maschinen und Geräten für die Innenwirtschaft und hofnahe Anwendungen.
- Typgenehmigungen der Motorenhersteller für alternative Kraftstoffe in Reinform und in genormten Blends durch die Landmaschinenindustrie für Neu- und Bestandsmaschinen weitergeben.
- Lösungen für die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe in Bestandsmaschinen entwickeln: Die Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe als Reinraftstoff oder in genormten Kraftstoffblends sowie Umrüstlösungen oder Motorsteuerungsupdates für die Nutzung von Reinkraftstoffen oder Blends rückwirkend freigeben.
- Elektrifizierte und alternativkraftstofftaugliche Maschinen verstärkt bewerben und mögliche Bedenken der Anwender zur praktischen Einsetzbarkeit ansprechen.

- Ein Netz von entsprechend geschulten Landtechnikhändlern und Landtechnikwerkstätten aufbauen, die Beratung sowie Service- und Reparaturarbeiten vor Ort übernehmen können. Besonders Schulungen im Umgang mit Hochvoltsystemen sind anzubieten.
- Einheitliche Schnittstellen anhand bestehender Standards im Bereich elektrischer oder teilelektrischer Antriebe und Anbaugeräte entwickeln und bereitstellen.

Akteursspezifische Maßnahmen von Kraftstoffproduzenten und Kraftstoffhandel sowie Stromnetzbetreibern

- Ausreichende Kraftstoffmengen in der geforderten Qualität auch bei saisonalen Nachfragespitzen bereitstellen.
- Sicherung der räumlichen Nähe von öffentlichen Tankstellen zu den landwirtschaftlichen Kunden oder Bereitstellung mobiler Betankungsanlagen (Hof oder Feld), falls eine Kraftstoffbereitstellung für die landwirtschaftlichen Maschinen über Hoftankstellen nicht sinnvoll erfolgen kann.
- Die besonderen Qualitätsanforderungen an Kraftstoffe für die Verwendung im Agrarsektor sicherstellen, z. B. hinsichtlich hoher Lagerstabilität durch eine spezielle Additivierung.
- Ausreichende elektrische Anschlussleistung auf landwirtschaftlichen Betrieben für die Installation von Lademöglichkeiten für elektrifizierte landwirtschaftliche Maschinen schaffen.

Akteursspezifische Maßnahmen von der agrartechnischen Forschung und Begleitforschung

- Entwicklung neuer Technologien gemeinsam mit der Industrie und der Landwirtschaft und Evaluierung der Bedingungen, unter denen diese in der landwirtschaftlichen Praxis zum Einsatz kommen können.
- Infrastrukturprobleme zur Bereitstellung von Energie, insbesondere im ländlichen Raum und in landwirtschaftlichen Betrieben analysieren.
- Rechtliche Situation und Unklarheiten, z. B. bei der Betankung von Bestandsfahrzeugen mit erneuerbaren Kraftstoffen und Kraftstoffmischungen ohne dafür vorhandene Typgenehmigung, identifizieren und klären.
- Untersuchung von Szenarien bei der vermehrten Nutzung erneuerbarer Antriebsenergien in der Landwirtschaft und daraus resultierende Nachfrage nach Energieträgern und Antriebssystemen.

Akteursspezifische Maßnahmen landwirtschaftlicher Betriebe, Maschinenringe und Lohnunternehmen

- Maschinenpark auf alternative Antriebssysteme umstellen, dabei konsequent die Elektrifizierungsmöglichkeiten nutzen.
- An der Wertschöpfung partizipieren durch die Erzeugung von Agrarrohstoffen, insbesondere Koppelprodukten der Nahrungs- und Futtermittelerzeugung, zur energetischen Nutzung – Produktion von Biokraftstoffen und elektrischem Strom.
- Stärkung der brancheninternen Kommunikation durch Landwirtinnen und Landwirte, um ein Problembewusstsein zu schaffen und Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Hierbei kann die Demonstration gelungener einzelbetrieblicher Lösungen als „Best-Practice-Beispiele" helfen.
- Das Potenzial von erneuerbaren Antriebsenergien bei der Bereitstellung von Agrarrohstoffen mit geringem CO_2-Fußabdruck nutzen.

Akteursspezifische Maßnahmen aus Wissenstransfer und Ausbildungsstätten

- Informationsvermittlung zur Stärkung des regionalen Kreislaufgedankens – Nutzung eigener bzw. regional bereitgestellter erneuerbaren Energien als Beitrag zur Sicherstellung der Nahrungsmittelproduktion.
- Antriebssysteme mit erneuerbaren Energien in der beruflichen und universitären Aus- und Weiterbildung thematisieren und vermitteln.
- Stetige zielgruppenangepasste Kommunikation innerhalb der betroffenen Kreise.
- Das Beratungsangebot der Landwirtschaftskammern und Landesanstalten sowie vergleichbarer Einrichtungen um den Aspekt treibhausgasarme Energieversorgung mobiler Maschinen ausbauen.
- Demonstration von Maschinen mit erneuerbaren Antriebssystemen, z. B. auf überbetrieblichen Ausbildungsstätten.

4 Kommunikation und Wissenstransfer

Die Umstellung landwirtschaftlicher Maschinen von fossilen auf klimafreundliche und erneuerbare Antriebsenergien ist nicht eines der Topthemen, die die Diskussionen in der Landwirtschaft, in der Landmaschinenindustrie sowie in der Politik und Gesellschaft beherrschen. Daher müssen für ein Gelingen dieser Transformation die Ziele und Lösungswege aktiv kommuniziert werden. Als Zielgruppen sind Landwirte, Landmaschinenindustrie, Landmaschinenhändler und -werkstätten, Kraftstoffproduzenten und -handel, Lehrpersonal an Universitäten, Hochschulen und Fachschulen, politische Entscheidungsträger auf Bundes- und europäischer Ebene, Behörden sowie die Gesellschaft zu nennen.

Für eine erfolgreiche Kommunikationsstrategie ist es zum Teil erforderlich, diese Zielgruppen in weitere Untergruppen aufzuteilen: Die Zielgruppe „Landmaschinenindustrie" umfasst beispielsweise Beschäftigte aus Unternehmensleitung, Ingenieurswesen, Vertrieb und Marketing sowie Vertreter der einschlägigen Berufsverbände.

Für die Einleitung und Begleitung der Umstellung landwirtschaftlicher Maschinen auf erneuerbare Antriebsenergien müssen unter anderem folgende Informationen in unterschiedlicher Breite und Tiefe an die genannten Zielgruppen vermittelt werden:

1. Schaffung eines Problembewusstseins
   - Klimaschutzziele des Sektors Landwirtschaft
   - Anteil der energiebedingten Treibhausgasemissionen
   - Beitrag der Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien zum Erreichen der Klimaschutzziele
2. Akzeptanz
   - Verfügbarkeit von Rohstoffen und Energieträgern
   - Stoff- und Energiekreisläufe
   - Wertschöpfung
   - Nutzungskonkurrenz, ethische Aspekte
3. Technische Informationen
   - Kraftstoffeigenschaften
   - Antriebstechnik
   - Betankungs- und Ladetechnik
   - Ergebnisse aus Feldtests zur Praxistauglichkeit der Landmaschinen
4. Rechtliche Vorschriften
   - Anforderungen an Hoftankstellen
   - Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit
5. Umweltwirkungen
   - Boden- und Gewässerschutz
   - Treibhausgasreduzierung
6. Wirtschaftlichkeit
   - Kosten Antriebsenergie
   - Kosten Maschinen
   - Kosten Betankungs- und Ladeinfrastruktur
   - Rahmenbedingungen hinsichtlich Fördermaßnahmen, CO_2-Bepreisung, Besteuerung usw.

7. Einsatz der Antriebssysteme auf dem landwirtschaftlichen Betrieb
   - Eignung der unterschiedlichen Antriebssysteme für spezifische Arbeitsgänge und für spezifische Betriebsstrukturen
   - Abstimmung von Antriebssystem und Arbeitsverfahren aufeinander
   - Beschaffung von Maschinen, Betankungs- und Ladeinfrastruktur sowie Kraftstoffen
   - Betriebsorganisation

Für die Wissensvermittlung, die Beratung und den Dialog sollten zielgruppenspezifische und an den Inhalten ausgerichtete Formen der Kommunikation zum Einsatz kommen. Dazu zählen beispielswiese

- Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung,
- Publikationen, Datensammlungen,
- Webinare, Beratungsgespräche,
- Erklärvideos, soziale Medien sowie
- Austausch und Diskussion am „runden Tisch".

Eine Übersicht der Informationsinhalte, die an bestimmte Zielgruppen weitergegeben werden sollen und mögliche Kommunikationsformen zeigt Abbildung 17.

Um die Informationen zielgruppengerecht vermitteln zu können, ist ein Kommunikationskonzept erforderlich, dessen Entwicklung von politscher Seite forciert werden könnte.

Informationsinhalte	Zielgruppen							
	Landwirtinnen und Landwirte	Landmaschinenindustrie	Landmaschinenhändler und -werkstätten	Kraftstoffproduzenten und -handel	Lehrpersonal	politische Entscheidungsträger	Behörden vertreter	Gesellschaft
Problembewusstsein	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen; Erklärvideos, soziale Medien	Runder Tisch	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche	Runder Tisch	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Runder Tisch		Publikationen, Datensammlungen; Erklärvideos, soziale Medien
Akzeptanz	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Runder Tisch	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Runder Tisch	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Runder Tisch		Publikationen, Datensammlungen; Erklärvideos, soziale Medien
Technische Information	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Publikationen, Datensammlungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	
Rechtliche Vorschriften	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Publikationen, Datensammlungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	
Umweltwirkungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Runder Tisch; Publikationen, Datensammlungen	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Erklärvideos, soziale Medien
Wirtschaftlichkeit	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Runder Tisch	Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Runder Tisch	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Publikationen, Datensammlungen; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Runder Tisch		
Einsatz der Antriebssysteme auf dem landwirtschaftlichen Betrieb	Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung; Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien; Publikationen, Datensammlungen		Webinare, Beratungsgespräche; Erklärvideos, soziale Medien		Publikationen, Datensammlungen; Erklärvideos, soziale Medien; Webinare, Beratungsgespräche; Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung			Erklärvideos, soziale Medien

Tagungen, Vortragsveranstaltungen, Vorlesung, Unterricht, Schulung
Publikationen, Datensammlungen
Erklärvideos, soziale Medien
Webinare, Beratungsgespräche
Runder Tisch

Abb. 17: Übersicht der Informationsinhalte, die an bestimmte Zielgruppen weitergegeben werden sollen und mögliche Kommunikationsformen (© TFZ, verändert)

Literatur

10. BImSchV (2010): Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1849), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2739) geändert worden ist

38. BImSchV (2017): Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen vom 8. Dezember 2017 (BGBl. I S. 3892), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 200) geändert worden ist

BEHG (2020): Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 3. November 2020 (BGBl. I S. 2291) geändert worden ist

Biokraft-NachV (2021): Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung vom 2. Dezember 2021 (BGBl. I S. 5126, 5143)

BImSchG (2023): Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 11 Absatz 3 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist

BMEL (2022): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2022. (Hg.) Bonn, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 66. Aufl.

BMEL (2020): Landwirtschaft verstehen – Fakten und Hintergründe. Berlin, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2. Aufl.

EG RL 97/68 (1997): Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emission von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, ABl. L 59 vom 27.02.1998, S. 1–249

EnergieStG (2018): Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660, 1007), das zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 26. Juni 2018 (BGBl. I S. 888) geändert worden ist

EU RL 2018/2001 (2018): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung), ABl. L 328 vom 21.12.2018, S. 82–208

EU VO 167/2013 (2013): Verordnung (EU) Nr. 167/2013 des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Februar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen, ABl. L 60 vom 02.03.2013, S. 1–51

EU VO 2016/1628 (2016): Verordnung (EU) 2016/1628 des europäischen Parlaments und des Rates – vom 14. September 2016 – über die Anforderungen in Bezug auf die Emissionsgrenzwerte für gasförmige Schadstoffe und luftverunreinigende Partikel und die Typgenehmigung für Verbrennungsmotoren für nicht für den Straßenverkehr bestimmte mobile Maschinen und Geräte, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1024/ 2012 und (EU) Nr. 167/ 2013 und zur Änderung und Aufhebung der Richtlinie 97/ 68/ EG, ABl. L 252 S. 53, ber. ABl. 2019 L 231 S. 29 vom 16.09.2016, S. 53–117

EU VO 2018/985 (2018): Delegierte Verordnung (EU) 2018/985 der Kommission – vom 12. Februar 2018 – zur Ergänzung der Verordnung (EU) Nr. 167/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit und die Leistung der Antriebseinheit land- und forstwirtschaftlicher Fahrzeuge und ihrer Motoren und zur Aufhebung der Delegierten Verordnung (EU) 2015/96 der Kommission, ABl. L 182/1 vom 12.02.2018, S. 1–15

EU VO 651/2014 (2014): Verordnung (EU) Nr. 651/2014 der Kommission vom 17. Juni 2014 zur Feststellung der Vereinbarkeit bestimmter Gruppen von Beihilfen mit dem Binnenmarkt in Anwendung der Artikel 107 und 108 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union, ABl. L 187/1 vom 17.06.2014, S. 1–78

Europäische Kommission (2014): Mitteilung der Kommission – Leitlinien für staatliche Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2014–2020 (2014/C 200/01), ABl. C 200 S. 1, ber. ABl. 2016 C 290 S. 11 vom 28.06.2014, 1–55

Europäische Kommission (2022): Mitteilung der Kommission – Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2022 (2022/C 80/01). Abl. C 90 vom 18.02.2022, S. 1–91

FNR (2023a): Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. https://www.fnr.de/fileadmin/Grafiken/abb_002.jpg, Zugriff am 26.07.2023

FNR (2023b): Flächennutzung in Deutschland. https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/1872/, Zugriff am 26.07.2023

Frerichs, L.; Buck, L. (2022): Structuring of electrified agricultural machine systems. Diversity of solutions and analysis methods. In: LAND.TECHNIK 2022 – The Forum for Agricultural Engineering Innovations, VDI-Wissensforum GmbH, 25.02.2022, Düsseldorf, VDI-Verlag, pp. 1–10

Geimer, M. (2020): Mobile Working Machines. Society of Automotive Engineers. Electronic publications, Warrendale, Pa., SAE International

Götz, C.; Köber-Fleck, B. (2019): Mehr Ertrag, weniger CO_2. Diesel sparen mit innovativer Landtechnik. Frankfurt am Main, VDMA Landtechnik

Heidt, C.; Helms, H.; Kämper, C.; Kräck, J. (2020): Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990–2018) – Berichtsteil TREMOD-MM. Berichtsteil „TREMOD-MM". Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-tremod-mm-2019, Zugriff am 04.07.2023

KBA (2022): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltern, Wirtschaftszweigen. Flensburg, Kraftfahrt-Bundesamt, Serie FZ 23 Jahrgänge 2010–2022

KSG (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905) geändert worden ist

KTBL (2023): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau/, Zugriff am 15.08.2023

KTBL (2022a): Betriebsplanung Landwirtschaft 2022/23. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., 28. Aufl.

KTBL (2022b): Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau, Zugriff am 15.02.2022

KTBL (2020): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)

Odenweller, A.; Ueckerdt, F. (2023): E-Fuels – Aktueller Stand und Projektionen. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Schröder, J.; Naumann, K. (Hg.) (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ Report 44, Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)

Statistisches Bundesamt (Destatis), Genesis-Online 2023. https://www-genesis.destatis.de/, Code: 61243–0005, Zugriff am 10.07.2023

Trösken, L.; Meiners, A.; Frerichs, L.; Böttinger, S. (2020): Modellbasierte Berechnung von Kraftstoffverbräuchen landwirtschaftlicher Verfahrensketten. https://www.landtechnik-online.eu/landtechnik/article/view/3253/3692, Zugriff am 10.07.2023

UBA (2022): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990–2020. Climate Change 24/2022, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt

VDB (2022): Biokraftstoffe. Unsere Produkte: Biokraftstoffe und mehr. Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie e. V., https://biokraftstoffverband.de/biokraftstoffe/, Zugriff am 01.08.2023

Vereinte Nationen (2015): Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015

Abkürzungen

a	Jahr
AEL	Alkalische Wasserelektrolyse
ATJ	Engl.: Alcohol-to-Jet (Umwandlung von Alkoholen zu Flugkraftstoff)
B0	Dieselkraftstoff ohne Biokraftstoffanteile
B7	Dieselkraftstoff mit maximal 7 % an Biokraftstoffanteilen
BtG	Engl.: Biomass-to-gas (Biomasse zu Gas)
BtL	Engl.: Biomass-to-liquid (Biomasseverflüssigung)
BtX/BTx	Engl.: Biomass-to-X (Umwandlung von Biomasse in einen Energieträger)
CAAFI	Commercial Aviation Alternative Fuels Initiative
CH_4	Methan
CNG	Engl.: Compressed natural gas (komprimiertes Erdgas)
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CRF	Engl.: Common reporting format (gemeinsames Berichtsformat)
EE-Strom	Elektrischer Strom aus erneuerbaren Energien
E-Fuels	Strombasierte Kraftstoffe
EUR	Euro
FC	Engl.: Fuel cell (Brennstoffzelle)
FAME	Fettsäuremethylester (Biodiesel)
FRL	Fuel readiness level (Kraftstoff-Reifegrad)
FT-Diesel	Fischer-Tropsch-Dieselkraftstoff
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GJ	Gigajoule
h	Stunde
ha	Hektar
HEFA	Engl.: Hydrotreated esters and fatty acids (hydrierte Ester und Fettsäuren)
HVO	Engl.: Hydrotreated vegetable oils (hydrierte Pflanzenöle)
ICE	Engl.: Internal combustion engine (Verbrennungskraftmaschine)
IEA	Internationale Energie Agentur
KBA	Kraftfahrbundesamt
kg	Kilogramm
KUEBLL	Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen (EU)
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde

l	Liter
LH2	Engl.: Liquid hydrogen (flüssiger Wasserstoff)
LNG	Engl.: Liquified natural gas (verflüssigtes Erdgas)
m^3	Kubikmeter
Mio.	Million
MJ	Megajoule
Mrd.	Milliarde
NH_3	Ammoniak
PEM-Brennstoffzelle	Engl.: Proton-exchange membrane fuel cell (Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle)
PJ	Petajoule
PtG	Engl.: Power to gas (Strom zu Gas)
PtL	Engl.: Power-to-liquid (Strom zu Flüssigkeit)
PtX/PTX/PTx	Engl.: Power-to-X (strombasierte Brenn-, Kraft- und Grundstoffe)
RFNBO	Engl.: Renewable fuels of non-biological origin (erneuerbarer Kraftstoff nicht biogener Herkunft)
SPK	Engl.: synthetic paraffinic kerosene (Synthetisches paraffinisches Kerosin)
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TREMOD(-MM)	Transport-Emissionsmodell (für mobile Maschinen)
TRL	Engl.: Technology readiness level (Technologie-Reifegrad)
UEBLL	Leitlinien für staatliche Umweltschutz- und Energiebeihilfen (EU)
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
XtL	Paraffinischer Dieselkraftstoff

Glossar

Biodiesel	Aus pflanzlichen Ölen durch Umesterung erzeugter Fettsäuremethylester.
CO_2-Äquivalent	Auf die Klimawirkung von Kohlenstoffdioxid (CO_2) umgerechnete Klimawirkung verschiedener Treibhausgase, insbesondere Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O).
Defossilisierung	Ersatz von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Alternativen (Strom, Biokraftstoffe).
Fischer-Tropsch-Diesel	Kraftstoffe, die mithilfe der Fischer-Tropsch-Synthese zur Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe hergestellt werden.
HVO-Diesel	Hydriertes Pflanzenöl, dessen Eigenschaften mit fossilem Diesel vergleichbar sind; wird aus fetthaltigen Rest- und Abfallstoffen oder frischen Pflanzenölen erzeugt.
Land- oder forstwirtschaftliche Zugmaschine	Ackertraktor beziehungsweise auf Höfen, Feldern und Grünland eingesetztes Fahrzeug auf Rädern der EG-Fahrzeugklasse „T" gemäß Richtlinie 2003/37/EG.
Nutzenergie	Anteil der eingesetzten Energie, die für den jeweiligen Zweck zur Verfügung steht, z. B. mechanische Energie für den Antrieb.
Paraffinischer Diesel	Dieselkraftstoffe auf Basis gesättigter Kohlenwasserstoffe, deren Eigenschaften mit Dieselkraftstoff vergleichbar sind, z. B. HVO-Diesel und FT-Diesel.
PEM-Brennstoffzelle	Energiewandler zur Erzeugung von elektrischem Strom aus Wasserstoff und Sauerstoff.
PtX-Kraftstoffe	„Power to X" sind gasförmige oder flüssige Kraftstoffe, die auf Basis von elektrischem Strom erzeugt werden.
Synthetische Kraftstoffe	Brennstoffe, z. B. E-Fuels/PtX, RNFBOs, die sich durch die Herstellung oder chemische Struktur von konventionellen Treibstoffen unterscheidende.
THG-Quote	Verpflichtung, die Treibhausgasemissionen von Kraftstoffen durch das Inverkehrbringen emissionsarmer Kraftstoffe, um einen festgelegten Prozentsatz zu senken. Sie ist im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt.
THG-Quotenhandel	Übertragung der Erfüllung der THG-Quotenverpflichtung auf einen Dritten, der dann die anrechenbaren Kraftstoffe in den Verkehr bringt.

Mitwirkende

Prof. Dr. Christian Beidl
Technische Universität Darmstadt, Darmstadt

Johannes Buhl
Kloster Untermarchtal, Untermarchtal

Henning Eckel
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt

Prof. Dr. Ludger Frerichs
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig

Dr.-Ing. Paul Grzeschik
DEUTZ AG, Köln

Dr.-Ing. Johannes Hipp
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt am Main

Helge Jahn
Umweltbundesamt, Dessau

Dr.-Ing. Franziska Müller-Langer
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Sabrina Reckziegel
Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Bonn

Dr. Edgar Remmele
Technologie- und Förderzentrum, Straubing

Dr.-Ing. Magnus Schmitt
Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V., Frankfurt am Main

Jörg Schröder
Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig

Jens Stalter
Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn