Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum
für Nachwachsende Rohstoffe

Bericht zum Dringlichkeitsantrag “Keine neue Tank-Teller-Diskussion – Biokraftstoffe vernünftig für die Landwirtschaft nutzen“

Beschluss des Bayerischen Landtags vom 09.04.2024 | Drucksache 19/1532

Dr. Klaus Thuneke
Dr. Norman Siebrecht
Dr.-Ing. Daniela Dressler
Dr. Edgar Remmele

Straubing, Juni 2024

Vorwort

Der vorliegende Bericht nimmt Stellung zum Dringlichkeitsantrag im Bayerischen Landtag "Keine neue Tank-Teller-Diskussion – Biokraftstoffe vernünftig für die Landwirtschaft nutzen" vom 24.01.2024 (Drucksache 19/279), gemäß Beschluss des Bayerischen Landtags vom 09.04.2024 (Drucksache 19/1532). Die Ausführungen beziehen dich daher nur auf Antriebsenergien und Antriebssysteme, die im Sektor Landwirtschaft zum Einsatz kommen. Folgende Fragen sollen nachfolgend beantwortet werden:

1. Welche Potenziale zur Bereitstellung von Biokraftstoffen bestehen für die bayerische Land- und Forstwirtschaft?

2. Welche Strategien könnten zu einer klima- und flächenschonenden Nutzung von Biokraftstoffen in Bayern führen?

3. Welche Strategien könnten verfolgt werden, damit eine dezentrale Produktion von Biokraftstoffen in Bayern zur Stärkung des ländlichen Raumes genutzt werden kann?

Die Fragen werden nach aktuellem Wissensstand, auf Basis eigener und recherchierter Daten, veröffentlichter Literatur, von Informationen aus dem Internet sowie eigener Annahmen beantwortet. Die Fragestellungen werden zum Teil etwas umfassender interpretiert. So werden beispielsweise neben den Biokraftstoffen auch andere erneuerbare Antriebsoptionen, wie z. B. batterieelektrische Antriebe, bei der Strategieentwicklung berücksichtigt, weil deren Anteil die Höhe des zukünftigen Energiebedarfs und die Art des Energieträgermixes für mobile land- und forstwirtschaftliche Maschinen in Bayern beeinflusst. Ein Großteil der getroffenen Annahmen und entwickelten Szenarien basieren auf den Ausführungen der KTBL-Sonderveröffentlichung "Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen" der KTBL-Arbeitsgruppe "Antriebssysteme für landwirtschaftliche Maschinen" [7]. Darin erfolgt eine Betrachtung auf Bundesebene, die nun durch die Verwendung bayerischer Zahlen auf die hier relevante bayerische Ebene gebracht wurde.

Herrn Henning Eckel, Teamleiter Energie, Emissionen und Klimaschutz beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. KTBL, sei an dieser Stelle für seine Hilfsbereitschaft und das zur Verfügung stellen von Berechnungstools gedankt.

Die im Bericht getroffenen Aussagen zu den aktuellen sowie verfügbaren Mengen und Flächen zur Bereitstellung von Energie bzw. Kraftstoffen beziehen sich auf unterschiedliche Datengrundlagen (z. B. Agrarbericht, Energieatlas), bestehende Vorabreiten und Annahmen. Beispiele hierfür sind Annahmen zum Flächenertrag für Pflanzenöle, der produzierten Strommenge pro Fläche oder zu den Verwertungsanteilen von z. B. Mais für Biogasanlagen. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Daten mit einheitlichem Bezugszeitraum mussten Daten mit unterschiedlichen Bezugszeiträumen bzw. Bezugsjahren verwendet werden. Hieraus können sich ggf. Abweichungen zu anderen bestehenden Aussagen zu spezifischen Sachverhalten (wie z. B. zum Flächenbedarf) ergeben. Der Raumbezug aller Aussagen bezieht sich auf Bayern. Räumlich bzw. regional differenzierte Betrachtungen konnten im Rahmen dieses Berichts nicht realisiert werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Ausgangssituation 5

1.1 Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft Bayerns und damit verbundene Treibhausgasemissionen 5

1.2 Bestand mobiler Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft Bayerns 6

1.3 Erneuerbare Antriebsenergien für land- und forstwirtschaftliche mobile Arbeitsmaschinen 7

2 Rohstoffpotenziale und Produktionskapazitäten 15

3 Kraftstoffstrategie für die Landwirtschaft in Bayern 17

3.1 Kraftstoffbedarf für die landwirtschaftliche Produktion in Bayern 17

3.2 Der Mix erneuerbarer Antriebsenergien für land- und forstwirtschaftliche Arbeitsmaschinen bis 2040 19

3.3 Rohstoffbedarf und Flächennutzung 21

3.4 Infrastruktur für Strom- und Kraftstoffbereitstellung 25

3.5 Beitrag zum Klimaschutz 26

3.6 Ökonomische Auswirkungen 29

3.7 Anreize für eine Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien 32

4 Strategie für eine dezentrale Produktion von Biokraftstoffen in Bayern 35

4.1 Erforderliche Produktionsstätten und -kapazitäten 35

4.2 Auswirkung auf den ländlichen Raum 36

4.3 Anreize für eine dezentrale Kraftstoffproduktion 36

Zusammenfassung 39

Quellenverzeichnis 41

Anhang 45

1 Ausgangssituation

Die nachfolgende Beschreibung der Ausgangssituation umfasst für Bayern den aktuellen Kraftstoffbedarf der Land- und Forstwirtschaft, den Bestand an mobilen Land- und Forstmaschinen, einen Überblick über erneuerbare Antriebsoptionen sowie die relevanten Rohstoffpotenziale und Produktionskapazitäten für Biokraftstoffe und erneuerbaren Strom.

1.1 Kraftstoffverbrauch in der Land- und Forstwirtschaft Bayerns und damit verbundene Treibhausgasemissionen

Die in der bayerischen Land- und Forstwirtschaft verwendeten steuerbegünstigten Kraftstoffmengen der Jahre 2007 bis 2021 zeigt Abbildung 1. Im Fünfjahresmittel von 2017 bis 2021 wurden von den bayerischen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben mindestens 448 Millionen Liter Dieselkraftstoff, Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff verbraucht (Verbrauchsmengen: steuerbegünstigte Mengen von Bio- und konventionellen Kraftstoffen, die zur Energiesteuerentlastung nach § 57 EnergieStG angemeldet wurden) [11] [12].

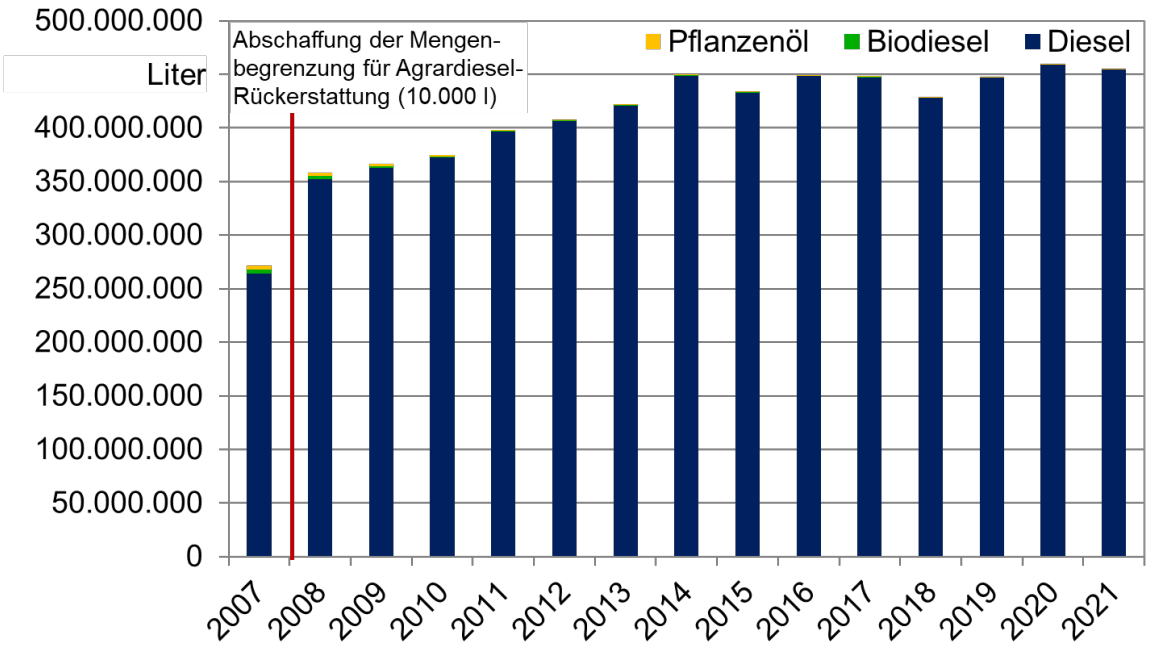


Abbildung 1: Verwendete steuerbegünstigte Mengen von Biokraftstoffen und Dieselkraftstoff in Bayern (Agrardieselentlastung nach § 57 EnergieStG), Datenquelle: Generalzolldirektion, Neustadt a. d. Weinstraße [11] [12]

Dies entspricht einem Anteil von 22 % des in der deutschen Land- und Forstwirtschaft verwendeten Kraftstoffs. Im Vergleich beträgt der Anteil landwirtschaftlich genutzter Fläche Bayerns an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland 18 %

(eigene Berechnung nach [23]). Der Anteil an den Bio-Reinkraftstoffen Biodiesel und Pflanzenölkraftstoff am bayerischen Kraftstoffverbrauch lag bei etwa 1 ‰, ca. 490.000 l im Fünfjahresmittel. In Bayern wurden mit einem Anteil von 54 % über die Hälfte aller bundesweit in der Land- und Forstwirtschaft verwendeten Bio-Reinkraftstoffe eingesetzt. Aufgrund der zwischen 2005 und 2007 geltenden Deckelung der Menge fossilen Dieselkraftstoffs auf maximal 10.000 Liter, für die eine Steuerrückerstattung gewährt wurde, ist die in der Grafik im Jahr 2007 dargestellte Kraftstoffmenge deutlich geringer als in den Folgejahren. Erkennbar ist auch eine nach 2007 abnehmende Menge Bio-Reinkraftstoffe, die zur Steuerrückerstattung angemeldet wurde.

Die Höhe der in Bilanzen ausgewiesenen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) für Antriebsenergien und Antriebssysteme variiert in Abhängigkeit der verwendeten Methodik und Zielstellung. Bei der Ermittlung nach RED II [9] werden die lebenszyklusbasierten THG-Emissionen inklusive der Vorkettenemissionen (Gewinnung und Bereitstellung) ermittelt (Well-to-Wheel), gemäß des Klimaschutzgesetzes erfolgt die Ermittlung ohne Vorkettenemissionen (Tank-to-Wheel). Mit der Kraftstoffverwendung in bayerischen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben sind jährliche THG-Emissionen in Höhe von rund 1,2 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten (Tank-to-Wheel) bzw. 1,5 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten (Well-to-Wheel) verbunden.

1.2 Bestand mobiler Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft Bayerns

Zu den mobilen Maschinen, die in der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt werden, zählen zum Beispiel Zugmaschinen, wie Traktoren oder selbstfahrende Arbeitsmaschinen, wie Mähdrescher, Maishäcksler, Forstharvester, Rückefahrzeuge, Teleskop- und Hoflader sowie Futtermischwagen. Die Einsatzintervalle und -zeiten der Maschinen variieren zwischen täglich und saisonal sowie von einmal oder mehrmals wenigen Minuten am Tag bis zum 24-Stunden-Dauer-Einsatz. Das jeweilige Einsatzprofil bestimmt die erforderlichen Betankungsintervalle mit Kraftstoffen bzw. die Ladeintervalle mit elektrischem Strom und somit die praxisgerechten Einsatzmöglichkeiten alternativer Antriebsoptionen. Die theoretische Lebensdauer der Maschinen wird mit etwa 10.000 Betriebsstunden angesetzt. Das bedeutet, dass ein Traktor mit einem jährlichen Einsatz von 750 Betriebsstunden etwa 13 Jahre, mit einem Einsatz von 500 Betriebsstunden 20 Jahre in Nutzung bleibt [7].

Nach Statistik des Kraftfahrt-Bundesamts (2023) [17] waren zum 1. Januar 2023 in Bayern von der Haltergruppe "Land- und Forstwirtschaft, Fischerei" 167.984 land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen zugelassen. Dies entspricht einem Anteil von 50 % der bundesweit zugelassenen Maschinen. Hinzu kommen rund 55.700 sonstige Zugmaschinen, 400 Sattelzugmaschinen, 4.800 Lastkraftwagen und weitere Maschinen, sowie mobile Maschinen, die über Vermietung und Leasing im landwirtschaftlichen Einsatz sind oder von Dienstleistern, wie z. B. Lohnunternehmen betrieben werden. In geringerem Umfang tragen auch stationär betriebene Motoren, zum Beispiel zum Antrieb von Bewässerungsaggregaten, zum Kraftstoffverbrauch in der Landwirtschaft bei.

1.3 Erneuerbare Antriebsenergien für land- und forstwirtschaftliche mobile Arbeitsmaschinen

Als Antriebsenergie für land- und forstwirtschaftliche Maschinen kommen die in Tabelle 1 aufgeführten Kraftstoffe und elektrischer Strom in Frage [7]. Die Kraftstoffe unterscheiden sich deutlich in ihrem technologischen Reifegrad (Technology Readiness Level bzw. Fuel Readiness Level, TRL, FRL), in den in Deutschland und Europa zur Verfügung stehenden Produktionskapazitäten sowie im Umfang der Gefahren, die von den Kraftstoffen für den Anwender und die Umwelt ausgehen. Für alle Kraftstoffe stehen Anforderungsnormen zur Verfügung, die ein verlässliches Betriebs- und Emissionsverhalten der freigegebenen Maschinen gewährleisten sowie den Handel mit diesen Kraftstoffen ermöglichen.

Tabelle 1: Erneuerbare Kraftstoffe und erneuerbarer Strom für den Antrieb land- und forstwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen - Anforderungsnormen, Entwicklungsstand (Technology und Fuel Readiness Level - TRL und FRL), Produktionskapazitäten in Deutschland und in der EU sowie Klassifizierung als Gefahrstoff im Vergleich zu Dieselkraftstoff (Quelle: nach [7])

Energieträger/-form Norm	Entwicklungsstand (TRL/FRL)		Anlagenkapazität in PJ D	 EU	Klassifizierung als Gefahrstoff
Strom (Batterie) -	11		894	5.344	
Pflanzenöl DIN 51605 (Rapsölkraftstoff), DIN 51623	11		188	677	-
Bioethanol (E85) DIN EN 15293	11 8	(Saccharide) (Lignocellulose)	23 < 1	202 3	
Biodiesel (FAME) DIN EN 14214	11 4	(Pflanzenöle, Abfallöle…) (Algen)	144 -	714 -	-
Paraffinischer Diesel (HVO) DIN EN 15940	9-11 4-9	(Pflanzenöle, Abfallöle …) (Algen, Pyrolyseöl…)	- -	149 -	
Paraffinischer Diesel (Fischer Tropsch) DIN EN 15940	6-7	(BtL, PtL)	<1	<1	
Methan DIN EN 16723-2	9-11 6-7	(anaerob/Biogas) (BtG, PtG)	36 <1	68	
Wasserstoff DIN EN 17124	9-11 5-8	(Elektrolyse/PtG) (BtG)	<1 -	<1 _	
Referenz: Diesel *DIN EN 590*	*11*		*unbekannt*		

BtL: Biomass to Liquid Synthetische Flüssig-Kraftstoffe aus Biomasse | PtL: Power to Liquid Synthetische Flüssig-Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom und einer Kohlenstoffquelle | BtG Biomass to Gas Synthetische gasförmige Kraftstoffe aus Biomasse | PtG: Power to Gas Synthetische gasförmige Kraftstoffe aus erneuerbarem Strom (Elektrolyse)

Während in Deutschland für die Erzeugung von Pflanzenölen und von Biodiesel große Anlagenkapazitäten zur Verfügung stehen, wird beispielsweise der paraffinische Dieselkraftstoff HVO nicht in Deutschland produziert (vgl. Kapitel 2). Der Entwicklungsstand von Verfahren zur Erzeugung von Synthese-Kraftstoffen oder auch für die Nutzung alternativer Rohstoffe, wie zum Beispiel Algen, ist häufig noch auf der Stufe von Entwicklung und Demonstration. Produktionsanlagen bestehen noch keine.

Von den Kraftsoffen Fettsäure-Methylester (Biodiesel) und Pflanzenölkraftstoff gehen keine nennenswerten Gefahren für Anwender und Umwelt aus. Des Weiteren unterscheiden sich die Kraftstoffe hinsichtlich ihrer chemisch-physikalischen und

kraftstofftechnischen Eigenschaften. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die volumetrische und gravimetrische Energiedichte von Kraftstoffen und in Batterien gespeichertem Strom, siehe hierzu Abbildung 2.

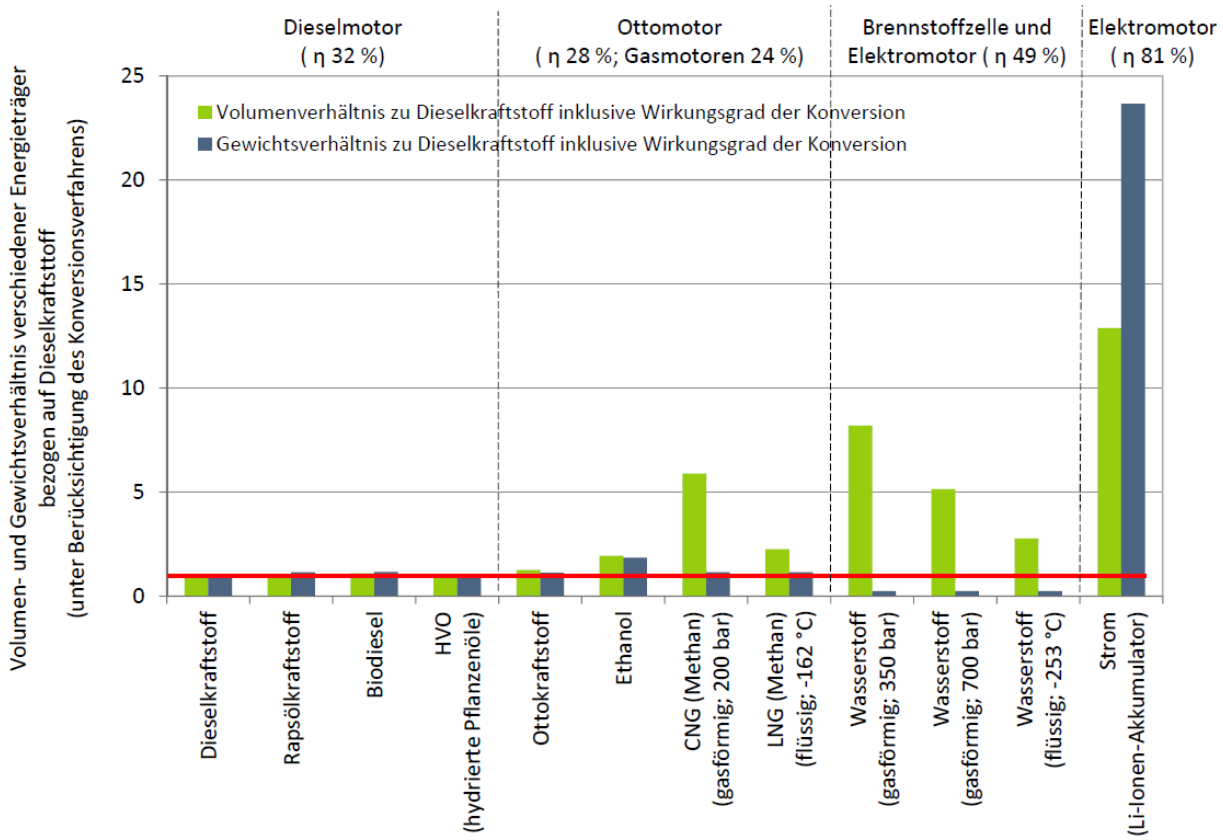


Abbildung 2: Volumen- und Gewichtsverhältnis verschiedener Energieträger und Strom für die Bevorratung am Fahrzeug - bezogen auf Dieselkraftsoff und unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Konversion in Bewegungsenergie (Quelle: [21] nach Emberger, P. (2018))

Bei begrenztem Bauraum und maximal tolerierbarem Gewicht der Maschinen lassen sich von diesen beiden Kenngrößen die üblichen Einsatzzeiten der Maschinen zwischen Betankungs- oder Ladevorgängen ableiten. Es wird deutlich, dass insbesondere das hohe Gewicht der Batterien, das zu unerwünschtem Bodendruck führt, die Verwendung batterieelektrischer Antriebe in Maschinen für Land-, Forstwirtschaft und Gartenbau einschränkt. Es sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 2 und Abbildung 3 zu Grunde gelegte Konversionswirkungsgrad eines Gas-Ottomotors von 24 %, bei heutigen CNG- und LNG-Traktoren mit optimiertem Brennverfahren auch höher liegen und nahe an den Konversionswirkungsgrad eines Dieselmotors herankommen kann. In diesem Fall verbessert sich das dargestellte Volumen- und Gewichtsverhältnis von CNG im Vergleich zu Diesel. Abbildung 3 zeigt mögliche Einsatzzeiten von Maschinen unterschiedlicher Leistung bei der Verrichtung typischer landwirtschaftlicher Arbeiten bei der Nutzung verschiedener Kraftstoffe und elektrischem Strom und üblichen Volumina für Tank und Batterie auf der Maschine. Dabei wird deutlich, dass insbesondere für einen leistungsfähigen

Standardtraktor zur schweren Bodenbearbeitung oder für eine schlagkräftigen Erntemaschine wenig energiedichte Energieträger wie Strom aus einer Li-Ionen-Batterie, Wasserstoff oder CNG keine praxisgerechten Alternativen darstellen. Denn häufige Unterbrechungen zum Nachtanken bzw. Nachladen verringern die Maschinenauslastung und erhöhen die Kosten.

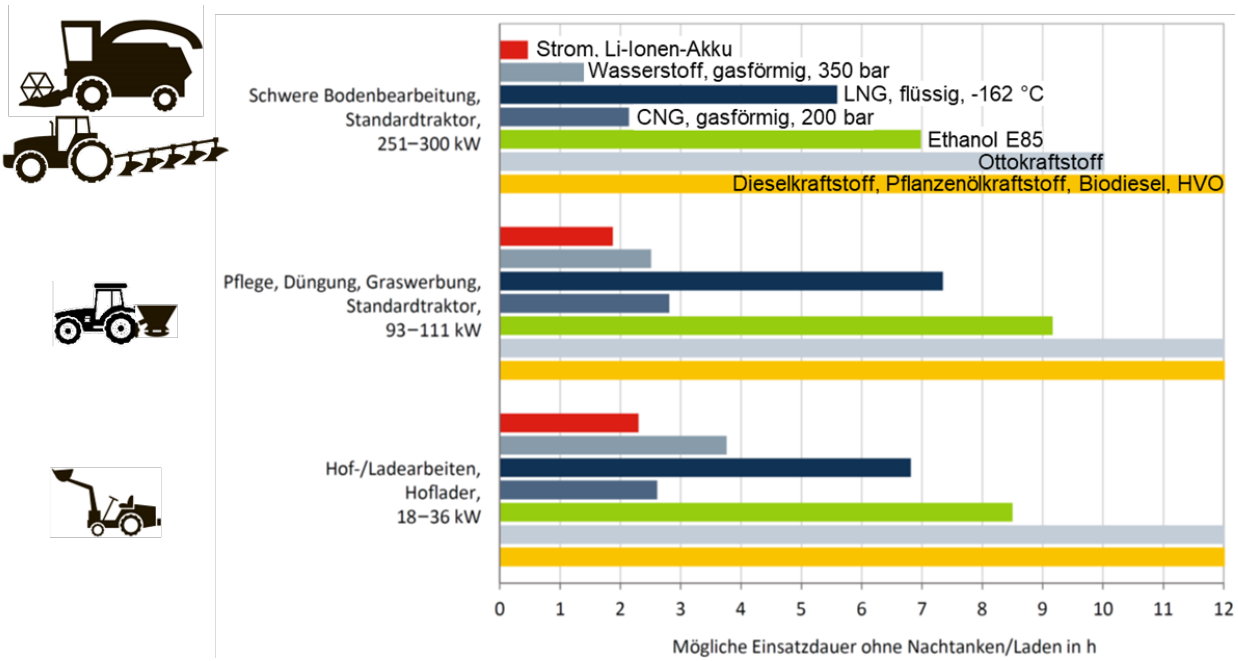


Abbildung 3: Mögliche Einsatzzeiten von Maschinen unterschiedlicher Leistung bei der Verrichtung typischer landwirtschaftlicher Arbeiten bei der Nutzung verschiedener Kraftstoffe und elektrischem Strom und üblichen Volumina für Tank und Batterie auf der Maschine (Quelle: nach [21])

Die verschiedenen Kraftstoffoptionen werden im Folgenden kurz portraitiert [24].

Pflanzenölkraftstoff, Rapsölkraftstoff

Normgerechter Rapsöl- und Pflanzenölkraftstoff lässt sich sowohl in industriellen Ölmühlen durch Heißpressung und Lösungsmittelextraktion mit anschließender Raffination als auch im schonenden Kaltpressverfahren mit Nachbehandlung in dezentralen Kleinanalgen, z. B. in der Hand der Landwirtschaft, herstellen [20]. Die Verarbeitungskapazität industrieller Ölmühlen beträgt bis zu 4.000 t Ölsaat pro Tag, in dezentralen Kleinanlagen zwischen 0,5 und 25 t Ölsaat pro Tag, selten auch darüber [18]. Die Landwirtschaft kann als Produzent von Ölsaaten und insbesondere als Betreiber dezentraler Ölmühlen an der Wertschöpfung teilhaben. Die Verwendung von reinen Pflanzenölen als Kraftstoff in Land- und Forstmaschinen ist in Feldversuchen vielfach erprobt. Aufgrund der von Diesel abweichenden Eigenschaften, wie z. B. Fließfähigkeit und Zündverhalten, kann Pflanzenölkraftstoff in heutigen Serien-Dieselmotoren nur nach Anpassungen am Motor-, Kraftstoff- und Abgassystem verwendet werden.

In Mitteleuropa wird meist Rapsölkraftstoff nach DIN 51605 eingesetzt. Seltener werden auch Sonnenblumenöl, Sojaöl oder Leindotteröl und Ölmischungen als Pflanzenölkraftstoff nach DIN 51623 genutzt. Rapsölkraftstoff zeichnet sich durch eine hohe Energiedichte, ähnlich der von Diesel aus. Er ist biologisch schnell abbaubar und weitgehend unschädlich für Boden und Gewässer.

Der Landmaschinenhersteller John Deere arbeitet an der Kommerzialisierung von Traktoren, die ausschließlich mit reinem Rapsölkraftstoff betrieben werden können. Daneben bieten verschiedene Firmen sogenannte Zwei-Tank-Lösungen an, um Serientraktoren auf Pflanzenölbetrieb umzurüsten. Lediglich der Kaltstart erfolgt hierbei mit Diesel. In Bayern sind dies z. B. die Firmen Bioltec Systems GmbH und BayWa AG Technik Servicezentrum Tittmoning-Wiesmühl.

Fettsäure-Methylester (Biodiesel)

Als Biodiesel wird Fettsäure-Methylester, kurz FAME (Fatty Acid Methyl Ester) bezeichnet, der zumeist durch den chemischen Prozess der Umesterung pflanzlicher Öle in industriellen Anlagen hergestellt wird. In Deutschland werden vor allem Altspeiseöle und Rapsöl als Rohstoffe verwendet. Produktionskapazitäten von Biodieselanalgen liegen üblicherweise bei durchschnittlich deutlich über 100.000 t pro Jahr [27]. Falls in Biodieselanlagen frisches Pflanzenöl verarbeitet wird, können Landwirte als Ölsaatenproduzenten profitieren. Genossenschaftlich betriebene Biodieselanlagen könnten auch einen stärkeren regionalen Bezug haben. Landwirte wären dann auch in größerem Maße an der Wertschöpfung beteiligt. Technische Konzepte für Kleinanalgen zur Biodieselerzeugung wurden in der Vergangenheit z. B. von RMEnergy Umweltverfahrenstechnik GmbH demonstriert, haben sich aber am Markt nicht etabliert.

Biodiesel wird derzeit überwiegend fossilem Dieselkraftstoff mit Anteilen von bis zu 7 künftig auch 10 Prozent beigemischt, kann aber auch unvermischt als sogenanntes B100 eingesetzt werden. Die Qualitätsanforderungen an FAME sind in der Norm DIN EN 14214 geregelt. Wesentliche Kraftstoffeigenschaften von Biodiesel, wie Fließfähigkeit und Wintertauglichkeit sind ähnlich wie von Diesel. Biodiesel ist leicht biologisch abbaubar und nur schwach wassergefährdend, er belastet Boden und Gewässer weniger stark als fossiler Diesel, wenn er in die Umwelt gelangt.

Einige ältere Bestandsmaschinen besitzen Herstellerfreigaben für B100. Neuere Traktoren werden zum Teil für Biodieselanteile von 20 oder 30 Prozent freigegeben, meist aber nicht für B100. Untersuchungen mit Diesel-Traktoren aktueller Bauart zeigen, dass diese teilweise auch ohne technische Veränderungen B100 tanken könnten. Höhere Kraftstoffverbräuche oder geringere Leistung im Vergleich zu Diesel sind dem geringeren Heizwert von FAME geschuldet. Voraussetzung für die Nutzung von B100 ist die Freigabe des Maschinenherstellers.

Bio-CNG, Bio-LNG (Biomethan)

Biomethan ist ein gasförmiger Kraftstoff, der vorwiegend aus Methan besteht und im Gegensatz zu fossilem Erdgas aus biogenen Rohstoffen hergestellt wird. Als Rohstoffe werden entweder Energiepflanzen oder biogene Abfall- und Reststoffe, wie z. B. Gülle eingesetzt. Durch die Vergärung der Rohstoffe entsteht zunächst Biogas, das in einem weiteren Schritt zu Biomethan aufbereitet wird. Biomethan kann aber auch aus Klär- oder Deponiegas gewonnen werden. Die Landwirtschaft kann in die gesamte Wertschöpfungskette der CNG- oder LNG-Bereitstellung eingebunden sein: In der Landwirtschaft werden die Substrate für die Biogaserzeugung produziert oder sie fallen als Rest- und Abfallstoffe an. Biodieselanlagen werden in der Regel in der Hand der Landwirtschaft betrieben und auch die Aufbereitung zu Biomethan und die Weiterverarbeitung zu den Kraftstoffen CNG und LNG passiert üblicherweise im landwirtschaftlichen Umfeld.

Komprimiertes Erdgas bzw. Biomethan wird als CNG (Compressed Natural Gas) bezeichnet. Die Anforderungen sind in der DIN EN 16723-2 festgelegt. Der Energiegehalt je Volumeneinheit beträgt bei einem Druck von 200 bar nur knapp ein Viertel von Dieselkraftstoff. Für die gleiche Reichweite ist also ein 4- bis 5-mal so großes Tankvolumen erforderlich. Durch Abkühlung auf -162 °C kann gasförmiges Biomethan zu Bio-LNG (Liquified Natural Gas) verflüssigt werden. Dabei erhöht sich zwar die Energiedichte, aber das Tankvolumen muss immer noch rund 2/3 größer als von Diesel oder pflanzenölbasierten Kraftstoffen sein, um die gleichen Einsatzzeiten zu erreichen. Bei längeren Standzeiten der Maschinen sollte auf jeden Fall der Tank entleert werden, da bei Erwärmung ein Teil des LNG wieder gasförmig wird und bei Druckanstieg über das Sicherheitsventil entweicht.

Mehrere Hersteller haben bereits Traktor-Prototypen vorgestellt, die mit CNG betrieben werden können. Diese wurden aber nicht in größeren Stückzahlen produziert. Der Landmaschinenhersteller New Holland bietet aktuell zwei Typen von in Serie gefertigten Methangastraktoren an. Voraussetzung für die Nutzung eines Methangastraktors ist die räumliche Nähe zu einer CNG- oder LNG-Betankungsmöglichkeit.

Paraffinischer Dieselkraftstoff HVO

Hydriertes Pflanzenöl (HVO) wird aus Rest- und Abfallstoffen oder Pflanzenölen in großen Raffinerien außerhalb Deutschlands hergestellt. Es ist genormt als paraffinischer Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940 und besitzt mit Ausnahme der geringeren Dichte ähnliche Eigenschaften wie fossiler Diesel. HVO ist wie Biodiesel leicht biologisch abbaubar und meist nur schwach wassergefährdend. Paraffinischer Dieselkraftstoff kann aber nicht nur aus Rest- und Abfallstoffen oder Pflanzenölen hergestellt, sondern auch aus fossilen Rohstoffen wie zum Beispiel Erdgas (Gas-to-Liquid) oder Kohle (Coal-to-Liquid) über das Fischer-Tropsch-Verfahren und auch aus Strom (Power-to-Liquid) produziert werden. Die Landwirtschaft profitiert bei dem in Deutschland in Verkehr gebrachten HVO weder über die Bereitstellung der Rohstoffe noch ist sie an der Erzeugung von HVO-Diesel beteiligt.

Paraffinsicher Dieselkraftstoff ist zwischenzeitlich in die 10. Bundes-Immissionsschutzverordnung aufgenommen und darf an öffentlichen Tankstellen verkauft werden. Schon seit

längerer Zeit kann es in Eigenverbrauchstankstellen bereitgestellt, getankt und für Fuhrparks sowie zur Forschung und Erprobung verwendet werden.

Ein Großteil der Motoren- und Landmaschinenhersteller geben vor allem neuere Modelle für die Verwendung von paraffinischem Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 frei. Eine Anpassung des Motors ist nicht erforderlich. Auch ältere Maschinen können meist problemlos von Diesel auf HVO umgestellt werden. In wenigen Fällen kann es nach der Umstellung zu Undichtigkeiten an Schläuchen oder Dichtungen kommen. Aufgrund der Dichteunterschiede müssen gelegentlich auch die Schwimmer am Tankgeber getauscht werden.

Elektrischer Strom

Mehrere etablierte Firmen und Start-Ups entwickeln oder bieten Kompakttraktoren und Hoflader an, die mit elektrischem Strom aus Batteriespeichern betrieben werden. Um die gleiche Arbeit wie mit einer Dieselmaschine verrichten zu können, sind Batterien erforderlich, die etwa 20-mal schwerer und 10-mal so groß sind als der sonst dafür benötigte Dieseltank. Aus diesem Grund sind E-Traktoren nur bei geringen Leistungsanforderungen und kürzeren Einsatzzeiten in Hofnähe oder auf befestigten Flächen zweckmäßig. Positiv ist dabei, dass Arbeiten in geschlossenen Räumen, wie Stallungen, lokal emissionsfrei erfolgen können. Elektromotoren sind als Energiewandler im Vergleich zu Verbrennungsmotoren zudem deutlich effizienter. Bei der Verwendung von Strom z. B. aus der eigenen PV-Anlage ist eine Selbstversorgung möglich. Dies kann zur Minderung der Betriebskosten von elektrisch angetriebenen landwirtschaftlichen Maschinen im Vergleich zu herkömmlichen Kraftstoffen führen und direkt THG-Emissionen reduzieren.

Hybride Antriebe als eine Kombination von Verbrennungsmotor und batterieelektrischem Antrieb vereinen die Vorteile beider Technologien. Von Nachteil sind jedoch das höhere Gewicht, der zusätzlich erforderliche Bauraum und die höheren Kosten.

Wasserstoff

Wasserstoff, der mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, kommt als klimafreundlicher Energieträger für Verbrennungsmotoren oder Brennstoffzellen in Betracht. Die Energiedichte je Volumeneinheit Wasserstoff liegt bei 700 bar Druck bei etwa 13 Prozent und im flüssigen Zustand bei -253 °C bei etwa 24 Prozent im Vergleich zu Diesel, so dass für gleiche Reichweiten weitaus größere Tankvolumina erforderlich sind.

Der hohe Strom- und Wasserbedarf zur Herstellung von Wasserstoff sowie der Energiebedarf zum Speichern belastet die Energie- und Umweltbilanz. Erneuerbarer ("grüner") Wasserstoff wird noch nicht in größeren Mengen erzeugt, ist aber in der chemischen und der Stahl-Industrie sehr begehrt. Zudem ist eine flächendeckende Versorgung des ländlichen Raums mit Wasserstofftankstellen nicht absehbar, zumal diese sehr teuer sind. Eine Erzeugung von Wasserstoff auf dem Hof zum Zweck der Nutzung als Kraftstoff ist aus heutiger Sicht aufgrund der hohen Investitionskosten von Elektrolyseuren, Speichertechnologien und Betankungsanlagen bei relativ geringer Auslastung keine sinnvolle Option.

E-Fuels für Dieselmotoren

E-Fuels sind gasförmige oder flüssige Kraftstoffe, die mithilfe von (erneuerbarem) Strom - über den Schritt der Elektrolyse von Wasser - aus Wasserstoff und Kohlendioxid hergestellt werden. Das Kohlendioxid stammt entweder aus Verbrennungsprozessen oder aus der Umgebungsluft, wo es nur in sehr geringer Konzentration vorliegt und mit großem Aufwand gewonnen werden kann. Nachteilig sind der hohe Strombedarf für die Produktion und die hohen Herstellungskosten.

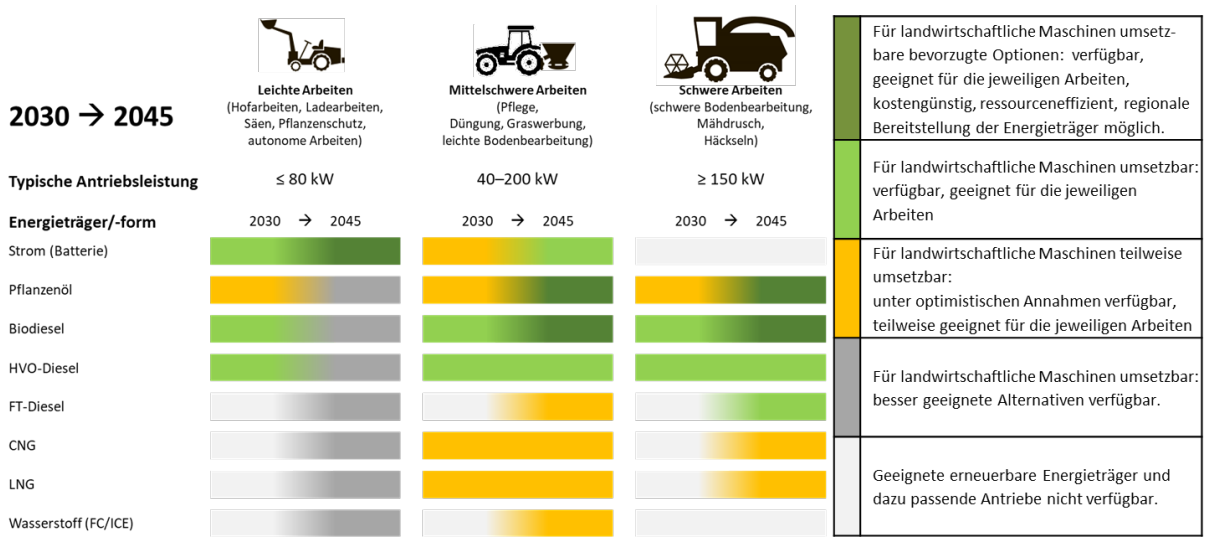
E-Fuels für Dieselmotoranwendungen (Power-to-Liquid) zählen wie HVO zu den paraffinischen Dieselkraftstoffen und sind genormt nach DIN EN 15940, siehe auch oben "Paraffinischer Dieselkraftstoff HVO". Sie können als sogenannte Drop-In-Kraftstoffe Dieselkraftstoff direkt ersetzen, ohne dass die vorhandenen Tanks oder Motorsysteme angepasst werden müssen.

Für viele Verkehrsträger, insbesondere Flugzeuge, gelten E-Fuels als attraktive, wenn auch teure, klimafreundliche Kraftstoffoption für die Zukunft, zu der es kaum Alternativen gibt. Konkurrenzen um die Verteilung erscheinen deshalb unausweichlich. Bislang werden aber E-Fuels nicht in nennenswerter Menge produziert. Die Produktion von E-Fuels wird nach heutigem Ermessen nicht in der Hand der Landwirtschaft erfolgen.

Technische Optionen für 2030 und 2045

Die technischen Optionen für den Antrieb landwirtschaftlicher Maschinen verschiedener Leistungskategorien mit erneuerbarer Energie wurden in REMMELE et al. (2020) [21] beschrieben und in einer KTBL-Sonderpublikation (2023) von ECKEL et al. [7] für das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft näher diskutiert und bewertet. Die technisch möglichen Antriebsoptionen perspektivisch für das Jahr 2030 und das Jahr 2045 für unterschiedliche Arbeitserfordernisse in der Land- und Forstwirtschaft zeigt Abbildung 4. In die Bewertung gingen folgende Kriterien ein:

- Chemische und physikalische Eigenschaften des Energieträgers,
- Rohstoffpotenzial / Potenzial für elektrische Energie,
- Verfügbarkeit einer Technologie für die Bereitstellung von Energieträgern,
- Verfügbarkeit des Energieträgers am Markt,
- Energieeffizienz der Energieträgerbereitstellung,
- Wirkungsgrad Antriebssystem,
- Infrastruktur für Betankung oder Laden,
- Betankung oder Ladevorgang,
- Energiespeicherkapazität,
- Verfügbarkeit der Maschinen am Markt,
- Investitions- und Betriebskosten sowie
- Regionale Wertschöpfung und Selbstversorgung.



HVO: Paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 aus Pflanzenöl Hydrotreated Vegetable Oil | FT: Paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 aus Fischer-Tropsch-Synthese | CNG Biomethan als Compresseed Natural Gas | LNG Biomethan als Liquified Natural Gas | FC Fuel Cell (Brennstoffzelle) | ICE Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)

Abbildung 4: Technisch mögliche Antriebsoptionen 2030 und 2045 für unterschiedliche Arbeitserfordernisse [7]

Das KTBL-Expertengremium kam zu dem Ergebnis, dass es im Jahr 2030 möglich sein wird, leichte Arbeiten (Leistung ≤ 80 kW, z. B. Hof- und Ladearbeiten, Säen, Pflanzenschutz, autonome Arbeiten) mit Maschinen durchzuführen, die entweder mit elektrischem Strom oder aber auch mit Biodiesel und HVO in einem Verbrennungsmotor angetrieben sind. Teilweise werden auch Maschinen zur Verfügung stehen, die Pflanzenölkraftstoff nutzen können. Mittelschwere Arbeiten (40-200 kW, z. B. Pflege, Düngung, Graswerbung, leichte Bodenbearbeitung) werden überwiegend mit Biodiesel und HVO-Kraftstoff verrichtet werden können. Auch die Nutzung von Pflanzenölkraftstoff, CNG, LNG sowie batterieelektrischen Antrieben wird unter günstigen Bedingungen möglich sein. Für schwere Arbeiten (≥ 150 kW, schwere Bodenbearbeitung, Mähdrusch, Häckseln) stehen Biodiesel und HVO zur Verfügung und eventuell auch Maschinen, die mit Pflanzenölkraftstoff angetrieben werden. Im Jahr 2030 stehen strombasierte Kraftstoffe zum Beispiel aus Fischer-Tropsch-Synthese oder auch grüner Wasserstoff voraussichtlich nicht zur Verfügung.

Im Jahr 2045 dominiert als beste Option für leichte Arbeiten der batterieelektrische Antrieb. Für mittelschwere und schwere Arbeiten zeichnet sich als beste Option die Nutzung von Pflanzenöl und Biodiesel als Kraftstoff ab. Zum Teil können mittelschwere Arbeiten auch schon mit batterieelektrischen Antrieben bewerkstelligt werden. Auch HVO steht für mittelschwere und schwere Arbeiten zur Verfügung. Unter günstigen Umständen können auch Fischer-Tropsch-Diesel, CNG. LNG und Wasserstoff für mittelschwere Arbeiten genutzt werden. Für schwere Arbeiten kann Fischer-Tropsch-Kraftstoff auch gezielt zum Einsatz kommen und unter günstigen Umständen, insbesondere wenn Betankungsmöglichkeiten in der Nähe vorhanden sind, kann auch CNG und LNG, genutzt werden. Batterieelektrische Antriebe und auch Wasserstoff als Energieträger werden für schwere Arbeiten in der Land- und Forstwirtschaft auch 2045 keine Option sein.

2 Rohstoffpotenziale und Produktionskapazitäten

Nachfolgende Zusammenstellung der Rohstoffpotenziale und Produktionskapazitäten für Biokraftstoffe und erneuerbaren Strom in Bayern basiert auf unterschiedlichen Datenquellen und variierenden Bezugsjahren bzw. Jahresmittel. Beispielsweise wurden die Produktionskapazitäten zum Teil bereits im Jahr 2021 erhoben und nach Möglichkeit nun aktualisiert. Da die theoretischen, technischen oder wirtschaftlichen Potenziale von vielfältigen Faktoren beeinflusst werden, ist eine Abschätzung für Bayern in diesem Rahmen nicht möglich. Daher wird im Folgenden die bisherige Flächennutzung für den Anbau Nachwachsender Rohstoffe in Bayern aufgezeigt.

Rohstoffpotenziale in Bayern - Flächennutzung Anbaubiomasse

Nachwachsende Rohstoffe werden sowohl zu Energiezwecken als auch stofflich genutzt. Gemäß dem Agrarbericht Bayern 2022 [1] betrug im Jahr 2020, die Flächennutzung für die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen in Bayern 448.000 ha, davon 34.000 ha bzw. 8 % für eine stoffliche und 414.000 ha bzw. 92 % für eine energetische Verwendung.

Die Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe in Bayern betrug im Jahr 2020 etwa 14 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Bayerns. Dabei entfielen ca. 337.300 ha auf Ackerflächen (17 % der Ackerfläche Bayerns) und ca. 110.700 ha auf Grünland. Darin enthalten sind ca. 4.000 ha Dauerkulturen zum Anbau von Festbrennstoffen bzw. Biogassubstrate zur energetischen Nutzung (Kurzumtriebsplantagen, Miscanthus, Riesenweizengras, Durchwachsene Silphie), die auf Ackerflächen angebaut werden. Auch Blühmischungen und alternative Kulturen zur energetischen Nutzung nehmen (auf niedrigem Niveau) im Anbauumfang stark zu [1].

Von den 448.000 ha für die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen werden rund 335.200 ha für den Anbau von Biogaspflanzen genutzt (davon 110.700 ha Grünland), etwa 63.000 ha Ackerland für Raps zur Herstellung von Biodiesel und Rapsölkraftstoff sowie 10.000 ha für die Bereitstellung von Bioethanol. Die restliche Fläche wird für den Anbau von Kulturen zur stofflichen Nutzung, für Dauerkulturen und Festbrennstoffe verwendet. Der bei der Produktion von Rapsöl anfallende Presskuchen ist ein eiweißreiches Tierfutter, das Sojaimporte ersetzt. Auf den ca. 63.000 ha Rapsanbaufläche werden neben den rund 94,5 Mio. l Rapsölkraftstoff oder Biodiesel gleichzeitig auch ca. 126.000 t Presskuchen, als regionales gentechnisch nicht verändertes Eiweißfuttermittel, erzeugt.

Die Zuordnung der Flächennutzung für bestimmte Zwecke ist nicht immer eindeutig. Raps ist beispielsweise eine "Multi-Purpose-Pflanze", die je nach Bedarf Erzeugnisse für Teller, Trog und Tank liefert. Weil die Erlöse bei der Verarbeitung zu Speiseöl in der Regel am höchsten sind, wird meist primär der Nahrungsmittelmarkt bedient. Die Mengen, die über den Speiseöl-Bedarf hinaus gehen, stehen für die Kraftstoffproduktion zur Verfügung. Die mögliche Nutzung als Kraftstoff gewährleistet somit, dass auch bei Missernten oder in

Krisenzeiten ausreichend Rapsöl für Nahrungsmittel zur Verfügung steht und dass bei Überangebot die Verkaufspreise nicht zu tief fallen.

Biokraftstoff-Produktionsanlagen in Bayern

In der Ölmühle ADM Spyck in Straubing werden Ölsaaten (Raps, Soja) verarbeitet. Das teilraffinierte Pflanzenöl ist zur Weiterverarbeitung für den Lebensmittelmarkt sowie gegebenenfalls auch für den Kraftstoffmarkt in anderen Produktionsstätten außerhalb Bayerns bestimmt.

In der Biodiesel-Produktionsanlage Tecosol in Ochsenfurt werden überwiegend Altspeiseöle und –fette, pflanzliche Fettsäuren und sonstige Reststoffe aus der pflanzenölverarbeitenden Industrie sowie zu einem geringen Anteil rohe und raffinierte Pflanzenöle zu Fettsäure-Methylester (FAME, Biodiesel) verarbeitet. Die Produktionskapazität beträgt 90.000 Tonnen pro Jahr [27]. Auch von der Biosyntec in Regensburg werden Altspeiseöle und -fette zu Biodiesel verarbeitet. Die Produktionskapazität liegt bei 50.000 Tonnen pro Jahr [27]. In Summe beträgt die Biodieselproduktionskapazität in Bayern 140.000 Tonnen; dies entspricht rund 159 Millionen Liter.

Lediglich in wenigen (Eigene Schätzung: weniger als 10) verbliebenen dezentralen Ölmühlen wird Pflanzenölkraftstoff (überwiegend Rapsölkraftstoff) aus Anbaubiomasse in sehr geringem Umfang erzeugt. Dieser wird primär regional in Land- und Forstmaschinen eingesetzt. Im Jahr 2007 waren in Bayern 246 dezentrale Ölmühlen in Betrieb. Bei der letzten Erhebung im Jahr 2014 waren 85 dezentrale Ölmühlen in Betrieb und weitere 37 vorübergehend stillgelegt [6].

Gemäß dem Agrarbericht Bayern 2022 [1] waren im Jahr 2020 in Bayern rund 2.700 Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung von 1.445 Megawatt (MW) sowie 22 Biomethananlagen mit einer Biomethankapazität von ca. 12.500 Nm³/h installiert [4]. Die Anzahl der im bayerischen Energieatlas aufgeführten landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern beträgt 3.564, die insgesamt 3.144 Mio. m³ Biogas im Jahr produzieren [2]. Der überwiegende Anteil des Biomethans wird in das Erdgasnetz eingespeist, Informationen über die genauen Absatz- und Nutzungswege liegen für Bayern nicht vor. Bundesweit dienen etwa 10 % des erzeugten Biomethans als Kraftstoff [19]. Für die Substratversorgung der bayerischen Biogasanlagen werden rund 10 % (224.500 ha) der bayerischen Ackerfläche und 10 % (110.500 ha) der Dauergrünlandfläche genutzt [1]. Die Biogasproduktion erfolgt primär für die Stromerzeugung.

In Bayern ist keine Anlage zur Herstellung von Bioethanolkraftstoff aus zucker- oder stärkehaltiger Anbaubiomasse bekannt. Die Firma Clariant betrieb in Straubing bis vor kurzem eine Demo-Anlage für die Produktion von Zellulose-Ethanol aus Agrarreststoffen. Dort wurden pro Jahr ca. 5.000 t Stroh zu 1.000 t Zellulose-Ethanol verarbeitet, der primär für den chemisch-stofflichen Bereich verwendet wurde. Die Anlage ist nicht mehr in Betrieb.

3 Kraftstoffstrategie für die Landwirtschaft in Bayern

Im Folgenden werden Szenarien für die Landwirtschaft berechnet, die Forstwirtschaft bleibt unberücksichtigt. Die meisten Arbeiten in der Forstwirtschaft sind den Kategorien mittelschwere und schwere Arbeiten, mit den entsprechenden Kraftstoffverbräuchen, zuzuordnen. Der Anteil des Kraftstoffverbrauchs der Forstwirtschaft beträgt ca. 8 % am Gesamtverbrauch der Land- und Forstwirtschaft [26].

3.1 Kraftstoffbedarf für die landwirtschaftliche Produktion in Bayern

Der größte Teil des Kraftstoffbedarfs in der Landwirtschaft entsteht beim Einsatz mobiler Maschinen in der Feldarbeit, bei Transporten, Umschlagarbeiten und in der Tierhaltung, insbesondere in der Rinderfütterung. Ein kleinerer Teil ist auf den Betrieb von Bewässerungsaggregaten zurückzuführen. Von Eckel et al. (2023) [7] wurde eine Abschätzung für den bundesweiten Dieselbedarf im Pflanzenbau und in der Tierhaltung vorgenommen. Dabei erfolgt eine Klassifizierung der landwirtschaftlichen Arbeiten in leicht, mittelschwer und schwer anhand des Dieselbedarfs je Hektar (< 5 l/ha, 5-15 l/ha, > 15 l/ha). Mit der gleichen Methode wurde der in Tabelle 2 gezeigte Dieselbedarf für den Anbau der Hauptkulturen und für die Rinderhaltung in Bayern berechnet (Quellen siehe Anhang). Die betrachteten Kulturen decken rund 93 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Bayern ab.

Bezogen auf die Anbaufläche der Hauptkulturen (Ackerkulturen und Dauergrünland), die etwa 93 % der Gesamtanbaufläche Bayerns abdeckt [1], werden, wie Abbildung 5 zeigt, 27 % des in der Landwirtschaft eingesetzten Dieselkraftstoffs für schwere Arbeiten verwendet, 39 % für mittelschwere und 34 % für leichte Arbeiten. Werden nur die Ackerkulturen betrachtet, steigt der Anteil schwerer Arbeiten auf 46 %. Wird zur Gesamtfläche auch der Dieselverbrauch in der Tierhaltung (hier ausschließlich Rinderhaltung) berücksichtigt, entfallen 24 % des Kraftstoffverbrauchs auf leichte Arbeiten, 28 % auf mittelschwere Arbeiten, 20 % auf schwere Arbeiten und 28 % auf die Tierhaltung. In der Tierhaltung entfällt der größte Teil des Dieselbedarfs auf die Futtervorlage, das Einstreuen und die Entmistung in der Rinderhaltung. Der hohe Kraftstoffbedarf ergibt sich durch den täglichen mehrstündigen Einsatz der Maschinen rund ums Jahr. Leichte Arbeiten in der Flächenbewirtschaftung und die überwiegend leichten Arbeiten, die in der Tierhaltung anfallen, machen mehr als 50 % des Dieselverbrauchs in der bayerischen Landwirtschaft aus. Diese Arbeiten sind am ehesten geeignet, um sie mit batterieelektrisch angetriebenen Maschinen auszuführen, so dass hier ein erhebliches Kraftstoffeinsparpotenzial vorliegt.

Tabelle 2: Berechneter Dieselbedarf zur Erzeugung der Hauptkulturen und in der Tierhaltung in Bayern, Bezugsjahr 2021 (berechnet nach KTBL [7] für Bayern, weitere Quellen siehe Anhang)

Fruchtarten Hauptkultur	Anbaufläche im Jahr 2021	Dieselbedarf[3]							
		Gesamtbedarf		davon für leichte Arbeiten < 5 l/ha		mittelschwere Arbeiten 5-15 l/ha		schwere Arbeiten > 15 l/ha	
	ha	l/ha	Mio. l/a	Mio. l/a	%	Mio. l/a	%	Mio. l/a	%
Ackerkulturen									
Getreide[1] incl. Körnermais	1.098.048	78	86,2	13,4	16	31,7	37	41,1	47
Raps	94.184	74	7,0	1,2	18	2,3	32	3,5	50
Silomais, Feldgras/Ackergras	563.058	138	74,9	15,6	21	26,3	35	33,0	44
Ackerkulturen gesamt	1.755.290		168,1	30,3	18	60,3	36	77,6	46
Dauergrünland									
Wiesen und Weiden	1.105.302	108	119,5	66,2	55	53,3	45	0	0
Summen									
Pflanzliche Erzeugung	2.860.592		287,6	96,5	34	113,6	39	77,6	27
Landwirtschaftliche Nutzfläche gesamt	3.077.350								
Hauptkultur-Anteil an Gesamtanbaufläche	93 %								
Tierhaltung (nur Rind)									
Futtervorlage			90,6						
Entmistung			11,8						
Einstreuen			8,9						
Summe Tierhaltung[2]			111,3						
Anteil Tierhaltung am Gesamtbedarf	28 %								
Gesamtbedarf Kraftstoff			**398,9**						

[1] Winterweizen stellvertretend für alle Getreidearten

[2] Der Dieselbedarf in den sonstigen Produktionsrichtungen der Tierhaltung ist gering und bleibt in dieser Berechnung unberücksichtigt.

[3] Abweichungen der Summenwerte durch Rundung sind möglich.

Auf Basis des Energiebedarfs für leichte, mittelschwere und schwere landwirtschaftliche Arbeiten sowie der Tierhaltung in Bayern sowie unter Einbeziehung weiterer Überlegungen (z. B. Technologiereifegrad der Antriebsoptionen) werden nachfolgend Szenarien aufgestellt, wie sich der Antriebsmix in der bayerischen Landwirtschaft entwickeln könnte.

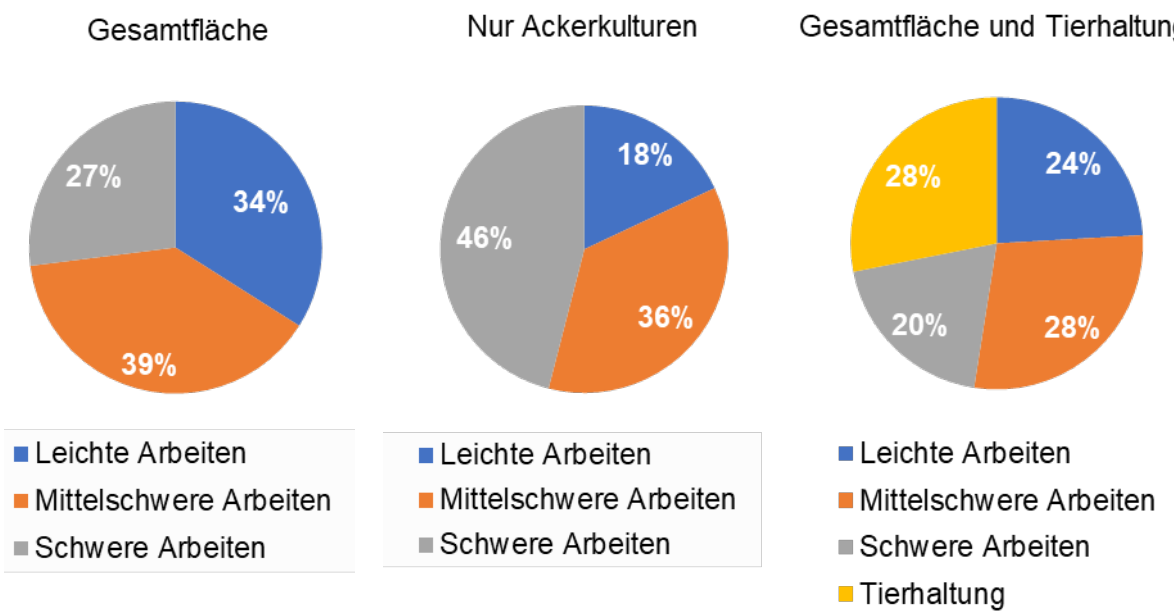


Abbildung 5: Verteilung des Dieseleinsatzes nach Arbeitsschwere bei der Bewirtschaftung von Acker- und Grünlandflächen (Gesamtfläche) sowie mit Tierhaltung in Bayern (Dieselbedarf je Hektar: Leichte Arbeiten < 5 l/ha, mittelschwere Arbeiten 5-15 l/ha, schwere Arbeiten > 15 l/ha)

3.2 Der Mix erneuerbarer Antriebsenergien für land- und forstwirtschaftliche Arbeitsmaschinen bis 2040

In Abhängigkeit der getroffenen Annahmen zu den eingesetzten Energieträgern kann sich der Energiebedarf für die mobilen Maschinen in der Landwirtschaft unterschiedlich entwickeln. Im Blick ist das Ziel Bayerns, spätestens zum Jahr 2040 klimaneutral zu sein (BayKlimaG).

Nachfolgend werden Szenarien betrachtet, in denen Art und Menge der benötigten Energieträger für die Jahre 2030 sowie 2040 abgeschätzt werden. Diese Szenarien entsprechen denen, die in der KTBL-Sonderpublikation [7] detailliert beschrieben sind. Lediglich der aktuelle und die prognostizierten Energiebedarfe werden auf die bayerischen Verhältnisse skaliert (vgl. Kapitel 3.1) und der Energiemix für 2045 wird auf das Jahr 2040 abgebildet. Im Szenarium 2040 A wird dabei von einer wenig ambitionierten Elektrifizierung ausgegangen, bei Szenarium 2040 B handelt es sich um eine Annahme mit ambitionierter Elektrifizierung. Dabei ergeben sich die in Abbildung 6 dargestellten Bedarfe an erneuerbarem Strom und erneuerbaren Kraftstoffen für mobile Maschinen in der Landwirtschaft in Bayern. Sie stellen lediglich eine Abschätzung dar und können je nach Szenarium-Annahmen variieren.

Der in den Berechnungen ausgewiesene zukünftige Bedarf an erneuerbarer Energie in Form von Strom und Kraftstoffen hängt insbesondere von den Annahmen zur Elektrifizierung ab. Ein hoher Elektrifizierungsgrad senkt den Energiebedarf durch den besseren Wirkungsgrad der elektrischen Antriebe im Vergleich zu verbrennungsmotorischen

Konzepten. Bei den in Abbildung 6 und Tabelle 3 dargestellten Szenarien 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 durch eine effizientere Kraftstoffnutzung oder höhere Kraftstoffbedarfe, z. B. infolge der Ausweitung der ökologischen Landwirtschaft, nicht berücksichtigt.

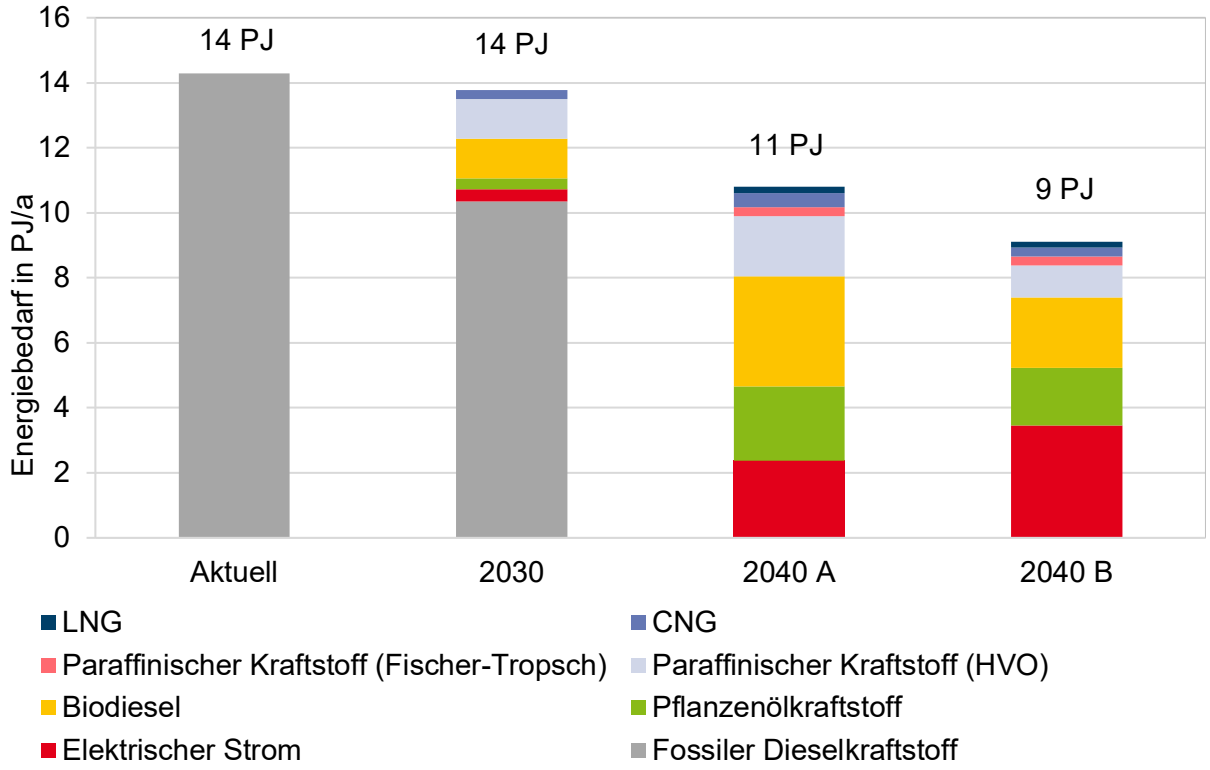


Abbildung 6: Bedarf an Energie in Form von Strom und Kraftstoffen für mobile Maschinen in der Landwirtschaft in Bayern für die Szenarien „Aktuell“, „2030“, „2040 A“ und 2040 B“

Für das Szenarium 2030 wird davon ausgegangen, dass nur die schon heute verfügbaren 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 sein wird 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 2040 werden zwei verschiedene Optionen dargestellt. Beide kommen ohne den Einsatz von fossilen Kraftstoffen aus. Der genutzte Strom stammt vollständig aus erneuerbaren Energien. In Szenarium 2040 A (wenig 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 Szenarium 2040 B (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 vorhanden älteren Bestandsmaschinen.

Tabelle 3: Bedarf an Energieträgern in den Szenarien „Aktuell“, „2030“, „2040 A“ und 2040 B“

Eingesetzte Energieträger	Szenarium			
	Aktuell	2030	2040 A	2040 B
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. Liter/a			
Fossiler Dieselkraftstoff	399	289	0	0
Pflanzenölkraftstoff	0	10	66	52
Biodiesel	0	38	104	66
Paraffinischer Kraftstoff (HVO)	0	36	54	29
Paraffinischer Kraftstoff (Fischer-Tropsch, FT)	0	0	8	8
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. kg/a			
CNG	0	5	9	5
LNG	0	0	4	4
	Energiebedarf im Tank/Speicher in Mio. kWh/a			
Elektrischer Strom	0	104	661	958

Der Gesamtenergiebedarf für die mobilen Maschinen verringert sich in den Szenarien von rund 14 PJ (aktuell) um 21 % auf 11 PJ (Szenarium 2040 A) bzw. um 36 % auf 9 PJ (Szenarium 2040 B).

3.3 Rohstoffbedarf und Flächennutzung

Zur Bewertung der erstellten Szenarien aus Kapitel 3.2 und zur Ableitung geeigneter Strategien sind die erforderlichen Kapazitäten zur Bereitstellung der Rohstoffe und der Energiebedarf von Bedeutung. Grundsätzlich müssen für die Substitution des Dieselkraftstoffs Rohstoffe (z. B. Altfette als Sekundärrohstoff aber auch pflanzliche Öle als Primärrohstoff) und elektrischer Strom (elektrische Antriebe) bereitgestellt werden. Für die Szenarien

wurden die in der Tabelle im Anhang aufgeführten Daten verwendet und folgende Grundsätze angewandt:

- Die Bereitstellung des Stroms für elektrische Antriebe erfolgt über Freiflächen-PV-Anlagen und durchschnittlicher Leistung für Bayern, um einen Effekt der Strombereitstellung auf die erforderliche Flächennutzung abzubilden. Daher wurden die Strompotenziale der über 670.000 sonstigen PV-Analgen Bayerns (z. B. Dach-PV) nicht berücksichtigt. Betrachtet man die Stromleistung der Bestandanlagen (Stromproduktion ca. 13,8 Mio. MWh in 2021; [2]), so wäre eine Strombedarfsdeckung durch den Anlagenbestand ohne Probleme möglich. Eine Differenzierung unterschiedlicher Anlagentypen (z. B. Agri-PV-Anlagen) oder Regionen wurden nicht durchgeführt.
- Die pflanzenölbasierten Kraftstoffe werden über Ölsaaten (hier Raps) mit durchschnittlichen Ernteerträgen und entsprechenden Öl- und Futtermittelerträgen berechnet. Alternative Ölsaaten wurden nicht betrachtet.
- Für die Bereitstellung von Biodiesel werden zunächst theoretisch verfügbare Sekundärrohstoffe in Form von anfallenden Altfetten verwendet. Die erforderlichen Restmengen, die zur Substitution des Dieselkraftstoffs erforderlich wären, werden durch die Produktion von Pflanzenölen bereitgestellt. Obwohl die Altfettmengen sich auch für die Produktion von HVO nutzen lassen würden, wurden diese hier nur für die Biodieselproduktion unterstellt. Derzeit ist in Bayern keine Anlage zur Produktion des Paraffinischen Kraftstoffs HVO vorhanden.
- Die Produktion des Paraffinischen Kraftstoffs HVO (Pflanzenölbasis) erfolgt ebenfalls auf Basis des Rohstoffs Pflanzenöl. Die für die Produktion des Paraffinischen Kraftstoffs (FT-Diesel) erforderliche Energie (elektrischer Strom) wird ebenfalls durch Freiflächen-PV-Anlagen erzeugt. In der Übersicht wird dieser ergänzend aufgeführt und zum Flächen- und Anlagenbedarf addiert.
- Die Bereitstellung des Biomethans (Produktion CNG und LNG) erfolgt aus dem Anlagenbestand der bayerischen Biogasanlagen und der produzierten Biogasmengen. Es wird davon ausgegangen, dass keine neuen Biogasanlagen gebaut, sondern CNG- und LNG-Anlagen inklusive der erforderlichen Aufbereitung zu Biomethan errichtet werden müssen. Der Flächenbezug für die Bereitstellung der Ressourcen, basiert auf einem Bilanzansatz, der auf den durchschnittlichen Biogaserträgen der verwendeten Gärsubstrate und deren Anteile basiert.

Eine detaillierte Übersicht aller Ergebnisse gibt Tabelle 4, weshalb im Folgenden nur die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt werden. Aufgrund der durchgeführten Berechnungen kann derzeit davon ausgegangen werden, dass bei entsprechenden Anpassungsstrategien eine vollständige Substitution der erforderlichen Diesel- bzw. Energiemengen durch alternative Kraftstoffe bzw. Antriebsenergien erfolgen kann. Zu betonen ist, dass dies nicht mit einer wesentlichen Veränderung der Flächennutzungen einhergehen muss, sondern zum Teil nur eine angepasste Verwertung der Rohstoffe und Pflanzenaufwüchse im Antriebs- bzw. Kraftstoffsektor Bayerns erfolgen müsste.

Durch die beiden Szenarien für 2040 würden insgesamt zwischen 90.000 und 143.000 ha Fläche zur Substitution des Dieselkraftstoffs in Anspruch genommen werden, siehe Tabelle 4. Nach Daten des Agrarberichts (vgl. Kap. 1.4.1) [1] werden im Jahr 2020 ca. 414.000 ha für die Energiebereitstellung genutzt (davon ca. 63.000 ha für Biodiesel und Rapsölkraftstoff, ca. 10.000 ha für Bioethanol und 335.200 ha für die Biogaserzeugung, vgl. Kapitel 2). Eine Anrechnung für Kraftstoff in der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung kann hiervon nur für die Anbauflächen der pflanzenölbasierten Kraftstoffe (63.000 ha) erfolgen. Anhand der in Abbildung 1 zu Grunde liegenden Daten für Verbrauchsmengen steuerbegünstigter Kraftstoffe in der Landwirtschaft lässt sich folgern, dass hiervon in Bayern nur ein Flächenäquivalent von etwa 330 ha verwertet werden. Die Biokraftstoffe, die aus in Bayern erzeugten Ölsaaten produziert werden, werden entweder in der Beimischung zu fossilem Dieselkraftstoff B7 überwiegend im Sektor Verkehr (Lkw, Pkw etc.) verwendet oder außerhalb Bayerns genutzt. Bezogen auf die erforderlichen Anbauflächen für die Ölsaaten, die der Rohstoff für die pflanzenölbasierten Kraftstoffe für die Land- und Forstwirtschaft sind, ist festzustellen, dass die erforderlichen Anbauflächen für Raps in den Szenarien mit 43.000 bis 137.000 ha im Rahmen bisheriger Flächennutzung für Bayern liegen. In der Spitze der vergangen 20 Jahre wurden im Jahr 2007 in Bayern beispielsweise auf 172.800 ha Raps angebaut [4]. Die für Bayern benötigte Biodieselmenge von rund 86 Mio. l/a (vgl. Tabelle 4 könnte in den beiden existenten Biodieselanlagen (Produktionskapazität 159 Mio. l/a, vgl. Kapitel 2) bereitgestellt werden.

Die produzierten Biogasmengen und assoziierten Flächen sowie die Flächen für die Bioethanolproduktion werden nach aktuellem Kenntnisstand nicht im Kraftstoffsektor Land- und Forstwirtschaft eingesetzt. Dies zeigt bereits, dass durch eine entsprechende Steuerung der Ressourcenflüsse ein großes Substitutionspotenzial besteht. Eine Verwertung von etwa 10 % der produzierten Biogasmengen würden ausreichen, um die erforderlichen CNG und LNG Mengen bereitzustellen.

Für den Substitutionsanteil der elektrischen Antriebe ist zusätzlich zu den Flächen für die Anbaubiomasse Strom erforderlich. Die berechneten Strommengen werden in den Szenarien durch Freiflächen-PV-Anlagen erzeugt, die zwischen 90 und 880 ha belegen würden. Aufgrund der im Energieatlas Bayern [2] verzeichneten Anlagen und erzeugten Strommengen ist davon auszugehen, dass der Anlagenbestand bereits in etwa 3.800 ha einnimmt. Die erforderlichen Anlagen könnten gemäß der Ausbauziele ergänzt werden oder der bisher produzierte Strom entsprechend als Antriebsenergie genutzt werden. Sollte eine Anlagenergänzung realisiert werden müssen, würde dies zwischen 20 und 190 Anlagen bei mittlerer Anlagengröße (ca. 4,5 ha) erfordern.

In den Szenarien wurde ergänzend der Strombedarf für die Bereitstellung von strombasierten paraffinischen Kraftstoffen nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren (E-Fuels) betrachtet. Bezogen auf den Strom-, Flächen- und Anlagenbedarf würden diese Kraftstoffalternativen eine signifikante Steigerung der Bedarfe erfordern: ca. zusätzlich 540 ha Freiflächen-PV-Anlage bzw. zusätzlich 120 Anlagen. Des verdeutlicht, dass batterieelektrische Systeme der Herstellung und Nutzung von E-Fuels aus Gründen der Energieeffizienz vorzuziehen sind.

Tabelle 4: Rohstoff- und Flächenbedarf für die Szenarien

Eingesetzte Energieträger	Einheit	Szenarium		
Parameter		2030	2040 A	2040 B
Fossiler Dieselkraftstoff				
Menge	Mio. l/a	289	0	0
Pflanzenölkraftstoff				
Menge	Mio. l/a	10	66	52
Flächenbedarf für Rapssaat	ha	6.593	43.801	34.399
Anzahl dez. Ölmühlen (á 10 t_{Saat}/d)	--	4	25	20
Biodiesel				
Menge insgesamt	Mio. l/a	37,6	104,0	66,2
Menge aus Altfett	Mio. l/a	18,2	18,4	18,4
Menge aus Rapssaat	Mio. l/a	19,3	85,6	47,8
Flächenbedarf Rapssaat	ha	12.898	57.042	31.852
Anz. Biodieselanlagen (á 60 Mio. l/a)	--	1	2	2
Paraffinischer Kraftstoff (HVO)				
Menge	Mio. l/a	35,6	54,0	28,8
Flächenbedarf Rapssaat	ha	23.738	36.001	19.221
Paraffinischer Kraftstoff (Fischer-Tropsch)				
Kraftstoff-Bedarf	Mio. l/a	0	7,8	7,8
Strombedarf (Wirkungsgrad 13 %)	Mio. kWh/a	0	593	593
Flächenbedarf Freiflächen-PV	ha	0	539	539
Anzahl Freiflächen-PV (je 4,5 ha)	--	0	120	120
CNG				
CNG-Bedarf	Mio. kg/a	5,4	8,7	5,4
Biogasbedarf	Mio. Nm³	21,3	34,2	21,3
Flächenbedarf Biogassubstrat	ha	2.243	3.589	2.243
Anzahl CNG-Anlagen (á 221 t_{CNG}/a)	--	25	40	25
LNG				
LNG-Bedarf	Mio. kg/a	0	3,7	3,7
Biogasbedarf	Mio. Nm³	0	10,0	10,0
Flächenbedarf Biogassubstrat	ha	0	1.046	1.046
Anzahl LNG-Anlagen (á 2.718 t_{LNG}/a)	--	0	2	2
Elektrischer Strom				
Strombedarf	Mio. kWh/a	104	661	958
Flächenbedarf Freiflächen-PV	ha	94	601	871
Anzahl Freiflächen-PV (je 4,5 ha)	--	21	133	193
Flächenbedarf				
Flächenbedarf für P100, B100, HVO	ha	43.229	136.844	85.472
Flächenbedarf für CNG, LNG	ha	2.243	4.635	3.289
Flächenbedarf für BEV, FT-XTL	ha	94	1.140	1.410
Gesamtflächenbedarf	**ha**	**45.566**	**142.619**	**90.171**
Anteil an der Ackerfläche Bayerns	**%**	**2,3**	**7,0**	**4,5**

Für die Bereitstellung der Antriebsenergien müsste neben den Flächen und PV-Anlagen weitere Strukturen bzw. Anlagen etabliert werden. Für die Verarbeitung der Ölsaaten in dezentralen Anlagen wären etwa 4 bis 25 dezentrale Ölmühlen mit einer mittleren Verarbeitungskapazität von 10 t Rapssaat pro Tag erforderlich. Die Aufbereitung des Biogases bzw. Biomethan zu CNG und LNG würde ca. 25 bis 40 CNG-Anlagen und in etwa 2 LNG-Anlagen benötigen.

3.4 Infrastruktur für Strom- und Kraftstoffbereitstellung

Betriebsspezifisch können die Energieverbräuche für die eingesetzten Maschinen über das Jahr in Annäherung gleich verteilt (Veredelungsbetriebe) oder auch saisonal sehr unterschiedlich (Marktfrucht- und Futterbaubetriebe) anfallen. Dies hat Auswirkung auf eine erforderliche Bevorratung von Antriebsenergien oder den Anschluss an ein leistungsfähiges Stromnetz oder ein Erdgasnetz.

Sollen vermehrt batterieelektrisch betriebene Maschinen auf landwirtschaftlichen Betrieben zum Einsatz kommen, ist von den Netzbetreibern eine ausreichende Anschlussleistung für die erforderlichen Ladevorgänge zur Verfügung zu stellen. Ist es das Ziel, einen hohen Anteil Eigenstrom zu nutzen, sind gegebenenfalls entsprechende Batteriespeicher vorzuhalten. Maschinen mit einem Wechselbatteriesystem könnten längere kontinuierliche Einsatzzeiten ohne Ladeunterbrechungen ermöglichen.

Flüssige Kraftstoffe können aufgrund ihrer in der Regel hohen Energiedichte einfach in Kraftstofftanks gelagert und auch für saisonale Arbeitsspitzen gut bevorratet werden.

Biogas fällt in Biogasanalgen kontinuierlich an. Biogas muss, um es als Kraftstoff nutzen zu können, zu Methan aufbereitet werden. Dabei werden z. B. CO_2 und Schwefel entfernt und das Gas getrocknet. Um das Gas in entsprechender Menge auf Maschinen mitführen zu können, wird es komprimiert auf 200 bar (CNG) oder verflüssigt (LNG). CNG- oder LNG-Tankstellen sind um ein Vielfaches teurer als Tankanalgen für Flüssigkraftstoffe. Eine Methanaufbereitung ist für Biogasanlagen eine zusätzliche Investition, die sich erst ab einer bestimmten Anlagengröße rechnet. Ein Zusammenschluss mehrerer Biogasanlagen, zum Zweck einer gemeinsamen Biomethanaufbereitung, kann ein Lösungsansatz sein. Die Speicherung bzw. Bevorratung gasförmiger Kraftstoffe mit geringer Energiedichte, zum Beispiel zur Bewältigung saisonaler Arbeitsspitzen, ist aufwendig und teuer. In der Regel sind daher Biomethananlagen und CNG-Tankstellen an das Erdgasnetz angeschlossen, um überschüssiges Biomethan einspeisen zu können oder die Hochdruckspeichertanks der Tankstelle ggf. rasch wieder befüllen zu können. Über das Förderprogramm "BioMeth Bayern" [25] können Neuinvestition in umweltfreundliche Biogasaufbereitungsanlagen sowie Neuinvestition in Biogas- und Biomethanleitungen gefördert werden. Die Nutzung von CNG oder LNG in landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen setzt immer die räumliche Nähe einer CNG- oder LNG-Tankstelle voraus. Die Anzahl öffentlicher CNG-Tankstellen nimmt seit Jahren ab und beträgt im Juni 2024 etwas über 700 [13]. Die Anzahl öffentlicher LNG-Tankstellen wird zum Januar 2024 mit 158 [28] angegeben.

Die Flüssigkraftstoffe Biodiesel sowie Rapsöl- und Pflanzenölkraftstoff werden derzeit auf Grund der geringen Nachfrage an öffentlichen Tankstellen nicht angeboten. Paraffinischer Dieselkraftstoff, wie z. B. HVO, darf erst seit kurzem an öffentlichen Tankstellen verkauft werden. Wie viele Tankstellen künftig diesen Reinkraftstoff anbieten werden, ist derzeit noch nicht absehbar. Für alle flüssigen Kraftstoffe gilt, dass diese mit geringem Aufwand an Hoftankstellen auf landwirtschaftlichen Betrieben oder, falls erforderlich, am Feld vertankt werden können. Da in den vergangenen Jahren von Seiten Landwirtschaft und Forsten kaum Nachfrage nach den Reinkraftsoffen HVO, Biodiesel und Rapsöl- bzw. Pflanzenölkraftstoff bestand, müssen eine entsprechende Logistik für den Handel bzw. dezentrale Produktions- und Verteilstrukturen wieder aufgebaut werden.

3.5 Beitrag zum Klimaschutz

Die Substitution von fossilem Dieselkraft durch den oben aufgeführten Mix an erneuerbaren Antriebsenergien ist eine wichtige Stellschraube für mehr Klimaschutz in der Landwirtschaft. Der Beitrag zum Klimaschutz lässt sich auf unterschiedliche Arten quantifizieren, die nachfolgend differenziert betrachtet werden.

Klimaschutzbeitrag im Kontext des Klimaschutzgesetzes (Tank-to-Wheel-Ansatz)

Eine Möglichkeit ist, den Klimaschutzbeitrag auf die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes und damit auf das nationale Treibhausgasinventar zu beziehen. Hier werden die Treibhausgase (THG) sektorspezifisch in Abhängigkeit ihres Entstehungsortes erfasst. Für den Einsatz von Kraftstoffen und anderen Energieträgern in mobilen landwirtschaftlichen Maschinen bedeutet dies, dass nur die Emissionen betrachtet werden, die direkt bei der Verbrennung der Kraftstoffe im Motor entstehen (Tank-to-Wheel-Ansatz). Die Emissionen, die bei der Bereitstellung des jeweiligen fossilen wie erneuerbaren Energieträgers entstehen, bleiben bei dieser Betrachtungsweise unberücksichtigt. Die THG-Emissionen für fossilen Kraftstoff liegen bei 74,1 g/MJ, wohingegen die Verbrennung der Kraftstoffe erneuerbaren Ursprungs mit Null Emissionen bewertet werden, da ihnen ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf zugrunde liegt. Damit trägt bei dieser Betrachtungsweise die Einsparung jedes Liters fossilen Diesels zur Minderung von Treibhausgasen und damit zum Klimaschutz bei. Im Szenarium 2030 liegt die THG-Minderung bei 23 %, die auf die Verringerung des Energieeinsatzes um 4 % und die Substitution von fossilem Diesel um ca. 24 % zurückzuführen ist. Bei den Szenarien 2040 A und 2040 B kommt kein fossiler Dieselkraftstoff mehr zum Einsatz, weshalb die mit dessen Verbrennung in Zusammenhang stehenden THG-Emissionen ebenfalls um 100 % reduziert werden (siehe Abbildung 7).

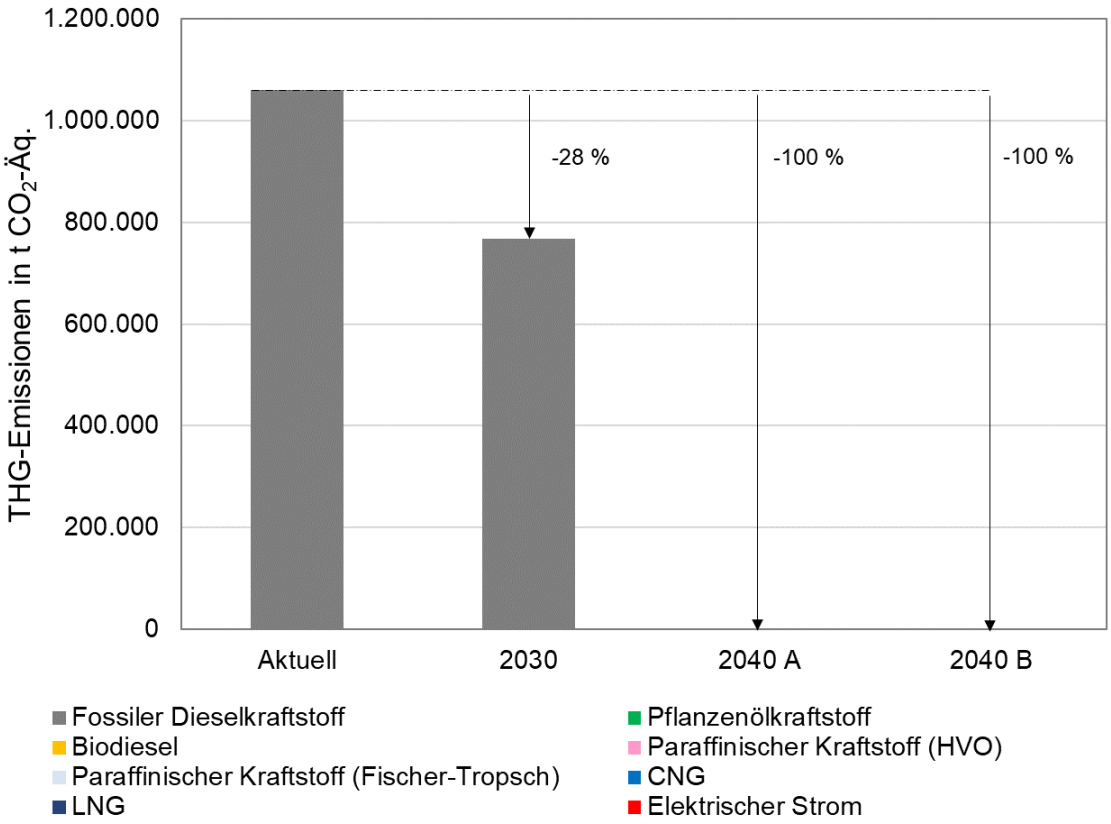


Abbildung 7: THG-Emissionen der Antriebsenergien für die Szenarien „Aktuell“, „2030“, „2040 A“ und 2040 B“ im Kontext des Klimaschutzgesetzes (Tank-to-Wheel-Ansatz)

Problematisch an dieser Betrachtungsweise ist allerdings, dass keine Informationen aus der Bereitstellung der fossilen, wie erneuerbaren Energieträger berücksichtigt werden. Bei einer reinen Betrachtung der THG-Inventare können Verschiebungseffekte z. B. in andere Sektoren oder andere Länder nicht aufgezeigt werden. Für eine umfassende Bewertung des Klimaschutzbeitrags erneuerbarer Energieträger in mobilen landwirtschaftlichen Maschinen ist daher eine zusätzliche Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erforderlich.

Klimaschutzbeitrag in Bezug auf den Lebenszyklus (Well-to-Wheel-Ansatz)

Bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus, werden alle THG-Emissionen von der Rohstoffentnahme aus der Umwelt bis zur Verbrennung der Energieträger in der landwirtschaftlichen Maschine betrachtet. Auf diese Weise werden sowohl die THG-Emissionen die mit der Bereitstellung der Biomasse für Pflanzenölkraftstoffe, Biodiesel, HVO, CNG und LNG verbunden sind als auch die Stromerzeugung berücksichtigt. Kann die erforderliche Strommenge zu 100 % aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt werden, können THG-Minderungspotenziale von 24 % im Szenarium 2030 und 88 % bzw. 92 % in den Szenarien 2040 A bzw. 2040 B erzielt werden (siehe Abbildung 8). Die Hauptemissionsquelle im Mix der erneuerbaren Energieträger ist in dieser Variante im Wesentlichen auf die Bereitstellung der Biomasse für Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, HVO, CNG und LNG zurückzuführen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Energieträger nicht nur aus

Anbaubiomasse, sondern auch aus Rest- und Abfallstoffen (z. B. Altspeisefetten) gewonnen werden. In Summe werden im Szenarium 2040 A 75 % der erforderlichen Energiemenge aus diesen Energieträgern bereitgestellt. Die Menge der THG-Emissionen ist jedoch mit knapp 200.000 kg CO_2-Äq. (Szenarium 2040 A) im Vergleich zum Ist-Zustand (Aktuell) mit 1,3 Mio. Tonnen CO_2-Äq. deutlich geringer, sodass hier ein Beitrag zum Klimaschutz von 88 % erreicht werden kann.

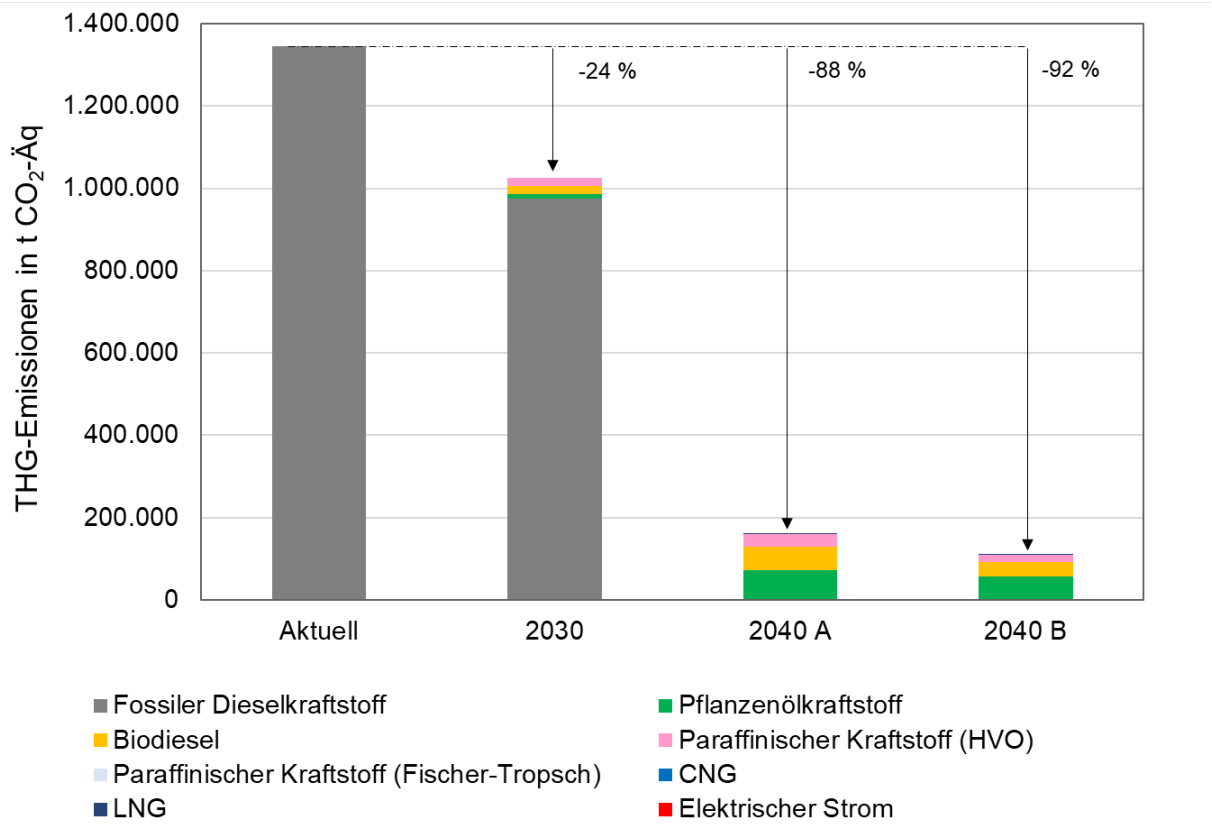


Abbildung 8: THG-Emissionen der Antriebsenergien (100 % erneuerbarer Strom) für die Szenarien „Aktuell“, „2030“, „2040 A“ und 2040 B“ in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus (Well-to-Wheel- Ansatz)

Die Höhe des Klimaschutzbeitrags sollte immer über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden, da nur auf diese Weise Verschiebungseffekte deutlich werden. Soll Strom direkt oder über E-Fuels als Antriebsenergie genutzt werden, ist ein deutlicher Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen erforderlich. Werden die Ausbauziele für erneuerbaren Strom nicht erreicht, kann über die Elektrifizierung und die Verwendung von E-Fuels nur eine geringe THG-Reduzierung erreicht werden. Die Biomasse-basierten Kraftstoffe führen bereits heute zu deutlich geringeren THG-Emissionen im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff und sind damit heute schon eine gute Alternative für mehr Klimaschutz in der Landwirtschaft.

3.6 Ökonomische Auswirkungen

Die Nutzung erneuerbarer Antriebsenergien steht im wirtschaftlichen Wettbewerb mit dem Einsatz von Dieselkraftstoff im konventionellen Verbrennungsmotor, der auf Dieselkraftsoff optimiert ist. Bei ökonomischen Betrachtungen sind die Preise für den Kraftstoff bzw. die Stromkosten einzubeziehen, die Investitionskosten in die Neumaschinen oder, falls erforderlich, für eine Umrüstung von Maschinen im Bestand, Fördermaßnahmen, Kraftstoff- bzw. Stromverbrauch, Kosten für Wartung der Maschine (Motorenölwechselintervalle, Gasflaschenprüfung) und Kosten für ggf. zusätzlich erforderlich Betankung- oder Ladeinfrastruktur. In der Übergangsphase sind ggf. auch zusätzliche Arbeitskosten für die Beschaffung von Kraftstoff, Betankungs- und Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen. Außerdem kann auch der Wiederverkaufswert der Maschine Einfluss nehmen.

Der Preise von Dieselkraftstoff ist im Wesentlichen abhängig vom Mineralölpreis, von der Einkaufsmenge, von der Höhe der Energiesteuer und ggf. einer Steuerentlastung, die auf den Kraftstoff für den Einsatz in Land- und Forstwirtschaft gewährt werden, sowie von Abgaben, z. B. der CO_2-Abgabe, aufgrund des BEHG.

Die Kosten für elektrischen Strom sind im Wesentlichen abhängig davon, ob der Strom selbst erzeugt wird oder von einem Stromversorger zugekauft werden muss, ob Wechselstrom geladen wird oder eine Schnellladung mit Gleichstrom erfolgt.

Die Preise für erneuerbare Kraftstoffe sind überwiegend abhängig von den Rohstoffkosten (Anbaubiomasse, Rest- und Abfallstoffe, grüner Wasserstoff, erneuerbarer Strom), von Erlösen für die Koppelprodukte, die bei der Kraftstofferzeugung entstehen, ob der Kraftstoff selbst erzeugt wird (Pflanzenölraftstoff, Biomethan) oder zugekauft werden muss, von der Höhe der Energiesteuer und ggf. einer Steuerentlastung, die auf den Kraftstoff für den Einsatz in Land- und Forstwirtschaft gewährt werden, von Abgaben, z. B. der CO_2-Abgabe, aufgrund des BEHG, welcher Erlös ggf. aus der Anrechnung auf die THG-Minderungsquote im Verkehrssektor erzielt wird.

Die Vielfalt der Einflussfaktoren macht deutlich, das pauschale Angaben zur Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Antriebssysteme nicht getroffen werden können. Abbildung 9 zeigt rückblickend die Verbraucherpreise inklusive Mehrwertsteuer und Energiesteuer bei Inanspruchnahme möglicher Steuerentlastungen für die Verwendung in Land- und Forstwirtschaft von 2007 bis 2024 für Agrardiesel, Agrar-Biodiesel und Agrar-Rapsölkraftstoff. Es wird deutlich, wie unter anderem die Mengendeckelung auf die Energiesteuerrückvergütung auf Dieselkraftstoff zwischen 2005 und 2007, die Weltwirtschaftskrise 2008, Nachfrageeffekte aufgrund der THG-Quotenreglung ab Mitte 2021, der Wegfall der Energiesteuerrückvergütung auf Biodiesel und Pflanzenölraftstoff ab dem 01.01.2022 und hohe Rohstoffpreise aufgrund des Angriffskriegs auf die Ukraine Einfluss auf das Preisgefüge nehmen.

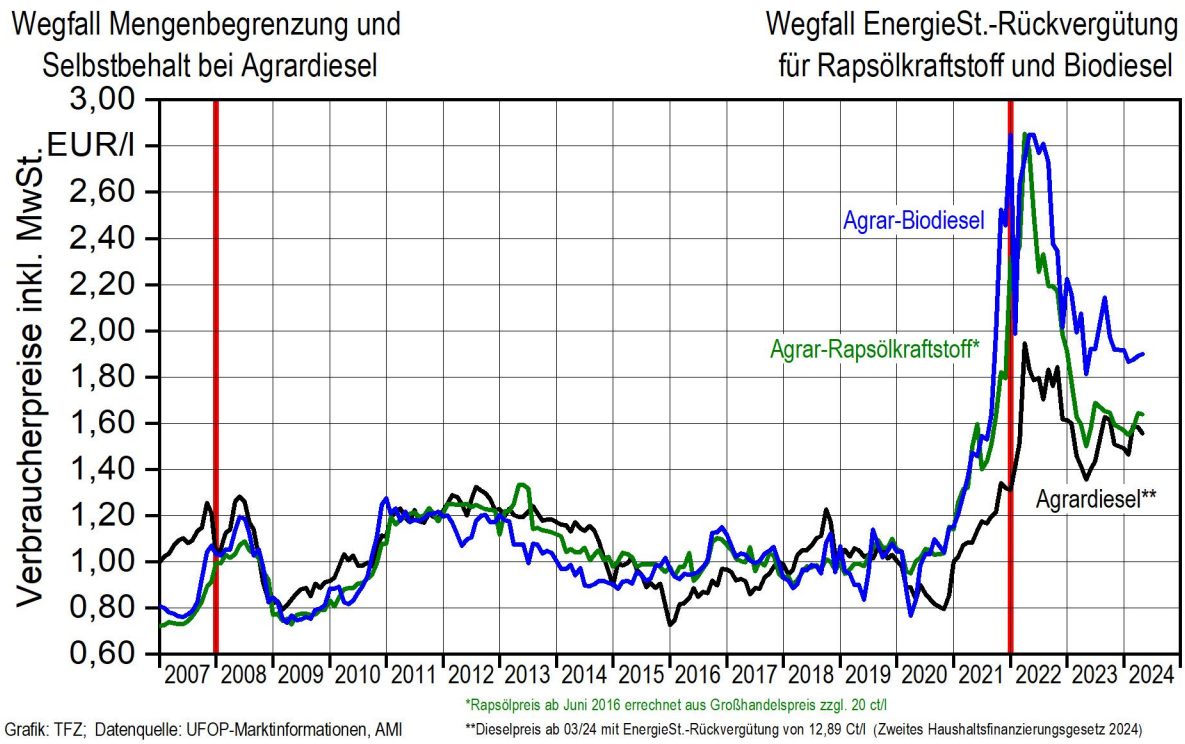


Abbildung 9: Verbraucherpreise inklusive Mehrwertsteuer und Energiesteuer bei Inanspruchnahme möglicher Steuerentlastungen für die Verwendung in Land- und Forstwirtschaft von 2007 bis 2024 für Agrardiesel, Agrar-Biodiesel und Agrar-Rapsölkraftstoff (eigene Grafik unter Verwendung von Daten der UFOP-Marktinformationen und der AMI)

Die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit erneuerbarer Kraftstoffe gegenüber Dieselkraftstoff ist stark schwankend. Gegeben war diese für Betriebe mit hohem Kraftstoffverbrauch in den Jahren 2005 bis 2007 durch die Mengendeckelung der Mineralölsteuerrückerstattung auf Dieselkraftstoff und die hohen Rohölpreise. Das Interesse der Landwirtschaft, auf erneuerbare Kraftstoffe umzusteigen, war in diesem Zeitraum groß.

Ausgehend von angenommenen fixen Bezugspreisen für die Kraftstoffe Diesel, Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, HVO und Biomethan ohne Steuern zeigt Tabelle 5 wie sich ab 2023 bis 2026 die Energiesteuer und die Energiesteuerentlastung auf Dieselkraftsoff sowie die CO_2-Abgabe auf Dieselkraftstoff aufgrund des BEHG sich auf die resultierenden Preise der verschiedenen Kraftstoffe zum einen bezogen auf das Volumen (Liter), zum anderen bezogen auf den Energiegehalt (kWh) auswirken.

Tabelle 5: Bezugspreise ohne Mehrwertsteuer für die Kraftstoffe Diesel, Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel, HVO und Biomethan bezogen auf das Volumen (Liter) und den Energiegehalt (kWh) mit Energiesteuer und Energiesteuerentlastung sowie der CO_2-Abgabe aufgrund des BEHG

Kraftstoff	Aktueller Bezugspreis ohne Steuern	Resultierender Preis aus aktuellem Bezugspreis inklusive Energiesteuer und CO_2-Bespreisung, ohne MwSt.							
		Preis je Mengeneinheit				Preis je Energieeinheit			
		2023	2024	2025	2026	2023	2024	2025	2026
	ct/l	ct/l				ct/kWh			
Dieselkraftstoff[1),3)]	120,0	153,5	166,1	175,2	181,6 – 184,2	15,8	17,1	18,0	18,7– 19,0
Pflanzenölkraftstoff	120,0	167,0				17,2			
Biodiesel	130,0	177,0				19,3			
HVO	150,0	197,0				20,9			
Bio-Methan[2)]	9,0 ct/kWh					10,4	10,8	11,3	11,7

[1)] Voller Energiesteuersatz: 47,04 ct/l; Rückvergütung für Dieselkraftstoff (Land- und Forstwirtschaft)*: 2023: 21,48 ct/l, 2024: 12,89 ct/l, 2025: 6,44 ct/l; keine Rückvergütung ab 2026.

[2)] Energiesteuersatz: 2023: 1,390 ct/kWh, 2024: 1,838 ct/kWh, 2025: 2,285 ct/kWh, 2026: 2,733 ct/kWh

[3)] CO_2-Preis laut BEHG: 2023: 30€/t (7,95 ct/l), 2024: 45 €/t (11,93 ct/l), 2025: 55 €/t (14,58 ct/l), 2026: 55-65 €/t (14,58-17,20 ct/l)

Es wird deutlich, dass Biomethan der mit Abstand günstigste Kraftstoff ist. Mit der beschlossenen Abschmelzung der Energiesteuerentlastung auf Dieselkraftstoff und mit der steigenden CO_2-Abgabe auf fossile Kraftstoffe erlangt Pflanzenölkraftstoff in diesem Szenarium ab 2025 geringfügige Wettbewerbsvorteile. Hingegen sind die Preise für Biodiesel und auch HVO 2026 immer noch höher als die von Dieselkraftstoff.

Zudem werden von den Herstellern für Maschinen mit Typgenehmigung für erneuerbare Antriebsenergien bzw. Umrüstungen von Bestandmaschinen in der Regel höhere Preise im Vergleich zu der mit Dieselkraftstoff angetriebenen Maschine aufgerufen. Eine nicht repräsentative Umfrage ergab folgende Preisinformationen: Für elektrische Hoflader ist mit einem Preisaufschlag von ca. 50 % auf den Preis der Dieselmaschine zu rechnen, für elektrische Teleskoplader ein Plus von ca. 30 % und auf batterieelektrische Kleintraktoren ein Aufschlag von rund 60 %. Für Traktoren, die mit Pflanzenölkraftstoff betrieben werden können bzw. für Umrüstungen fallen Mehrkosten in Höhe von ca. 10.000 Euro an. Aus dem Lkw-Bereich sind Kosten für eine Biodieselausrüstung von bis zu ca. 2000 Euro bekannt. Ein für Methan (CNG) zertifizierter Traktor ist um etwa 20.000 Euro teurer als das Diesel-Pendant. Für Maschinen mit einer Zertifizierung für HVO werden in der Regel keine höheren Kosten aufgerufen.

Über das Bundesprogramm zur Steigerung der Energieeffizienz und CO_2-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau wird eine Investitionsförderung für Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen zur Nach- und Erstausrüstung gewährt. Gefördert werden elektrisch betriebene Landmaschinen (Traktoren, Futtermischwagen, Hoflader etc.), biokraftstoffbetriebene Landmaschinen (Traktoren, Futtermischwagen, Hoflader etc.) und autonom arbeitende Roboter in der Innenwirtschaft (z. B. Futter- oder Mistschieber). Stand 16.05.2024 besteht trotz verabschiedetem Bundeshaushalt 2024 ein Antragsstopp aufgrund begrenzter Mittelverfügbarkeit im Sondervermögen Klima- und Transformationsfonds.

3.7 Anreize für eine Umstellung auf erneuerbare Antriebsenergien

Die wichtigsten strategischen Weichenstellungen zur Förderung einer vermehrten Nutzung von erneuerbaren Antriebsenergien in land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen sind auf Bundesebene vorzunehmen. Dabei sind relevante europäische Richtlinien, z. B. Energiesteuerrichtlinien, Verordnungen und Leitlinien, z. B. Klima-, Umwelt- und Energiebeihilfeleitlinien (KUEBLL) zu berücksichtigen. Zur Vorbereitung der Entscheidungen auf Bundesebene hat das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft eine Arbeitsgruppe "Roadmap" initiiert, die den Auftrag hat, die in der KTBL-Sonderpublikation „Verwendung von erneuerbaren Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen“ [7] beschriebenen Maßnahmen zur Förderung einer vermehrten Nutzung von erneuerbaren Antriebsenergien, zu konkretisieren. Ziel ist es, bis spätestens Ende Sommer 2024 diese Ergebnisse dem BMEL vorzulegen.

Diskutiert werden unter anderem monetäre Anreize, wie zum Beispiel eine Energiesteuerentlastung auf erneuerbare Antriebsenergien, Investitionsförderungen für die Neubeschaffung klimafreundlicher Maschinen und die Umrüstung von Bestandsmaschinen auf erneuerbare Kraftstoffe, Investitionsförderungen für Betankungs- und Ladeinfrastruktur auf den Höfen oder die THG-Quoten-Anrechnungen im Verkehrssektor. Zudem mögliche politische Rahmensetzungen wie eine THG-Unterquote für den Sektor Landwirtschaft, die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) und der nationalen GAP-Strategieplan. Die Umstellung auf alternative Antriebsenergien kann zudem durch flankierende Maßnahmen unterstützt werden, die Bewusstsein für die Thematik schaffen sowie den aktuellen Informationsstand bei den Akteuren verbessern sollen; diese Maßnahmen sind überwiegend dem Bereich Kommunikation und Wissenstransfer sowie Demonstration zuzuordnen. Aspekte der Selbstversorgung mit Antriebsenergie, Energie- und Stoffkreisläufe sowie Wertschöpfung im ländlichen Raum werden berücksichtigt.

Voraussetzung für die künftig vermehrte Nutzung erneuerbarer Antriebsenergien in Land- und Forstmaschinen ist zumindest eine wirtschaftliche Gleichstellung, idealerweise eine ökonomische Besserstellung der Nutzung erneuerbarer Energien gegenüber dem Dieselkraftstoffeinsatz. Wie bereits hingewiesen, sind hierfür auf Bundesebene Grundlagen zu schaffen. Das Land Bayern kann danach durch folgende Maßnahmen die Umstellung begleiten:

- **Monetäre Anreize schaffen - Schließung von Förderlücken**. Mögliche Lücken bei der Investitionsförderung für die Neubeschaffung von Maschinen mit erneuerbaren Antriebstechnologien oder für die Umrüstung von Bestandsmaschinen bzw. bei der Förderung von Lade- und Betankungsinfrastruktur oder auch von dezentralen Kraftstoffproduktionsanalgen, die mit regionalen Rohstoffen arbeiten, könnten durch bayerische Förderprogramme abgedeckt werden. Einen Rahmen gibt hierbei unter anderem der Zukunftsvertrag zur Landwirtschaft in Bayern, vom 11.09.2023 vor. Voraussetzung ist, dass die finanziellen Mittel, aber auch die personellen Ressourcen für die Abwicklung von Förderprogrammen bereitgestellt werden. Über das Förderprogramm BioMeth Bayern können aktuell zum Beispiel Biogasaufbereitungsanlagen und Biogas- bzw.

Biomethanleitungen gefördert werden. Auf Bundesebene gibt aktuell das Bundesprogramm zur Steigerung der Energieeffizienz und CO_2-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau den Förderrahmen vor.

- **Vorbildfunktion der öffentlichen Hand**. Der Freistaat Bayern hat sich zum Ziel gesetzt eine klimaneutrale Verwaltung bis zum Jahr 2028 zu erreichen. In diesem Zusammenhang ist es Ziel, dass die Bayerischen Staatsgüter, die Landesanstalten und das Technologie- und Förderzentrum ihre mobilen landwirtschaftlichen Maschinen mit klimafreundlichen Kraftstoffen oder erneuerbarem Strom betreiben. Diese Umstellung im Landwirtschaftsressort ist bereits in vollem Gange. Auch die Bayerischen Staatsforsten könnten ihre Forstmaschinen auf Antriebssysteme mit erneuerbaren Energien umstellen. Dieses vorbildliche Handeln der öffentlichen Hand hätte Signalfunktion für alle landwirtschaftlichen Betriebe. Die Erfahrungen der Staatsbetriebe könnten mit den Praxisbetrieben ausgetauscht werden. Auszubildende, die ihre überbetrieblichen Kurse auf staatlichen Einrichtungen absolvieren, könnten mit den neuen Antriebstechnologien erste Erfahrungen sammeln.
- **Neue Antriebstechnologien erfahrbar machen**. Auf ausgewählten Demonstrationsbetrieben in allen Regierungsbezirken Bayerns sollen Maschinen mit unterschiedlichen Antriebssystemen im praktischen Betrieb gezeigt werden und die Wissenskommunikation mit Landwirtschaft, Landmaschinenindustrie, Kraftstoffherstellern und -händlern sowie Behörden intensiviert werden. Als Demonstrationsbetriebe könnten unter anderem die Bayerischen Staatsgüter dienen.
- **Aus- und Fortbildung**. An bayerischen berufsbildenden Schulen für Land- und Forstwirtschaft, Gartenbau und Weinbau sowie Land- und Baumaschinentechnik, an überbetrieblichen Ausbildungsstätten (Deula) und in land- und forstwirtschaftlichen Studiengängen an Hochschulen und Universitäten sollten erneuerbare Antriebstechnologien in den Ausbildungsplänen verankert werden.
- **Beratung**. Die vorhandenen Strukturen der Verbundberatung in Bayern mit der zentralen Funktion der Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten können dafür genutzt werden, landwirtschaftliche Betriebe bei der Auswahl der am besten passenden Antriebssysteme mit erneuerbaren Energien zu unterstützen. Auch eine Beratung bei der Errichtung von dezentralen Produktionsanlagen für Kraftstoffe ist wünschenswert. LandSchafftEnergie+, die Landesanstalten und das Technologie- und Förderzentrum können durch Wissenskommunikation die Beratung flankieren.
- **Forschung.** Forschung trägt dazu bei, die erneuerbaren Kraftstoffe in ihrer Qualität laufend zu verbessern, eine qualitätsbezogene Produktion, Lagerung und Verteilung zu ermöglichen sowie die Antriebssysteme entsprechend den Erwartungen der Praxisanwender aber auch der gesetzlichen Anforderungen, zum Beispiel hinsichtlich der Luftreinhaltung, weiterzuentwickeln. Eine wissenschaftliche Systembewertung ist erforderlich, um die Produktions- und Nutzungspfade hinsichtlich Nachhaltigkeitskriterien zu bewerten und Optimierungspotenziale aufzuzeigen.

- **Erwartungen der Politik kommunizieren und den Dialog fördern**. In der Land- und Forstwirtschaft aber auch in der Landmaschinenindustrie herrscht Verunsicherung über das ob, wann und wie bei der Umstellung der Maschinen auf erneuerbare Antriebsenergien. Die Bayerische Staatsregierung könnte im Dialog mit Land- und Forstwirten, Maschinenringen, Lohnunternehmen, Landmaschinenherstellern, Kraftstoffproduzenten und -händlern ihre Erwartungen kommunizieren und diskutieren. Dies wäre wichtig, da der Freistaat Bayern spätestens 2040 - 5 Jahre früher als der Bund - klimaneutral sein möchte.
- **Vernetzung mit anderen Bundesländern**. Vor der gleichen Herausforderung wie Bayern stehen auch die anderen deutschen Bundesländer. In Niedersachsen wurde beispielsweise vom Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz im April 2024 ein Expertengremium "Alternative Antriebe" einberufen, um Leitlinien für die Implementierung alternativer Antriebe in der landwirtschaftlichen Praxis zu erarbeiten. Eine Vernetzung der Aktivitäten empfiehlt sich, ggf. ergeben sich auch Synergien in Abstimmung mit europäischen Nachbarländern, allen voran Österreich.

4 Strategie für eine dezentrale Produktion von Biokraftstoffen in Bayern

Die dezentrale Bereitstellung von Antriebsenergien für die Land- und Forstwirtschaft erhöht die Versorgungsicherheit des sensiblen Wirtschaftssektors Nahrungsmittelproduktion und trägt zu regionalen Energie- und Stoffkreisläufen bei. Dezentrale Strukturen sollten dabei aber nicht als alleinige Alternative verstanden werden, sondern als ein Baustein einer resilienten Versorgung der Land- und Forstwirtschaft mit Antriebsenergien aus verschiedenen Quellen.

Folgende Antriebsenergien können in Bayern landwirtschaftsnah bereitgestellt werden:

- Erneuerbarer Strom, z. B. über Photovoltaik, Windkraft- und Biogasanlagen
- Rapsöl- und Pflanzenölkraftstoff aus Ölgewinnungsanlagen im Kaltpressverfahren
- Pflanzenöl aus industrieller Ölgewinnung in der Qualität eines Teilraffinats als Rohstoff z. B. für die Umesterung zu Biodiesel, ADM Spyck GmbH in Straubing
- Biodiesel über die beiden in Bayern existenten Umesterungsanlagen, Tecosol in Ochsenfurth und Biosyntec in Regensburg
- Biomethan in Form von CNG und LNG aus Biogasanlagen nach entsprechender Aufbereitung und Komprimierung bzw. Verflüssigung

In der Vergangenheit wurde auch eine dezentrale Produktion von Biodiesel von der RMEnergy Umweltverfahrenstechnik GmbH demonstriert. Betriebsbereite Anlagen in Bayern sind aber nicht bekannt.

4.1 Erforderliche Produktionsstätten und -kapazitäten

Die erforderlichen Produktionsstätten und -kapazitäten sind im Detail im Kapitel 3.3 aufgeführt. Die wesentlichen Aussagen für die Bedarfe der Szenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für die Bereitstellung des erneuerbaren Stroms werden gemäß der Szenarien 21 bis 193 Freiflächen-PV-Anlagen für die elektrischen Antriebe benötigt. Die Bereitstellung des Stroms für die paraffinischen Kraftstoffe E-Fuels würde etwa 120 zusätzliche Anlagen erfordern. Bei mittlerer Anlagengröße wären somit insgesamt bis zu 313 Anlagen nötig. Hierbei bleibt unberücksichtigt, dass aktuell bereits ein deutlich höherer Anlagenbestand existent ist, aus dem ggf. die Strombereitstellung erfolgen könnte.
- Die Verarbeitung der Rohstoffe für die Rapsöl- und Pflanzenölkraftstoffe in Ölgewinnungsanlagen könnte durch eine Kombination von dezentralen und zentralen Anlagen erreicht werden. Bei einer Verarbeitungskapazität von 10 t Saat pro Tag müssten bis zu 61 dezentrale Anlagen betrieben werden. Bei Verarbeitungskapazitäten von ca. 4.000 t Ölsaat pro Tag (zentrale Anlage) sollte eine zentrale Ölgewinnungsanlagen für

die Bereitstellung des Pflanzenöls ausreichend sein. Ob bestehende Anlagen (vgl. Kapitel 2) die Verarbeitung der Rohstoffe übernehmen könnten, wurde nicht überprüft.

- Der Bedarf an Biodiesel könnte über die beiden in Bayern produzierenden Biodieselanlagen bereitgestellt werden.
- Die Produktion des Biomethans bzw. des Biogases würde keine zusätzlichen Biogasanlagen erfordern. Der Anlagenbestand ist ausreichend, um die erforderlichen Biogasmengen zu produzieren. Die Aufbereitung und Komprimierung bzw. Verflüssigung zur Bereitstellung von CNG und LNG würde allerdings den Betrieb von 25 bis 40 CNG-Anlagen und ca. 2 LNG-Anlagen erfordern. Für eine etwaige Planung der Anlagen sollten möglichst bestehende Biogasanlagen und deren Merkmale (Leistungen, räumliche Verteilungen, Technologie, Betreiber, Anlagenalter usw.) berücksichtigt werden.

4.2 Auswirkung auf den ländlichen Raum

Mit der lokalen Bereitstellung von Antriebsenergien können zum Teil Kosteneinsparungen beim Betrieb der Maschinen (z. B. Nutzung von selbst erzeugtem Strom), Arbeitsplätze und Wertschöpfung im ländlichen Raum durch Rohstoffproduktion und -verarbeitung verbunden sein. Die Effekte sind mit dem aktuellen Wissensstand nicht quantifizierbar; entsprechende Untersuchungen wären erforderlich. Erste Abschätzungen wurden im Vorhaben ExpRessBio [6] vorgenommen.

Neben der Bereitstellung von Antriebsenergie sind für eine ökonomische Analyse auch die Koppelprodukte, wie z. B. Presskuchen, Extraktionsschrot oder auch Glycerin zu betrachten. Insbesondere die Bereitstellung von heimischen Eiweißfuttermitteln aus der Verarbeitung lokal produzierter Ölsaaten ist ein wichtiger Beitrag zur bayerischen Eiweißinitiative. Auch bei der Verarbeitung von Soja als Eiweißquelle in der Humanernährung, kann das als Koppelprodukt anfallende Sojaöl als Kraftstoff genutzt werden.

Eine Bündelung geplanter Aktivitäten, durch Einbezug überbetrieblicher Strukturen, z. B. Maschinenringe, Erzeugerringe oder Erzeugergemeinschaften, kann Kosteneinsparungen durch sinnvolle Skalierungseffekte ermöglichen.

4.3 Anreize für eine dezentrale Kraftstoffproduktion

Spezifische Anreize, dezentral Kraftstoffe für die Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft zu produzieren, bestehen derzeit nicht.

Ein Anreiz könnte ggf. dadurch geschaffen werden, dass auf dem Hof oder in einer Gemeinschaftsanlage erzeugte Agrar-Kraftstoffe von der Landwirtin oder dem Landwirt bzw. von den an der Gemeinschaftsanlage beteiligten Landwirten, energiesteuerentlastet genutzt werden können. Dieser Regelung müsste auf Bundesebene beschlossen werden. Ob solch eine Regelung steuer- und beihilferechtlich zulässig wäre, ist nicht geprüft.

Ein weiterer Anreiz könnte über eine Investitionsförderung für dezentrale Kraftstoffproduktionsanalgen geschaffen werden. Aktuell können auf Antrag Biogasaufbereitungsanlagen und Biogas- bzw. Biomethanleitungen über das Programm BioMeth Bayern gefördert werden. Eine Investitionsförderung für Biodieselanlagen und dezentrale Ölmühlen ist nicht bekannt. Eine Förderoption dieser Produktionsanalgen ist zudem kritisch zu diskutieren. Heute in Bayern existente dezentrale Ölmühlen wurden in der Regel ohne Förderung errichtet. Außerdem haben von den im Jahr 2007 bekannten 246 dezentralen Ölmühlen in Bayern viele ihren Betrieb eingestellt und die Anlagentechnik verkauft oder wurden stillgelegt [18]. Die stillgelegten Ölmühlen könnten ggf. die Produktion wieder aufnehmen. Es ist zu beachten, dass ein Teil der Landwirtinnen und Landwirte, die damals in eine Ölmühle investierten, bis heute enttäuscht sind, da sich die in eine dezentrale Kraftstoff- und Futtermittelproduktion gesetzten Hoffnungen nicht erfüllten. Dies wird häufig mit einem Vertrauensbruch durch die Politik in Verbindung gebracht, da die Förderung des Einsatzes von Biokraftstoffen außerhalb des Sektors Landwirtschaft von einer Steuerbegünstigung auf eine Quotenverpflichtung umgestellt wurde. Eine Investitionsförderung für dezentrale Kraftstoffproduktion dürfte daher in Teilen der Landwirtschaft auf Misstrauen stoßen. Über einen kurzen Zeitraum wurde über die Richtlinie zur Förderung der Energieeffizienz und CO_2-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau Investitionen in die erneuerbare Energieerzeugung, von kaltgepresstem Rapsöl aus landwirtschaftlicher Erzeugung mit dem Koppelprodukt Rapskuchen als Tierfutter, gefördert. Die Nachfrage nach dieser Förderung war jedoch gering. Anreize in eine dezentrale Kraftstoffproduktion sollten daher immer mit möglichst großer Planungssicherheit für die Investoren, was die Nachfrage und den Absatz der Produkte betrifft, einhergehen.

Interessenten, die in dezentrale Kraftstoffproduktion investieren möchten, sollten auf eine fachlich fundierte Beratung zurückgreifen können, um Fehlinvestitionen zu vermeiden. Die Beratung sollte nicht nur ökonomische und technische Aspekte der Anlage umfassen, sondern insbesondere auch die Kraftstoffqualität und den rechtlichen Rahmen, z. B. hinsichtlich Besteuerung, Führen eines Steuerlagers, Nachhaltigkeitsanforderungen und -dokumentation, In-Verkehr-Bringen und Kennzeichnen von Kraftstoffen, Treibhausgasquoten-Verpflichtung, Produkthaftung etc. abdecken.

Zusammenfassung

Von den bayerischen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben werden jährlich rund 448 Millionen Liter Dieselkraftstoff verbraucht. Damit sind jährliche Treibhausgasemissionen in Höhe von rund 1,2 Millionen Tonnen (Tank-to-Wheel) bzw. 1,5 Millionen Tonnen CO_2-Äquivalenten (Well-to-Wheel) verbunden.

Welche Potenziale zur Bereitstellung von Biokraftstoffen bestehen für die bayerische Land- und Forstwirtschaft?

Die Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe in Bayern betrug im Jahr 2020 etwa 448.000 ha, was rund 14 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche Bayerns entspricht. Zur Abschätzung des Kraftstoff- und damit verbundenen Flächenbedarfs im Jahr 2040 werden zwei Szenarien "moderate Elektrifizierung" und "ambitionierte Elektrifizierung" der mobilen Maschinen betrachtet. Der Gesamtflächenbedarf zur Deckung des Kraftstoffverbrauchs der bayerischen Landwirtschaft wird bei ambitionierter Elektrifizierung für den Antriebsmix im Jahr 2040 auf maximal 90.000 ha, bei moderater Elektrifizierung auf maximal 143.000 ha (etwa 3,2 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche oder 7,0 % der Ackerfläche Bayerns) abgeschätzt. Eine Zunahme der Konkurrenzsituation zwischen Nahrungsmittel-, Futtermittel- und Kraftstoff-/Stromproduktion ist bei diesen geringen Flächenanteilen kaum zu befürchten.

Werden nur die Biokraftstoffe Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel und HVO im Szenarium "moderate Elektrifizierung" betrachtet, so sind dafür Ackerflächen von bis zu 137.000 ha im Jahr 2040 notwendig. Die Rapsanbaufläche in Bayern im Jahr 2020 für die Erzeugung von Biodiesel und Rapsölkraftstoff betrug 63.000 ha. Um den Biokraftstoffbedarf der bayerischen Landwirtschaft im Jahr 2040 zu decken, müsste daher die Rapsanbaufläche im Vergleich zu 2020 mehr als verdoppelt werden. Dies wäre möglich, da im Bezugsjahr 2020 nur wenig Raps angebaut wurde. Die bisher größte Ausdehnung der Rapsanbaufläche in Bayern lag bei fast 180.000 ha im Jahr 2007, was etwa 9 % der Ackerfläche Bayerns entspricht. Würden die etwa 20.000 ha Rapsanbaufläche zur Versorgung des Nahrungsmittelmarkts addiert, wäre der Flächenbedarf im Jahr 2040 immer noch um mehr als 20.000 ha geringer als die Rapsanbaufläche von 2007. Für den für das Jahr 2040 prognostizierten Bedarf an CNG und LNG für die bayerische Landwirtschaft werden weniger als 1,5 % der Flächen beansprucht, die derzeit für die Biogaserzeugung verwendet werden. Es sind also hierfür keine signifikanten Veränderungen in der Flächennutzung erforderlich.

Der maximale Flächenbedarf für Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen zur Erzeugung von Strom für batterieelektrische Antriebe und E-Fuels im Jahr 2040 im Szenarium "ambitionierte Elektrifizierung" beträgt nach vorliegenden Berechnungen 1.410 ha. Dies entspricht etwa 37 % der momentan beanspruchten Fläche für Freiflächen-PV. Somit müsste entweder ein Teil des Stroms aus den bestehenden PV-Anlagen für den Einsatz als Antriebsenergie genutzt oder zusätzliche Freiflächen-, Dachflächen-PV- oder Windkraft-Anlagen errichtet werden.

Es ist festzustellen, dass trotz vieler Ungewissheiten für eine Umstellung auf erneuerbare Antriebssysteme der bayerischen Landwirtschaft keine gravierende Veränderung bei der Flächennutzung erforderlich ist.

Welche Strategien könnten zu einer klima- und flächenschonenden Nutzung von Biokraftstoffen in Bayern führen?

Durch Ausschöpfung des Potenzials zur Elektrifizierung leichter Arbeiten lässt sich der Gesamtenergiebedarf für mobile Antriebe in Höhe von 14 PJ um 21 % bis 36 % senken. Batterieelektrische Antriebssysteme sind daher in den technisch möglichen Anwendungen zu bevorzugen. Diese Umstellung geht aber mit hohen Investitionen in Neumaschinen einher. Im Vergleich zu batterieelektrischen Systemen sind mit dem Einsatz von E-Fuels als Antriebsenergie höhere Bedarfe an erneuerbarem Strom verbunden. Auf Basis der durchgeführten Berechnungen kann davon ausgegangen werden, dass eine vollständige Substitution der erforderlichen Diesel- bzw. Energiemengen durch alternative Kraftstoffe bzw. Antriebsenergien möglich ist. Die wichtigsten strategischen Weichenstellungen zur Förderung einer vermehrten Nutzung von erneuerbaren Antriebsenergien in land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen sind auf Bundesebene vorzunehmen. Bayern kann unterstützen durch weitere monetäre Anreize, zum Beispiel durch Schließen von Förderlücken, durch Intensivierung von Ausbildung, Fortbildung und Beratung, durch Forschungsförderung, durch Demonstration und Vorbildfunktion öffentlicher Einrichtungen, durch klare Kommunikation mit den Akteuren sowie durch Vernetzung mit anderen Bundesländern und Anrainerstaaten.

Welche Strategien könnten verfolgt werden, damit eine dezentrale Produktion von Biokraftstoffen in Bayern zur Stärkung des ländlichen Raumes genutzt werden kann?

Zu den erneuerbare Antriebsenergien, die dezentral in Bayern bereitgestellt werden können, zählen elektrischer Strom, Rapsöl- und Pflanzenölkraftstoff aus dezentralen Anlagen, Biodiesel aus zwei bayerischen Biodieselanlagen sowie Methan aus Biogasanlagen mit Methanaufbereitung und Komprimierung zu CNG oder Verflüssigung zu LNG. Spezifische Anreize, dezentral Kraftstoffe für die Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft zu produzieren, bestehen derzeit nicht. Lenkende steuerliche Anreize sind auf Bundesebne zu setzen. Eine gezielte bayerische Investitionsförderung bei vorausgesetzt langfristiger Planungssicherheit, was die Nachfrage und den Absatz der Produkte betrifft, kann unterstützend wirken. Eine fachlich fundierte Beratung in Bayern trägt dazu bei, Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Quellenverzeichnis

[1] Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (2022): Bayerischer Agrarbericht 2022. https://www.agrarbericht.bayern.de, Abruf am 24.06.2024

[2] Bayerische Staatsregierung (2024): Energieatlas Bayern. https://www.energieatlas.bayern.de, Datenabruf am 24.06.2024

[3] Bundesanstalt für Ernährung und Landwirtschaft (BEL) (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Stand redaktionell: Januar 2024, Stand Datenbankauszug: August 2023. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bonn, 102 S.

[4] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft BMEL (verschiedene Jahre): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung. https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet, Abruf am 24.06.2024.

[5] C.A.R.M.E.N. e.V. (2024): Biomethan – vielseitig einsetzbar. Natürlicher Energiespeicher aus der Landwirtschaft. Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (C.A.R.M.E.N. e.V.) (Hrsg.), Straubing, 8 S.

[6] Dressler, D.; Engelmann, K.; Bosch, F.; Böswirth, T.; Bryzinski, T.; Effenberger, M. et al. (2016): ExpRessBio - Ergebnisse. Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Abschlussbericht - Langfassung. Hg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Straubing.

[7] Eckel, H.; Remmele, E.; Frerichs, L.; Hipp, J.; Müller-Langer, F.; Schröder, J. (2023): Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt. (KTBL-Sonderveröffentlichung, 12643)

[8] Ettl, J.; Thuneke, K.; Remmele, E.; Haas, R. (2020): Rapsöl als Kraftstoff für Traktoren. Gut für Klima und Umwelt. 3., aktual. Aufl. Hg. v. Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ). Straubing (TFZ-Kompakt, 8).

[9] Europäische Union (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). Amtsblatt der Europäischen Union L 328/82

[10] Europäische Union (2023): Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates

[11] Generalzolldirektion (2018): Steuerbegünstigte Mengen von Bio- und konventionellen Kraftstoffen, die zur Energiesteuerentlastung nach § 57 EnergieStG angemeldet wurden. Neustadt a. d. Weinstraße 07/2018 (unveröffentlicht)

[12] Generalzolldirektion (2024): Steuerbegünstigte Mengen von Bio- und konventionellen Kraftstoffen, die zur Energiesteuerentlastung nach § 57 EnergieStG angemeldet wurden. Neustadt a. d. Weinstraße 03/2024 (unveröffentlicht)

[13] Gibgas medien und gibgas consulting (2024): CNG-Tankstellensituation. https://www.gibgas.de/Tankstellen/Europainfos/Deutschland, Abruf am 16.06.2024

[14] Halama, M.; Toews-Mayr, G. und Hoffmann, M. (2023): Vorbereitung einer Bayerischen Biomasse-Ressourcenstrategie – wissenschaftliche Grundlagen und Empfehlungen (BioReSt)" Teilbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft: „Landwirtschaftliche Biomasse“. (Veröffentlichung in Vorbereitung)

[15] Icha, P. und Lauf, T. (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2022. Climate Change 20/2023. Hg. v: Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf, Abruf am 24.06.2024

[16] IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme; Eggleston, H.S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. and K. Tanabe (Hrsg.). Published: IGES, Japan.

[17] Kraftfahrt-Bundesamt (2023): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Haltergruppen und Wirtschaftszweigen. Flensburg. Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0, https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Halter/halter_node.html, Abruf am 16.06.2024.

[18] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (Hrsg.) (2005): Dezentrale Ölsaatenverarbeitung. Münster: Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup

[19] Reinholz, T. und K. Völler (2023): Branchenbarometer Biomethan 2023. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.). Berlin. 20 S.

[20] Remmele, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Aufl. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)

[21] Remmele, E.; Eckel, H.; Pickel, P.; Rathbauer, J.; Reinhold, G.; Stirnimann, R. et al. (2020): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) (KTBL-Schrift, 519).

[22] Schröder, J. und K. Naumann (Hrsg.) (2023): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. 1. Korrigierte Aufl. (DBFZ-Report 44), Leipzig: DBFZ, 338 S.

[23] Statistisches Bundesamt (2024): Bodenfläche nach Nutzungsarten und Bundesländern am 31.12.2022. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Flaechennutzung/Tabellen/bodenflaeche-laender.html, Abruf am 22.06.2024

[24] Thuneke, K.; Remmele, E. (2021): Klimafreundliche Antriebe für Landmaschinen. In: Schule und Beratung (5-7), S. 29–32.

[25] Technologie- und Förderzentrum (2024): Förderung von Biogasaufbereitungsanlagen und Biogas- bzw. Biomethanleitungen (Förderprogramm BioMeth Bayern). https://www.tfz.bayern.de/foerderung/345761/index.php, Abruf am 16.06.2024.

[26] Umweltbundesamt (2024): Sonderauswertung zum THG-Inventar: Energiebedingte Emissionen in der Landwirtschaft (Quellgruppe 1.A.4.c), unveröffentlicht.

[27] Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. UFOP (2024): Geschäftsbericht 2022/2023. https://www.ufop.de/files/3916/9451/4948/WEB_UFOP_GB_2023.pdf, Abruf am 16.06.2024

[28] Zukunft Gas e. V. (2024): LNG-Tankstellennetz. https://gas.info/gas-im-energiemix/mobil-verkehr/lng-bio-lng-schwerlastverkehr/lng-tanken#:~:text=Derzeit%20gibt%20es%20rund%20158,Transport%2D%20sowie%20Logistikunternehmen%20angefahren%20w. erden, Abruf am 16.06.2024

Anhang

Folgende Tabelle enthält alle relevanten Daten und Annahmen, die für die Berechnung verwendet wurden.

Parameter	Einheit	Wert	Kommentar
Energiegehalte			Quelle: KTBL [21]
Dieselkraftstoff B7	MJ/l	35,6	7 % Biodieselanteil
Dieselkraftstoff	MJ/l	35,8	
Pflanzenölkraftstoff	MJ/l	34,6	
FAME (B100)	MJ/l	32,6	FAME = Fettsäuremethylester
HVO-Diesel	MJ/l	34,4	HVO = Hydriertes Pflanzenöl
Fischer-Tropsch(FT)-Diesel	MJ/l	35,8	Annahme: Heizwert wie Diesel
CNG, gasförmig 200 bar	MJ/l	8,1	50 MJ/kg
LNG, flüssig, -162 °C	MJ/l	21,2	50 MJ/kg
Lithium-Ionen Akkumulator	MJ/l	1,1	0,7 MJ/kg
Emissionsfaktoren: (Tank-to-Wheel)			Ohne Emissionen der Vorkette (Energieträgerproduktion und -transport)
Dieselkraftstoff	g CO_{2eq}/MJ	74,10	Quelle: [16]
Erneuerbare Kraftstoffe	g CO_{2eq}/MJ	0	
Deutscher Strommix	kg CO_{2eq}/kWh g CO_{2eq}/MJ	0,442 122,78	Bezugsjahr: 2022, geschätzt Quelle: [15]
Erneuerbarer Strom	kg CO_{2eq}/kWh	0	
Emissionsfaktoren: (Well-to-Wheel)			Inklusive Emissionen der Vorkette (Energieträgerproduktion u. -transport)
Dieselkraftstoff	g CO_{2eq}/MJ	94	Quellen: [9], [10]
Pflanzenölkraftstoff	g CO_{2eq}/MJ	32,13	Quelle: [3], Mittelwert 2020-2022
FAME (B100)	g CO_{2eq}/MJ	16,59	Quelle: [3], Mittelwert 2020-2022
HVO-Diesel	g CO_{2eq}/MJ	16,03	Quelle: [3], Mittelwert 2020-2022
CNG	g CO_{2eq}/MJ	-3,56	Quelle: [3], Mittelwert 2020-2022
LNG	g CO_{2eq}/MJ	4,39	Quelle: [3], Mittelwert 2020-2022
Strom	kg CO_{2eq}/kWh g CO_{2eq}/MJ	0,498 138,33	Bezugsjahr: 2022, geschätzt Quelle:[15]
Gesamtwirkungsgrad der Antriebssysteme			Quelle: KTBL [21]
Dieselmotor	%	32	Motor 40 %, Antriebsstrang 80 %
Ottomotor	%	28	Motor 35 %, Antriebsstrang 80 %
Ottomotor -Gas	%	24	Motor 30 %, Antriebsstrang 80 %
Elektromotor	%	81	Motor 90 %, Antriebsstrang 90 %
Brennstoffzelle mit Elektromotor	%	49	Brennstoffzelle: 60 %, Motor 90 %, Antriebsstrang 90 %
Wirkungsgrad für FT-Diesel-Antriebssystem (E-Fuel) zu Strominput für Herstellung	%	13	Quelle: nach: [22]
Dezentrale Ölmühlen			
Presstage	d	250	Eigene Annahme
Verarbeitungskapazität	t/d	10	Eigene Annahme
Biogasanlagen			
Anzahl in Bayern	--	3564	Bezugsjahr: 2021, Quelle: [2]
Stromproduktion	GWh/a	8.988	Bezugsjahr: 2021, Quelle: [2]
Biogasproduktion	Mio.m³/a	3.144	Quelle: [2]

Methanproduktion	Mio.m³/a	1.713	bei 54,5 % Methananteil im Biogas
Anteil pflanzliche Biomasse im Gärsubstrat	%	88	Anbaubiomasse (Mais 57 %, Grünland 33 %, Rest: 10 %)
Anteil tierische Biomasse im Gärsubstrat	%	12	Gülle etc.
Mittl. install. Leistung je Anl.	kW	1670	Quelle: [2]
Mittl. Volllasttage je Anlage	d/a	190	Quelle: [2]
Mittl. Vollaststunden je Anlage	h/a	4.588	Quelle: [2]
Mittl. Stromproduktion je Anl.	MWh/a	2.522	Quelle: [2]
Bio-LNG-Anlage			
LNG-Produktion je Anlage	t/a	2.718	Quelle: www.ruhe-biogas-service.de/
Bio-CNG-Anlage			
Anzahl	--	22	Quelle: [4]
CNG-Produktion je Anlage	t/a	221	Biogasstrom 100 m³/h, 52 % Methangehalt, Quelle: www.biog-biogas.com
Photovoltaik(PV)-Anlagen			
Anzahl PV-Anlagen in Bayern	--	68.0578	Bezugsjahr 2021, Quelle: [2]
Stromproduktion mit PV	GWh/a	13.882	Bezugsjahr 2021, Quelle: [2]
Mittlere Stromproduktion je PV-Anlage	MWh/a	20	Bezugsjahr 2021, Quelle: [2]
Anzahl Freiflächen-PV-Anlagen Bayern	--	3065	Bezugsjahr 2021, Quelle: [2]
Stromproduktion mit Freiflächen-PV	GWh/a	1.370	Quelle: [2]
Mittlerer Flächenbedarf einer Freiflächen-PV	ha	4,5	Quelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE 2021 und 2023; Bay. LA für Umwelt
Gesamt-Fläche für alle Freiflächen-PV-Anlagen	ha	3.817	Berechnet mit Anzahl und Leistungsannahmen
Erträge			
Rapssaat	t/ha	3,5	Eigene Annahme
Rapsöl	l/ha	1.500	Eigene Annahme
FAME (B100) aus Raps	l/ha	1.500	Eigene Annahme
FAME (B100) aus Altfett	$l/kg_{Altfett}$	0,88	Eigene Annahme
Rapspresskuchen/-schrot	kg/ha	2.000	entsteht bei der Ölgewinnung
Glycerin	kg/ha_{Raps}	130	entsteht bei der Umesterung von Pflanzenölen zu Biodiesel
Altfette			
Bevölkerung Bayern	--	13.432.900	Bezugsjahr 2024, Quelle: statistikdaten.bayern.de
Bevölkerungswachstum	%/a	0,46	Eigene Annahme
Anfall pro Person	kg/a	0,8-1,5	Quellen: www.jedertropfenzaehlt.de/ www.mitaltfettendieumweltretten.de/
Verhältnis B100 zu Altfett	l/kg	0,88	
Anbauflächen (Bayern)			
Ackerfläche Bayern	ha	2.024.900	Bezugsjahr 2021, Quelle: [1]
Raps aktuell	ha	81.300	Bezugsjahr: 2020, Quelle: [1]
Rapsanbaufläche historisch (Jahr 2002)	ha	172.800	Bezugsjahr 2007, Quelle: BMEL: Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung
„Energieraps“	ha	63.000	Raps für Rapsölkraftstoff und Biodiesel Quelle: [1]
Ackerfläche für Biogas??	ha	224.000	Quelle: [1]

Maisanbaufläche	ha	127.874	
Dauerkulturen	ha	4.000	
Dauergrünland	ha	110.000	
Kraftstoffverbräuche			Quelle: KTBL [7]
Leichte Arbeiten	l/ha	< 5	
Mittelschwere Arbeiten	l/ha	5-15	
Schwere Arbeiten	l/ha	> 15	
Getreideanbau	l/ha	78	inkl. Körnermais
Rapsanbau	l/ha	74	
Silomais, Feld-/Ackergras	l/ha	138	
Dauergrünland	l/ha	108	Wiesen und Weiden
Anzahl Rinder in Bayern	--	2.933.046	Quelle: [14]
Mittlerer Kraftstoffverbrauch pro Rind	l/a	38	Quelle: [7]