

81

Berichte aus dem TFZ

HVO-Diesel für Traktoren

Analyse zum Einsatz
des paraffinischen
Dieselkraftstoffs HVO
auf Staatsbetrieben



HVO-Diesel für Traktoren – Analyse zum Einsatz des paraffinischen Dieselkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben



HVO-Diesel für Traktoren

**Analyse zum Einsatz des paraffinischen
Dieselkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben**

Veronika Röck
Dr. Klaus Thuneke
Dr. Johannes Ettl
Dr.-Ing. Peter Emberger
Dr. Edgar Remmele

Berichte aus dem TFZ 81

Straubing, Juni 2023

Titel: HVO-Diesel für Traktoren – Analyse zum Einsatz des paraffinischen Dieselkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben

Autoren: Veronika Röck
Dr. Klaus Thuneke
Dr. Johannes Ettl
Dr.-Ing. Peter Emberger
Dr. Edgar Remmele

Projektleitung: Dr. Edgar Remmele

Mitarbeiter: Roland Fleischmann
Martin Speiseder

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben mit dem Titel „Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen für eine klimaverträgliche Bewirtschaftung der Bayerischen Staatsgüter, Staatsforsten, Landesanstalten, TFZ und Betriebe der Justizvollzugsanstalten als Beitrag zur Umsetzung der Klimaschutzoffensive – ParaDies2025“ wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten unter dem Förderkennzeichen G2/N/21/04 gefördert. Das Projekt wurde im Zeitraum vom 01.11.2021 bis zum 15.09.2022 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2023

Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.

Kein Teil dieses Werks darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil < 1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008
Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Dr. Klaus Thuneke, Veronika Röck, Anna Grundner
Gestaltung: Veronika Röck, Dr. Klaus Thuneke, Dr.-Ing. Peter Emberger
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2023

Fotos: Neste (Abbildung 4), restliche TFZ

Abstract (deutsch)

In dieser Arbeit wird untersucht, ob hydriertes Pflanzenöl (HVO) auf Basis von Rest- und Abfallstoffen, das zu den paraffinischen Dieselkraftstoffen gemäß DIN EN 15940 zählt, für die bestehenden Fuhrparks der Bayerischen Staatsbetriebe eine nachhaltige und kurzfristig bis zum Jahr 2025 umsetzbare Alternative zu fossilem Dieselkraftstoff darstellen kann, um das Ziel einer klimaneutralen Staatsverwaltung in Bayern bis zum Jahr 2028 zu erreichen.

Zunächst wurde der Kenntnisstand zum Einsatz hydrierten Pflanzenöls (HVO) in Fahrzeugen, speziell in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen, zusammengetragen. In einem Praxisversuch wurden verschiedene Traktoren und landwirtschaftliche Maschinen der Staatsbetriebe von Diesel auf HVO umgestellt und über mehrere Wochen hinweg wissenschaftlich begleitet. Außerdem wurde ein Meinungsbild zum Einsatz palmölfreien HVO auf land- und forstwirtschaftlichen Betrieben im Eigentum des Freistaats Bayern eingeholt. Unter Einbeziehung aller Erkenntnisse wurde eine abschließende Bewertung vorgenommen.

Die Eigenschaften hydrierter Pflanzenöle unterscheiden sich nur geringfügig von Dieselkraftstoff. Deshalb kann aus technischer Sicht HVO gut in Serien-Dieselfahrzeugen eingesetzt werden. Wenn für Fahrzeuge keine explizite Zulassung für HVO vorliegt, bestehen jedoch rechtliche Unsicherheiten bei der Nutzung. Für HVO wird die gleiche Energiesteuer wie für Diesel erhoben, eine Agrardieselvergütung für die Land- und Forstwirtschaft wird nicht gewährt. Der Praxistest auf den Staatsbetrieben verlief nahezu ohne Störungen. Lediglich an einer älteren Maschine wurde nach der Umstellung eine Undichtigkeit im Kraftstoffsystem festgestellt, die aber mit wenig Aufwand behoben werden konnte. Die Motorölqualität, die Motorleistung und das Abgasverhalten unterschieden sich im Praxistest mit HVO nicht vom Dieselpetrieb. Das Meinungsbild zur Akzeptanz von HVO aus Rest- und Abfallstoffen zeigt unter den Befragten überwiegend eine positive Einstellung zu HVO.

Die land- und forstwirtschaftlichen Betriebe im Umfeld des StMELF können das vorgegebene Ziel einer klimafreundlichen Bewirtschaftung der Staatsgüter kurzfristig bis 2025 erreichen. Da jedoch die Gefahr besteht, sich von einer nur begrenzt verfügbaren Kraftstoffoption abhängig zu machen, und um der Vorbildfunktion der Staatsbetriebe gerecht zu werden, sollten der Einsatz weiterer Biokraftstoffe sowie die Umstellung auf elektrische Antriebe weiter forciert werden.

Abstract (englisch)

This study investigates whether hydrogenated vegetable oil (HVO) based on residual and waste materials, which belongs to the group of paraffinic diesel fuels in accordance with DIN EN 15940 can become a sustainable alternative to fossil diesel fuel for the existing fleets of state-owned enterprises that can be implemented in the short term by 2025 in order to achieve the goal of a climate-neutral state administration in Bavaria by 2028.

First, the state of knowledge on the use of hydrogenated vegetable oil (HVO) in vehicles, especially in agricultural and forestry machinery, was compiled. In a practical trial, various tractors and agricultural machines of the Bavarian state farms (BaySG) were converted from diesel to HVO and accompanied scientifically for several weeks. Additionally, a survey was conducted on the opinions of using palm oil-free HVO in agricultural and forestry machinery on farms of the Bavarian state administration. A final evaluation was carried out taking into account all the findings.

The properties of hydrogenated vegetable oils differ only slightly from diesel fuel and, from a technical point of view, HVO can be used reliably in series diesel vehicles. However, if there is no explicit approval for HVO for vehicles, there are legal uncertainties about its use. HVO is subject to the same energy tax rate as fossil diesel, but in contrast there is no tax relief for the use in agriculture and forestry. The practical test on the BaySG ran without any major disruptions. Only one older machine showed a leakage near the fuel pump after the change to HVO, but this could be fixed with little effort. Engine oil quality, engine performance and exhaust gas behaviour with HVO did not differ from diesel operation. The survey on the acceptance of HVO made from residual and waste materials shows that the interviewees predominantly have a positive opinion of HVO.

The state farms of the Bavarian agricultural administration can achieve the specified goal of climate-friendly management in the short term by 2025. However, since there is a risk of becoming highly dependent on a single fuel option that is only available to a limited extent and in order to foster the exemplary role of the state farms, the use of various bio-fuels and electric drives should be encouraged.

Inhaltsverzeichnis

Abstract (deutsch)	5
Abstract (englisch)	6
Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	11
1 Einleitung und Problemstellung	13
2 Zielstellung	15
3 Vorgehen	17
4 Stand des Wissens	19
4.1 Herstellung des paraffinischen Kraftstoffs HVO	19
4.2 Marktübersicht	21
4.2.1 Produktionsmengen und Absatz	22
4.2.2 Rohstoffe	25
4.2.3 Vertrieb	29
4.2.4 Preis	30
4.3 Eigenschaften von HVO	31
4.3.1 Norm DIN EN 15940	31
4.3.2 Physikalisch-chemische Stoffeigenschaften	33
4.3.3 Emissionen und Energiebilanz.....	37
4.4 Rahmenbedingungen	41
4.4.1 Inverkehrbringen von HVO.....	41
4.4.2 Energiesteuer	43
4.4.3 THG-Quotenanrechnung (EU-Richtlinie 2018/2001 und BImSchG) für den Verkehrssektor.....	44
4.4.4 Treibhausgasminderung für den Sektor Landwirtschaft.....	45
4.4.5 Herstellerfreigaben.....	46
4.4.6 Lagerung und Betankung.....	46
4.5 Nutzungsbeispiele	47
5 Praxistest	49
5.1 Maschinen und Methoden	49
5.2 Ergebnisse	52
6 Meinungsbild	59
7 Bewertung und Handlungsempfehlung	65
7.1 Bewertung von HVO in der Literatur	65

7.2	Bewertung von HVO – eigene Analyse für den Einsatz am Beispiel der Bayerischen Staatsbetriebe	67
	Zusammenfassung	73
	Summary	75
	Quellenverzeichnis	77
	Anhang	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Flussschema der Produktion von HVO (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022) [64])	20
Abbildung 2:	Entwicklung der weltweiten Biokraftstoffproduktion in Exajoule (EJ) (Quelle: SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: F.O. Licht, IHS Markit [64])	22
Abbildung 3:	Weltweite und europäische Produktionskapazitäten von HVO-Diesel in bestehenden und geplanten Anlagen 2021 (ohne Berücksichtigung geplanter Kapazitätserweiterungen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: IHS Markit [64])	23
Abbildung 4:	Neste's Porvoo refinery in Finland, NEXBTL facilities, Neste (Bild: Neste Oyj, www.neste.com)	24
Abbildung 5:	Entwicklung der Biokraftstoffnutzung in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: Eurostat, BLE [64])	25
Abbildung 6:	Energiemenge der Ausgangsstoffe in Terajoule (TJ) für die Herstellung von HVO-Kraftstoff in den Jahren 2018 bis 2020 [7], 1 TJ = 10^{12} Joule. 26	
Abbildung 7:	Ausgangsstoffe für die Herstellung beim Co-Processing [7].....	27
Abbildung 8:	Ausgangsstoffe für Biokraftstoffe mit Herkunft Asien [7].....	28
Abbildung 9:	Ressourcen zur Nutzung (Deutschland) und Produktion (Europa, weltweit) von FAME und HVO-Diesel [64].....	28
Abbildung 10:	Gestehungskosten etablierter Konversionspfade für HVO aufgeteilt nach Rohstoffen (Quelle: SCHRÖDER et al. (2022) [64]).....	30
Abbildung 11:	Energieaufwand zur Herstellung von HVO für verschiedene Rohstoffquellen, Herstellungsprozesse und bei unterschiedlicher Anrechnung des Nebenprodukts Rapsschrot nach PRUSSI et al. (2020) [60].....	40
Abbildung 12:	HVO-betriebene Traktoren VA-V2 (oben links), Traktor FE-IIIB (oben rechts), Traktor JD-IV (unten links), Traktor FE-IV (unten rechts) auf Betrieben der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)	51
Abbildung 13:	HVO-betriebener Futtermischwagen SK-IV (links) und Hoflader WE-IIIB (rechts) auf Betrieben der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)	51
Abbildung 14:	Kraftstoffpumpe des Hofladers Weidemann 3080 (WE-IIIB).....	52
Abbildung 15:	HVO-Tankstelle am Standort Kringell der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)	54
Abbildung 16:	HVO-betriebener Valtra-Traktor (VA-V) am Prüfstand des TFZ bei Abgas- und Leistungsmessungen	56

Abbildung 17: NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors Valtra T214 (VA-V) beim stationären Fahrzyklus (NRSC) und transienten Fahrzyklus (NRTC) mit paraffinischem (HVO) und konventionellem Dieselmotorkraftstoff 57

Abbildung 18: Mittelwerte und Spannweiten des äquivalenten Motordrehmoments, der Zapfwellenleistung, des Kraftstoffverbrauchs, des Wirkungsgrads an der Zapfwelle sowie des Verbrauchs an Harnstofflösung des Traktors Valtra T214 (VA-V) beim Betrieb mit Diesel und HVO 58

Abbildung 19: Antworten auf die Frage „Kennen Sie hydriertes Pflanzenöl, das auch HVO genannt wird?“ (24 Befragte, davon 13 Fach- und 11 Führungskräfte) 59

Abbildung 20: Antworten auf die Frage „Welcher Kraftstoff stellt für Sie eine gute Option für den klimafreundlichen Betrieb von Traktoren der staatlichen Versuchsbetriebe dar?“ (24 Befragte, davon 13 Fach- und 11 Führungskräfte) 60

Abbildung 21: Einschätzungen von 24 Befragten zu 15 Aspekten der Nutzung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen (Fragebogen in Anhang 1) 62

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Preisbeispiele für den HVO-Kraftstoff C.A.R.E.-Diesel aus Rest- und Abfallstoffen inkl. Energie- und MwSt. sowie CO ₂ -Abgabe (Quelle: eigene Angebotsanfragen und www.spritkostenrechner.de/spritpreise-statistik , Datenbasis: Bundeskartellamt, Markttransparenzstelle für Kraftstoffe) .	31
Tabelle 2:	Allgemein anwendbare Anforderungen und Prüfverfahren der DIN 15940 [26]	32
Tabelle 3:	Ausgewählte Informationen aus den Sicherheitsdatenblättern von HVO verschiedener Hersteller [68] [30] [69].....	47
Tabelle 4:	Technische Daten der mit HVO betriebenen Maschinen	49
Tabelle 5:	Verschleißmetalle im Motorenöl beim Betrieb verschiedener Maschinen mit HVO.....	53
Tabelle 6:	Eigenschaften des verwendeten C.A.R.E.-Diesels aus Rest- und Abfallstoffen (HVO gemäß DIN EN 15940) verschiedener Chargen (Werte in Fettdruck kennzeichnen eine Grenzwertüberschreitung)	55
Tabelle 7:	Bewertung von Antriebssystemen und Energieträgern für die Nutzung in landwirtschaftlichen Maschinen [63].....	66
Tabelle 8:	Stärken-Schwächen-Analyse zum Einsatz unvermischten HVO-Kraftstoffs in den Maschinen der bayerischen Staatsbetriebe	68

1 Einleitung und Problemstellung

Das Bayerische Klimaschutzprogramm nennt fünf Aktionsfelder und zahlreiche Einzelmaßnahmen, um das Ziel einer klimaneutralen Staatsverwaltung bis 2028 zu erreichen. Eine Maßnahme im Aktionsfeld 1 „Erneuerbare Energien und Stromversorgung“ ist die energetische Umstellung der land- und forstwirtschaftlichen Maschinen der Staatsverwaltung. Wörtlich heißt es: „Die Kraftfahrzeuge in der land- und forstwirtschaftlichen Staatsverwaltung sind auf die Verwendung von regenerativen Energieträgern, wie z. B. Pflanzenöl und Biodiesel, CNG oder Strom umzustellen.“ Dies betrifft alle Resorts mit entsprechenden Fuhrparks. In der Landwirtschaftsverwaltung sind das primär die Bayerischen Staatsgüter (BaySG), die Bayerischen Staatsforsten (BaySF), die Bayerischen Landesanstalten für Landwirtschaft (LfL), für Wald und Forstwirtschaft (LWF), für Weinbau und Gartenbau (LWG) sowie das Technologie- und Förderzentrum (TFZ). Die Umsetzung erfolgt bis zum Jahr 2025. Als weitere Einzelmaßnahme ist auch die energetische Umstellung der Maschinen der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Betriebe der Justizvollzugsanstalten (JVA) genannt. Der Umsetzungszeitraum für Letztere endet im Jahr 2029. Im vorliegenden Bericht werden alle land- und forstwirtschaftlichen Betriebe der Staatsverwaltung kurz als Staatsbetriebe bezeichnet.

Das Marktangebot an Traktoren, die mit erneuerbaren Energieträgern angetrieben werden können, ist gering. Auch Nachrüstsysteme für Bestandsmaschinen sind kaum verfügbar. Dennoch sind schnell umsetzbare nachhaltige Lösungen gefordert, um die bayerischen Klimaziele zu erfüllen. Die klimaneutrale Bewirtschaftung der Staatsbetriebe bis 2028 kann also nur durch die zügige Umstellung der Fahrzeuge und Maschinen auf erneuerbare Kraftstoffe gelingen, die auch in der Bestandsflotte eingesetzt werden können. Dazu sind umfassende Kenntnisse über die technischen Voraussetzungen sowie die Vor- und Nachteile dieser Kraftstoffoptionen erforderlich.

Hydriertes Pflanzenöl (HVO, Hydrotreated oder Hydrogenated Vegetable Oil oder HEFA, Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) zählt zu den paraffinischen Dieselmotorkraftstoffen gemäß der Norm DIN EN 15940 [26]. Es wird in mehreren europäischen Ländern (z. B. Finnland, Schweden, Niederlande) an öffentlichen Tankstellen in Reinform angeboten und insbesondere in schweren Nutzfahrzeugen eingesetzt. In Deutschland erfolgt der Vertrieb als Beimischung zu fossilem Diesel oder in Reinform zur Nutzung in Eigenverbrauchstankstellen, da paraffinischer Dieselmotorkraftstoff nicht in der 10. BImSchV [22] gelistet ist und damit nicht an öffentlichen Tankstellen abgegeben werden darf. Es ist jedoch geplant, diese Einschränkung künftig aufzuheben. Paraffinischer Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 15940 ist für einen Großteil der neuen Dieseltraktoren von den Herstellern freigegeben. Ob sich HVO auch für ältere Dieseltraktoren ohne Herstellerfreigaben eignet, ist weitgehend unklar.

Des Weiteren ist nicht genau bekannt, welche Bestandsmaschinen im Fuhrpark der Staatsbetriebe (Hersteller, Typ, Abgasstufe etc.) bereits Herstellerfreigaben für HVO besitzen und welche ggf. auch ohne Freigaben dafür geeignet sein könnten. Ebenso können keine detaillierten Aussagen zur technischen Zuverlässigkeit oder zum Leistungs- und Abgasverhalten von Landmaschinen im Betrieb mit HVO getroffen werden. Kenntnislücken

bestehen unter anderem hinsichtlich der Materialverträglichkeit mit kraftstoffführenden Komponenten und dahingehend, ob z. B. eine Kennfeldanpassung notwendig ist oder auch Additive zur Verbesserung der Schmierfähigkeit eingesetzt werden müssen. Darüber hinaus ist fraglich, welche Folgen eine Umstellung von Diesel auf HVO für den Betreiber mit sich bringt: Bleibt beispielsweise die Betriebserlaubnis weiter bestehen? Was muss bei der Lagerung von HVO in einer Eigenverbrauchstankstelle beachtet werden? Von Bedeutung wären auch Kenntnisse zur Akzeptanz dieses Kraftstoffs bei den Staatsbetrieben. Es stellt sich zusammenfassend die Frage, ob HVO ein Teil der Lösung zum Erreichen der bayerischen Klimaschutzziele sein kann.

2 Zielstellung

Das Hauptziel des Vorhabens „ParaDies2025“ besteht in der Untersuchung, ob das zu den paraffinischen Dieseldieselkraftstoffen (DIN EN 15940) zählende HVO (hydriertes Pflanzenöl) auf Basis von Rest- und Abfallstoffen für die bestehenden Fuhrparks der bayerischen Staatsbetriebe eine kurzfristig bis zum Jahr 2025 umsetzbare Alternative zu fossilem Dieseldieselkraftstoff darstellen kann. So könnten Treibhausgase (THG) eingespart und der Weg der Bayerischen Staatsregierung hin zu einer klimaneutralen Verwaltung unterstützt werden. Die erzielten Erkenntnisse sollen auch für nicht staatliche landwirtschaftliche Betriebe und private Unternehmen als Entscheidungshilfe bei der Einführung von Klimaschutzmaßnahmen im Zusammenhang mit der Nutzung von Kraftstoffen dienen.

Teilziel 1: Zunächst soll der Stand des Wissens zur Herstellung und zum Einsatz von HVO in Dieseldieselmotoren dargelegt werden. Dabei sollen insbesondere die Kompatibilität des Kraftstoffs mit gängigen Motorsystemen sowie das Leistungs- und Abgasverhalten von Landmaschinen betrachtet werden. Um beurteilen zu können, ob die Erzeugung von HVO auch regional erfolgen kann, sollen die Optionen einer dezentralen Herstellung von HVO aufgezeigt werden.

Teilziel 2: Des Weiteren sollen die wichtigsten Eigenschaften von HVO für den Einsatz als Kraftstoff aus Literaturangaben und durch ergänzende Laboranalysen ermittelt werden. Dabei sollen sowohl physikalisch-chemische als auch umweltrelevante Eigenschaften, wie z. B. die Energie- und Treibhausgasbilanz, betrachtet werden.

Teilziel 3: Hierbei sollen die Rahmenbedingungen, insbesondere einschlägige Regularien für die Handhabung und Nutzung von HVO sowie der Stand bei den Freigaben durch die Motor- und Landmaschinenhersteller geprüft und zusammengestellt werden.

Teilziel 4: Das vierte Teilziel umfasst einen Praxistest, bei dem mindestens zwei Dieseldiesel-Traktoren (ohne Hersteller-Freigabe für HVO) von Dieseldiesel auf HVO umgestellt und im Alltagsbetrieb wissenschaftlich begleitet werden sollen. Dabei soll auch eine Eigenverbrauchs-Tankstelle für HVO eingerichtet und die Anforderungen einer sicheren Lagerung berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse aus dem Praxistest sollen dokumentiert und im Fall von Störungen deren Ursachen ergründet werden.

Teilziel 5: Es soll ein Meinungsbild erhoben werden, um abschätzen zu können, wie groß die Akzeptanz für den Einsatz palmölfreien und nachhaltigkeitszertifizierten HVO im Ressort ist. Das Meinungsbild kann dabei helfen, im Falle eines anzustrebenden, verstärkten Einsatzes von HVO auf den Staatsbetrieben eine geeignete Kommunikationsstrategie zu finden.

Teilziel 6: Das sechste Teilziel umfasst die Analyse und Bewertung der Vor- und Nachteile einer breiten und schnellen Einführung von HVO auf den Staatsgütern und Betrieben der JVA. Schließlich sollen auch Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Dabei sollen die technische Eignung, das Potenzial, die Umweltwirkungen, die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz des Kraftstoffs berücksichtigt werden.

3 Vorgehen

Für das Vorhaben „ParaDies2025“ wurden Recherchen in verschiedenen Literaturlieferantenbanken durchgeführt sowie relevante Publikationen beschafft und ausgewertet. Daneben wurden die wichtigsten einschlägigen Normen und Regularien gesichtet. Durch Anfragen und Expertengespräche wurden weitere relevante Informationen ermittelt.

In einem Praxisversuch wurden mehrere mit HVO betriebene Traktoren der Bayerischen Staatsgüter (BaySG) im praktischen Einsatz begleitet. Dabei wurden die Einsatzdaten sowie die Betriebserfahrungen dokumentiert und ausgewertet. Auch fanden persönliche und telefonische Interviews mit Fahrern und Verantwortlichen statt. Die Qualität von Kraftstoff und Motoröl wurde ermittelt sowie Bauteile begutachtet. Schließlich wurden Ergebnisse aus Leistungs- und Abgasmessungen, die am Traktorenprüfstand des TFZ und im realen Betrieb mit HVO-Kraftstoff im Rahmen des Forschungsprojekts „Klimaschutz mit regenerativen Antriebssystemen auf staatlichen Versuchsgütern“ („KlimaTrak“), gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Förderkennzeichen: G2/KS/18/01) [25], KlimaTrak) erarbeitet worden waren, zusammengetragen.

Für die Einholung eines Meinungsbilds wurde ein Fragebogen zum Einsatz von palmölfreiem HVO auf den Versuchsgütern erarbeitet und telefonische Interviews mit 24 Mitarbeitern der Staatsbetriebe und des StMELF geführt. Die Auswertung erfolgte anonymisiert.

Alle Erkenntnisse aus diesem Vorhaben hinsichtlich möglicher Vor- und Nachteile beim Einsatz von HVO in landwirtschaftlichen Maschinen auf den Versuchsgütern flossen in eine abschließende Bewertung ein.

4 Stand des Wissens

Die Produktion von hydriertem Pflanzenöl (HVO, engl. Hydrotreated oder Hydrogenated Vegetable Oil) oder HEFA (engl. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) erfolgt in industriellen Stand-alone-Anlagen oder durch Mitverarbeitung fett- und ölhaltiger Stoffe in Erdölraffinerien. Letzteres wird auch als CO-Processing bezeichnet. Hierbei entsteht als Produkt eine Mischung aus fossilem Diesel und HVO bzw. HEFA. Im nachfolgenden Bericht werden die Bezeichnungen HVO und HEFA synonym verwendet. Ausführliche Verfahrensbeschreibungen für die Herstellung von HVO sowohl in Stand-alone-Anlagen als auch durch Mitraffination in Mineralölraffinerien liefern beispielsweise KALTSCHMITT et al. (2016) [43] und SCHRÖDER et al. (2022) [64].

4.1 Herstellung des paraffinischen Kraftstoffs HVO

HVO wird durch eine katalytische Reaktion von pflanzlichen oder tierischen Ölen und Fetten mit Wasserstoff (Hydrierung) sowie anschließendes Cracken und Isomerisieren hergestellt. Aus dem entstehenden Kraftstoffgemisch werden verschiedene Kraftstofffraktionen abdestilliert. Als Ausgangsstoffe können Pflanzenöle, Algenöl, Rest- und Abfallstoffe, wie Altspeiseöle und Schlachtabfälle, sowie Biocrudes, wie z. B. Pyrolyseöl verwendet werden [64]. Abbildung 1 veranschaulicht schematisch die Produktion von HVO.

Bei der Produktion von HVO werden die Triglyceride und freien Fettsäuren nach einer Vorbehandlung zur Entfernung von Störstoffen hydriert. Dabei werden mithilfe des zugegebenen Wasserstoffs die Ester- und Doppelbindungen gesättigt und der Sauerstoff durch die Bildung von Wasser abgetrennt (Hydrodeoxygenierung, HDO). Befinden sich weitere Atome, wie z. B. Schwefel im Öl, werden diese ebenfalls abgetrennt (Hydrodesulfurierung, HDS). Metallische Katalysatoren sowie die Rohstoff- und Prozessparameter, wie z. B. Temperatur und Druck, steuern die Reaktionen. Nach der Hydrierung erfolgen Isomerisierung und Cracken der langen Kohlenwasserstoffketten. Bei der Isomerisierung werden langkettige unverzweigte Paraffine in verzweigte Isomere umgewandelt, primär um die Kälteeigenschaften zu verbessern. Das gleichzeitig stattfindende Cracken führt zu kürzeren Kohlenwasserstoffketten, um sie den Kettenlängen herkömmlicher Kraftstoffe anzupassen. Dabei entsteht eine Bandbreite an Kraftstofffraktionen, darunter Naphtha, Kerosin (SPK) und Diesel [43] [64]. Mittels Destillation in Kolonnen werden die Fraktionen voneinander getrennt. Die Anteile der einzelnen Produktgruppen können durch die eingestellten Prozessbedingungen in gewissen Grenzen variiert werden. Als Nebenprodukte entstehen vor allem Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sowie kurzkettige Kohlenwasserstoffe, die entweder zur Energiegewinnung im Prozess genutzt, wieder aufbereitet oder abgetrennt werden [64].

In Abhängigkeit von Ausgangsstoff und Prozessführung liegt der stöchiometrische Wasserstoffbedarf für die Hydrierung bezogen auf die Masse bei ca. 2 bis 3 % [64]. Für Ausgangsstoffe mit gesättigten Fettsäuren wird weniger Wasserstoff benötigt als für solche mit mehr ungesättigten Fettsäuren.

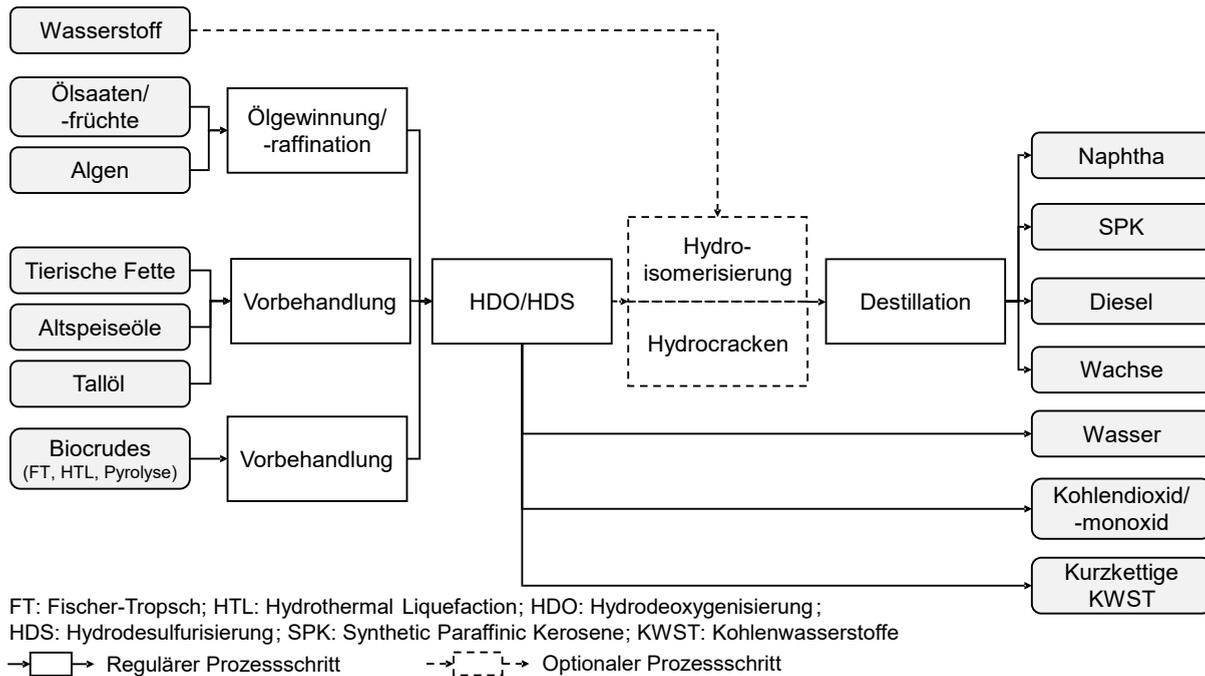


Abbildung 1: Flussschema der Produktion von HVO (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022) [64])

HVO kann in Stand-alone-Anlagen oder zusammen mit Erdölprodukten in bestehenden Raffinerien produziert werden. Beide Produktionswege sind Stand der Technik und werden kommerziell beschriftet. Da der Prozess chemisch und verfahrenstechnisch angelehnt ist an das Hydrotreatment/Hydrocracken fossiler Edukte, können Standorte zur Herstellung fossiler Kraft- und Brennstoffe mit wenig Aufwand umgerüstet und genutzt werden. Die eingesetzte Technologie ist im Vergleich zum Fischer-Tropsch-Verfahren weniger komplex und die Investitionskosten für die Anlagen sind geringer. Von weit größerer Bedeutung für die Höhe der Kraftstoffkosten sind die Kosten für die eingesetzten Rohstoffe, die 80 bis 90 % der Gestehungskosten ausmachen können [51] [64].

Bis zum Jahr 2022 wurde zu einem großen Anteil Palmöl als Rohstoff verwendet. Palmöl ist kostengünstig und weist von Natur aus einen hohen Sättigungsgrad auf, wodurch weniger Wasserstoff für die Hydrierung benötigt wird als bei stärker ungesättigten Ölen. Seit dem Jahr 2023 wird Palmöl als Ausgangsstoff für HVO und andere Kraftstoffe in Deutschland und weiteren EU-Staaten kaum mehr eingesetzt, da HVO aus Palmöl keine Erfüllungsoption mehr für die THG-Quote darstellt (Unterkapitel 4.4).

Die Herstellung von HVO findet derzeit ausschließlich in industriellen Großanlagen statt. Der Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Level, TRL) wird mit 9 bis 11 angegeben. Die Einteilung in TRL erfolgt nach dem Technologie-Entwicklungsstadium in Forschung (TRL 1–4), Demonstration (TRL 5–8) und Kommerzialisierung (TRL 9–11) [64]. Mit Ausnahme weniger Anlagen in Skandinavien, die ausschließlich Tallöl verarbeiten, werden meist Multi-Feedstock-Anlagen betrieben, in der ein großes Spektrum unterschiedlicher Rohstoffe eingesetzt werden können [64].

Mehrere Firmen haben Verfahren zur Herstellung von HVO entwickelt. Die bekanntesten sind Neste Oyj (Finnland), Conoco Phillips (USA, Irland), Syntroleum (USA), Universal Oil Products (UOP)-Eni (Vereinigtes Königreich, Italien), Nippon Oil (Japan) and SK energy (Korea) [59].

Dezentrale Herstellung

Kommerzielle Anlagen zur dezentralen Herstellung von HVO sind derzeit nicht bekannt. Lediglich die Ausgangsstoffe dafür können in kleineren Anlagen bereitgestellt werden. So ist die dezentrale Gewinnung von Pflanzenölen in Ölmühlen seit vielen Jahren Stand der Technik [62] [43]. Auch Wasserstoff kann in Elektrolyseuren dezentral mit z. B. Überschussstrom aus erneuerbaren Energieanlagen erzeugt und über längere Zeit gespeichert werden. C.A.R.M.E.N. e. V. erstellt regelmäßig eine Marktübersicht von Anbietern und den wichtigsten Eigenschaften von Elektrolyseursystemen. Zum Stand März 2023 umfasst die Marktübersicht 68 Produkte unterschiedlicher Leistung von insgesamt 16 Herstellern [9].

Im Forschungs- und Demonstrationsmaßstab befinden sich mehrere Vorhaben, bei denen aus Biomasse durch verschiedene Konversionsverfahren, darunter auch Hydrierungsreaktionen, synthetische Kraftstoffe dezentral hergestellt werden sollen. Dabei handelt es sich aber nicht um klassische HVO-Kraftstoffe. Ob mit diesen Verfahren kleinere Anlagengrößen wirtschaftlich realisierbar sind, ist noch unklar.

Beispielsweise arbeitet Fraunhofer UMSICHT am sogenannten TCR[®]-Verfahren, mit dem aus Abfall-Biomasse mit thermokatalytischem Reforming und weiteren Prozessstufen dezentral Kraftstoff erzeugt werden kann [35].

Im Rahmen eines Forschungsprojekts an der HAW Hamburg ist geplant, auf Basis eines neuen thermochemischen Verfahrens in einem zweistufigen Prozess (READi[™]) eine Prototypanlage mit einer Produktionskapazität von 2 t Kraftstoff pro Woche zu realisieren [65].

Letztlich bleibt festzuhalten, dass derzeit keine Anlagen zur dezentralen Produktion von HVO verfügbar sind.

4.2 Marktübersicht

HVO wird bereits weltweit in Großanlagen hergestellt und die Produktionskapazitäten werden weiter ausgebaut. Mangels Akzeptanz von Palmöl als Rohstoff werden zukünftig wohl vermehrt Abfall- und Reststoffe eingesetzt werden. Trotz des begrenzten Rohstoffpotenzials von Abfall- und Reststoffen und der meist höheren Kosten im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff wird HVO sowohl unvermischt als auch als Beimischungskomponente zu fossilen Kraftstoffen als aussichtsreiche erneuerbare Kraftstoffoption angesehen. HVO eignet sich insbesondere für die Bestandsflotte, für klimafreundliche Antriebe in der Luftfahrt (Kerosinersatz) sowie für weitere nur schwierig elektrifizierbare Anwendungen, wie mobile Maschinen und Geräte hoher Leistung.

4.2.1 Produktionsmengen und Absatz

Welt und Europa

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der weltweiten Produktion von Biokraftstoffen, angegeben in Exajoule (EJ). Ein Exajoule entspricht 1.000 Petajoule (PJ) oder 10^{18} Joule (J). Aus der Grafik wird anhand des obersten blauen Säulensegments ersichtlich, dass hydrierte Pflanzenöle in den letzten zehn Jahren kontinuierlich an Bedeutung gewonnen haben. Bis zum Jahr 2019 stieg die Menge auf etwa 6 Mio. t/a (0,3 EJ/a) weltweit an. Lediglich 2020 blieb die Produktionsmenge aufgrund der COVID-19-Pandemie annähernd konstant, wohingegen im Jahr 2021 bereits wieder ein Anstieg der produzierten Menge auf den bisherigen Höchststand zu verzeichnen ist. Rund die Hälfte des HVO kam aus Produktionsanlagen in Europa [64]. Im Vergleich zu Bioethanol und Fettsäuremethylester (FAME) spielt HVO jedoch eine untergeordnete Rolle.

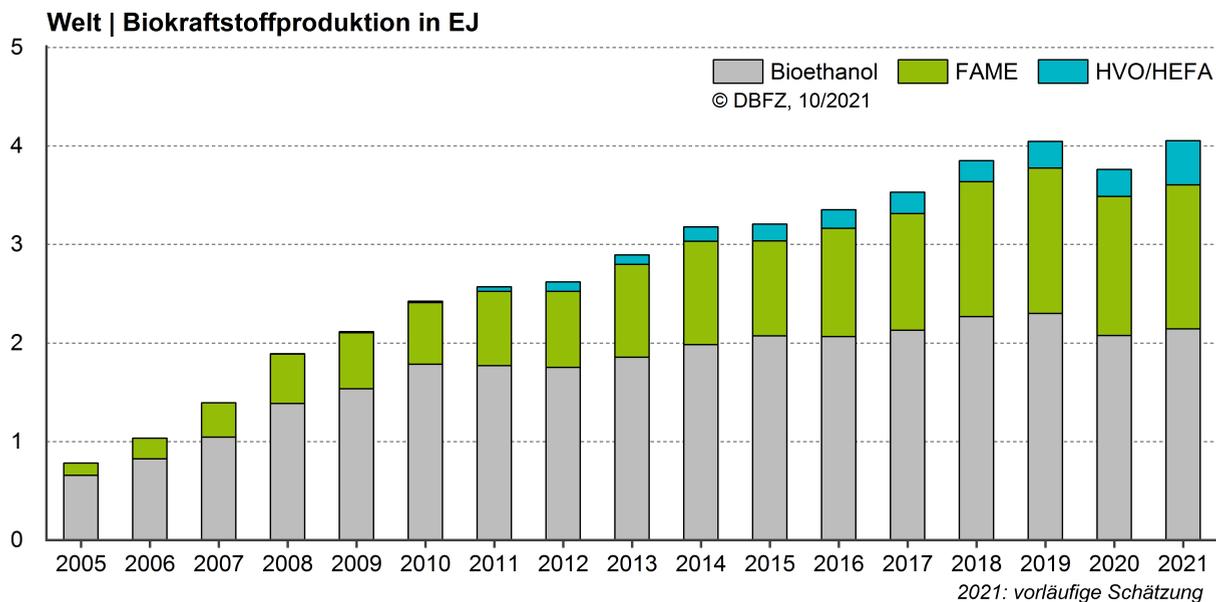


Abbildung 2: Entwicklung der weltweiten Biokraftstoffproduktion in Exajoule (EJ)
(Quelle: SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: F.O. Licht, IHS Markit [64])

Die Produktionskapazität der weltweit 29 Anlagen, die derzeit in Betrieb sind, liegt bei jährlich 8 Mio. t HVO. Weitere rund 6 Mio. t/a sollen durch Kapazitätserweiterungen in zehn bestehenden Anlagen hinzukommen. Zusätzlich befinden sich Anlagen mit 14,7 Mio. t/a in der Planungsphase [64]. Abbildung 3 zeigt die Produktionskapazitäten in bestehenden und geplanten Anlagen weltweit und in Europa.

In Europa waren im Jahr 2021 insgesamt 14 großtechnische HVO-Produktionsanlagen mit einer Kapazität von 4,8 Mio. t/a in Betrieb [64]. Hierunter fallen sowohl eigens dafür errichtete HVO-Anlagen als auch bestehende Erdölraffinerien. Die in Europa vorhandene Anlagenkapazität von fast 5 Mio. t/a entspricht etwa der Hälfte des im Jahr 2019 in Deutschland getankten Flugkraftstoffs Kerosin mit einer Menge von rund 10 Mio. t/a [8].

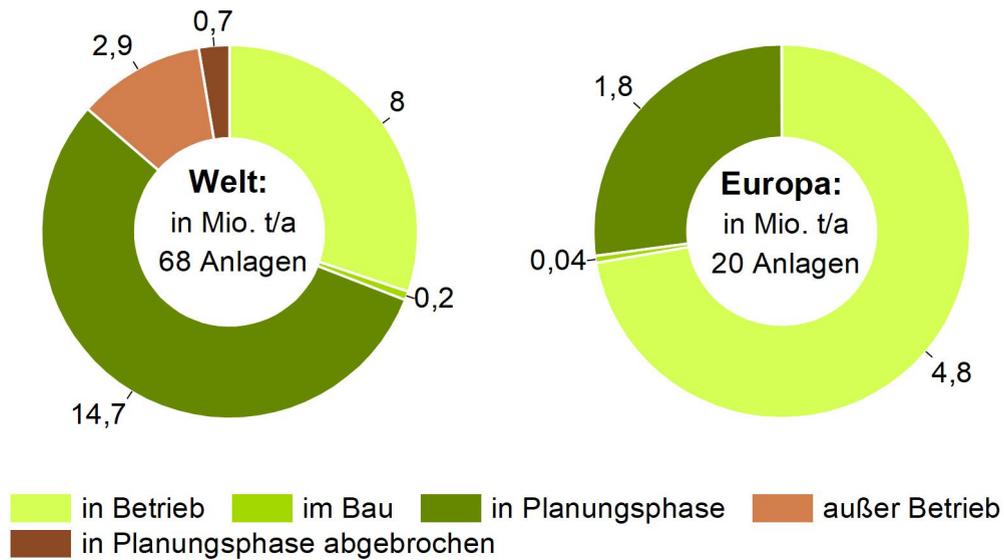


Abbildung 3: Weltweite und europäische Produktionskapazitäten von HVO-Diesel in bestehenden und geplanten Anlagen 2021 (ohne Berücksichtigung geplanter Kapazitätserweiterungen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: IHS Markit [64])

Der weltweite Marktführer für HVO-Kraftstoff ist das finnische Unternehmen Neste Oyj oder kurz Neste, das nach dem firmeneigenen NEXBTL-Verfahren produziert. Nach eigenen Angaben produziert Neste weltweit fast 3 Mio. t/a HVO-Kraftstoff, davon rund 2 Mio. t/a in Europa an den Standorten Parvoo (Finnland, Abbildung 4) und Rotterdam (Niederlande). Durch Ausbau der Anlage in Singapur und Anlagenoptimierungen soll im Jahr 2023 die weltweite Kapazität etwa 4,5 Mio. t/a betragen. Als Produkte werden vorwiegend HVO-Diesel („Neste MY Renewable Diesel™“) und Flugkraftstoff („Neste MY Sustainable Aviation Fuel™“) sowie Rohstoffe für Kunststoffe und Chemikalien („Neste RE™“) vermarktet [54] [52].

In Europa produzieren neben Neste unter anderem die italienische ENI-Gruppe in Marghera (Venedig) mit 350.000 t/a und Gela auf Sizilien mit 750.000 t/a HVO-Diesel. Total betreibt eine Raffinerie in La Mede bei Marseille mit einer Kapazität von 650.000 t/a HVO. Hinzu kommen weitere Mineralölkonzerne, wie das spanische Unternehmen Repsol, die HVO vor allem durch Co-Processing in bestehenden Erdölraffinerien produzieren.

In Deutschland existiert keine Produktionsanlage für HVO im industriellen Maßstab.



Abbildung 4: Neste's Porvoo refinery in Finland, NEXBTL facilities, Neste (Bild: Neste Oyj, www.neste.com)

Deutschland

Die politischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen in Europa und Deutschland zum Erreichen der Klimaschutzziele beeinflussen die Marktentwicklung und die Wettbewerbsfähigkeit erneuerbarer Energien im Verkehrssektor entscheidend. Von besonderer Bedeutung auf nationaler Ebene sind das Klimaschutzgesetz, das verbindliche Sektorziele für Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) vorgibt, das Brennstoffemissionshandelsgesetz, das den Handel und die Bepreisung der Emissionen von Brennstoffen regelt, das Bundes-Immissionsschutzgesetz mit den einschlägigen Durchführungsverordnungen, in denen die THG-Minderungsquoten geregelt sind, sowie das Energiesteuergesetz, das die Besteuerung und Steuerbegünstigung von Kraftstoffen festlegt.

Die Anhebung der THG-Minderungsquote in Deutschland von 4 % im Jahr 2019 auf 6 % im Jahr 2020 führte zu einem sprunghaften Anstieg der eingesetzten Biokraftstoffmenge auf das Niveau des bisherigen Höchststands im Jahr 2007 (Abbildung 5). Aufgrund der seither fortgeschriebenen Gesetzgebung haben sich jedoch die Rohstoffbasis, deren Herkunft, die Art der Biokraftstoffe sowie deren Absatzstruktur entscheidend geändert: So sind die ehemals dominierenden Reinkraftstoffe Rapsölkraftstoff (PÖ100) und FAME (B100) im Jahr 2020 vom Markt nahezu verschwunden. Stattdessen werden jetzt FAME und HVO fast ausschließlich dem Dieselkraftstoff (B7) beigemischt.

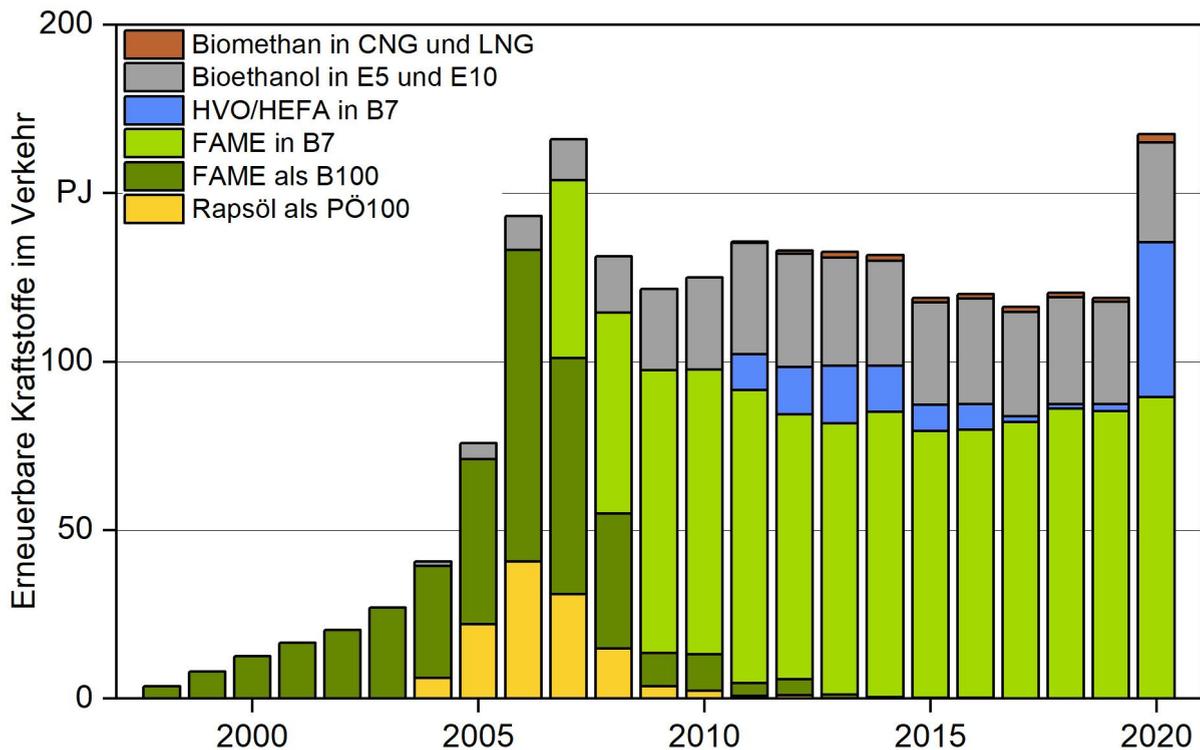


Abbildung 5: Entwicklung der Biokraftstoffnutzung in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung nach SCHRÖDER et al. (2022), Datenbasis: Eurostat, BLE [64])

Der sprunghafte Anstieg der Biokraftstoffmengen von 2019 auf 2020 ist in erster Linie auf den zusätzlich eingesetzten HVO-Kraftstoff zurückzuführen. In dieser Zeit hat sich die Menge an HVO-Kraftstoff aus Stand-alone-Anlagen, für den eine Quotenanrechnung beantragt wurde, von 1,8 PJ im Jahr 2019 auf 43,9 PJ (entspricht ca. 1 Mio. t) im Jahr 2020 mehr als verzwanzigfach. Die gesamte Menge an HVO-Diesel wurde importiert [64] [7]. Hinzu kommen noch 2,1 PJ CP-HVO, das im Co-Processing-Verfahren hergestellt wurde (Unterkapitel 4.1).

Wie oben erwähnt liegt die Ursache für den außergewöhnlich hohen Anteil an Biokraftstoffen in den Besonderheiten des Quotenjahrs 2020, in dem die Quotenverpflichtung von 4 auf 6 % angehoben wurde und kein THG-Quotenhandel möglich war. Die Begrenzung der Anrechenbarkeit des Anteils an Biokraftstoffen aus Palmöl auf max. 0,9 % im Jahr 2022 und der gänzliche Ausschluss von Palmöl als quotenfähigem Biokraftstoff seit dem Jahr 2023 haben zu einem deutlichen Rückgang an palmölbasierten Kraftstoffen in Deutschland geführt.

4.2.2 Rohstoffe

Die enorme Absatzsteigerung von HVO-Kraftstoff im Jahr 2020 führte auch zu einem starken Anstieg des Verbrauchs an Ausgangsstoffen, insbesondere von Palmöl sowie von Abfällen und Reststoffen. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, entfallen nach Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung energetisch mehr als drei Viertel der Ausgangsstoffe für HVO auf Palmöl und knapp ein Viertel auf Abfälle und Reststoffe [7].

Die wichtigsten Abfall- und Reststoffe, die das finnische Unternehmen Neste Oyi nach eigenen Angaben zur Herstellung von HVO verwendet, sind unter anderem: Used Cooking Oil (Altspeiseöl) aus der Lebensmittelindustrie, von Restaurants und Haushalten, Abfallfette tierischer Herkunft, die nicht für den menschlichen Verzehr geeignet sind, sowie Rest- und Abfallstoffe aus der Pflanzenölgewinnung, insbesondere Palm Fatty Acid Distillate (PFAD), ein Rückstand der Raffination von Palmöl für den Speiseölmarkt, Spent Bleaching Earth Oil (SBEO), rückgewonnenes Öl aus gebrauchten Bleicherden, die zur Raffination verschiedener Pflanzenöle eingesetzt werden, und Palm Effluent Sludge (PES), ein ölhaltiger Rückstand, der aus dem Abwasser von Palmölmühlen gewonnen wird [52].

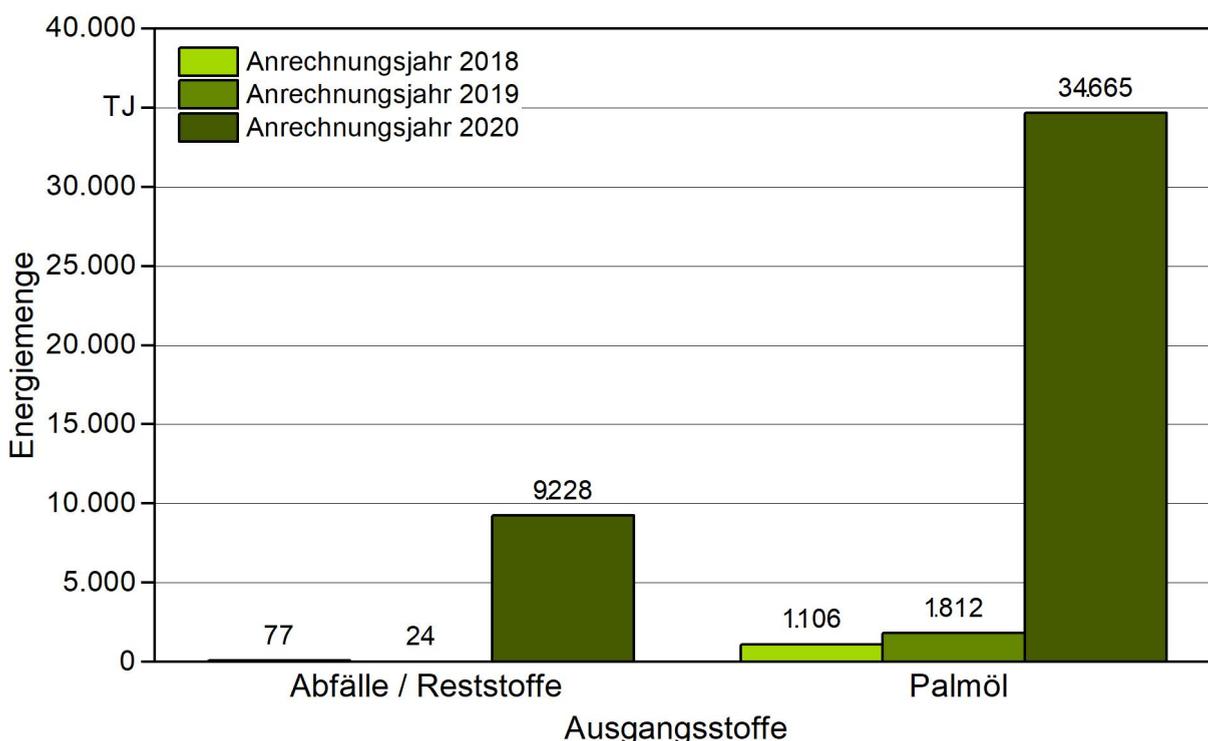


Abbildung 6: Energiemenge der Ausgangsstoffe in Terajoule (TJ) für die Herstellung von HVO-Kraftstoff in den Jahren 2018 bis 2020 [7], 1 TJ = 10^{12} Joule

Abbildung 7 zeigt, dass für HVO-Kraftstoff, der im Jahr 2020 durch Co-Processing erzeugt wurde (CP-HVO), vor allem Palmöl und Sonnenblumenöl als Ausgangsstoffe verwendet wurden. Auch hierbei ist ein enormer Anstieg im Vergleich zum Vorjahr zu vermerken. Allerdings liegt der Anteil an CP-HVO an der gesamten Menge HVO bei unter 5 %. Abfälle und Reststoffe sowie Raps als Ausgangsstoffe hatten nahezu keine Bedeutung für das Co-Processing.

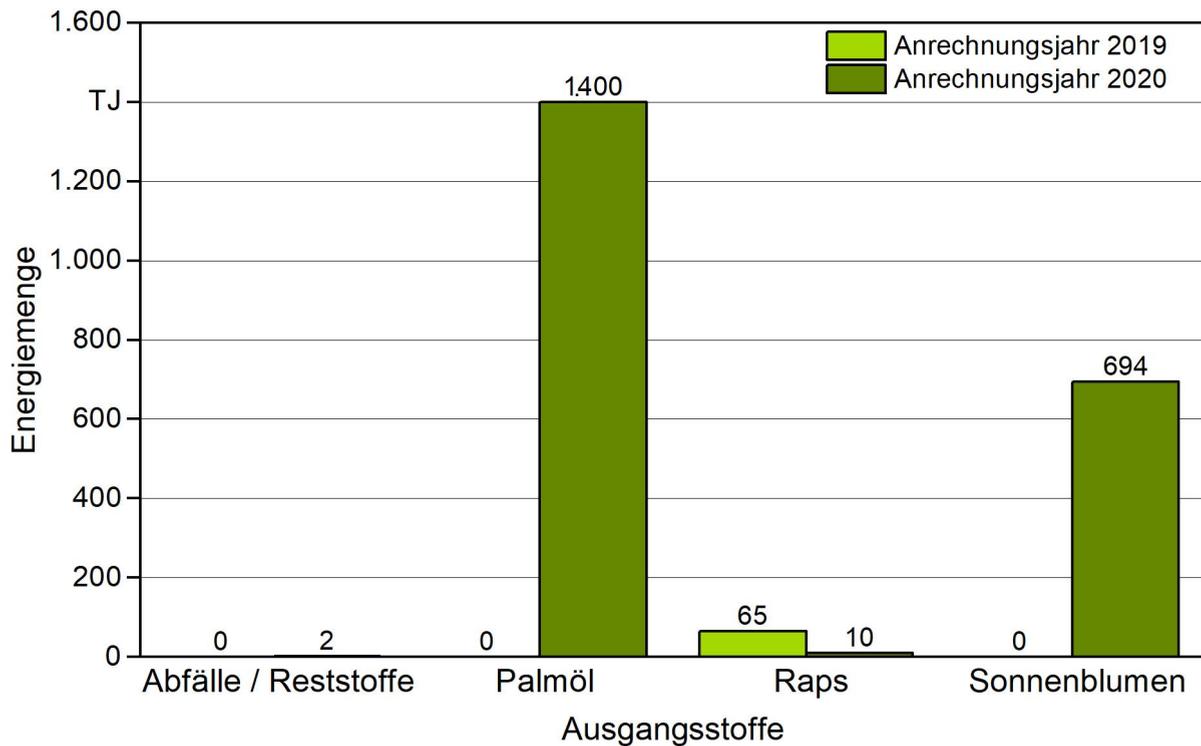


Abbildung 7: Ausgangsstoffe für die Herstellung beim Co-Processing [7]

Abbildung 8 illustriert den Einfluss der gesteigerten Nachfrage an Palmöl und Reststoffen, verursacht durch die Herstellung von HVO und FAME, auf den Import aus Asien. Der Anstieg von Palmöl als Ausgangsstoff von 21,4 PJ auf 53,0 PJ ist nahezu allein auf HVO zurückzuführen. Insgesamt hat sich die Menge der Biokraftstoffe, deren Ausgangsstoffe aus Asien stammen, im Jahr 2020 mehr als verdoppelt. Grund hierfür sind die gestiegenen Biokraftstoffmengen aus Abfällen und Reststoffen um 36 % sowie aus Palmöl um 147 % [7].

Eine detaillierte Aufschlüsselung zu Herkunft, Nachhaltigkeitszertifizierung und Verwendung von Palmöl in Deutschland enthält die Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage „Regenwald im Tank – Palmölimporte nach Deutschland“ aus dem Jahr 2019 [14]. Demnach betrug im Jahr 2017 die Menge an Palmöl für Biokraftstoffe 19.734 TJ. Insgesamt wurden im Jahr 2017 1.124.860 t Palmöl importiert, davon etwa die Hälfte für die energetische Nutzung (581.400 t). 246.500 t Palmöl gingen in den Lebensmittelsektor, 148.250 t wurden als Futtermittel, 118.450 t für Chemie/Pharmazie und 30.260 t für weitere Nutzungen, wie z. B. Kosmetik, verwendet.

Verbindliche Nachhaltigkeitsanforderungen bestehen nur für die energetische Nutzung von Palmöl. Entsprechend sind 100 % des in Deutschland verwendeten Palmöls, aus dem Kraftstoff erzeugt wird, nachhaltigkeitszertifiziert. Für andere Nutzungsarten bestehen keine Beschränkungen für den Palmölimport, wenngleich 2017 rund 85 % des Palmöls für Lebensmittel, 26 % für Futtermittel, 58 % für Kosmetik, 27 % für Chemie und Pharmazie ebenfalls als nachhaltig zertifiziert waren [14].

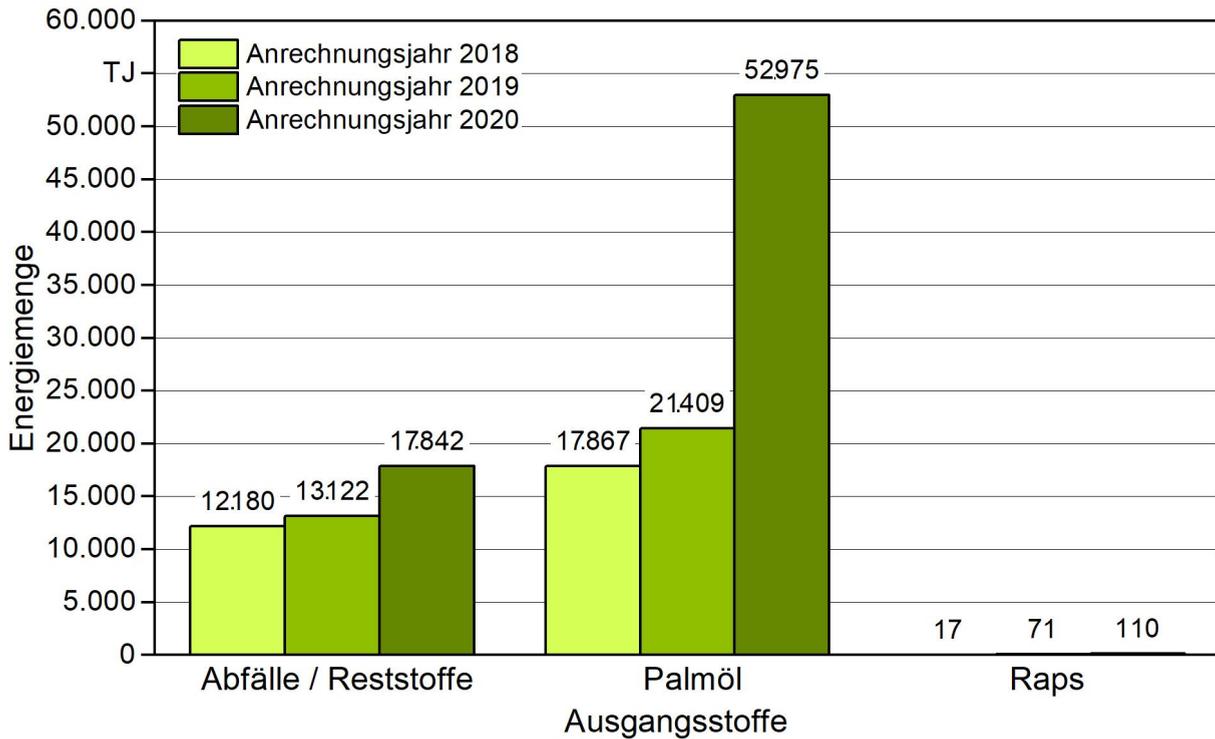


Abbildung 8: Ausgangsstoffe für Biokraftstoffe mit Herkunft Asien [7]

Abbildung 9 stellt nach Datenlage des DBFZ die Ressourcen zur Produktion von HVO und FAME weltweit und in der EU für das Jahr 2020 gegenüber. Zudem werden die Ressourcen zur Nutzung von FAME und HVO in Deutschland dargestellt. Auffallend ist der hohe Anteil an Palmöl in Deutschland für das Jahr 2020, der deutlich über dem weltweiten und europäischen Schnitt liegt. Allerdings sind in Deutschland, wie bereits mehrfach erwähnt, seit dem Jahr 2023 keine Biokraftstoffe aus Palmöl mehr quotenfähig, sodass sich die Ressourcennutzung in den nächsten Jahren deutlich ändern wird.

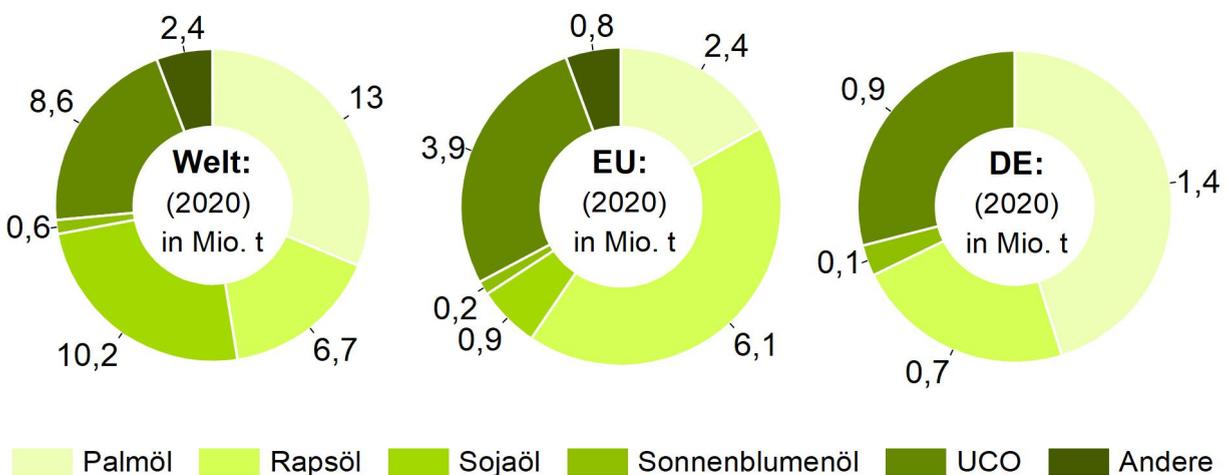


Abbildung 9: Ressourcen zur Nutzung (Deutschland) und Produktion (Europa, weltweit) von FAME und HVO-Diesel [64]

Die wichtigsten Herkunftsländer der Ölpflanzen für HVO und FAME sind Indonesien für Palmöl (20,0 PJ Kraftstoffe) und Deutschland für Raps (13,8 PJ Kraftstoffe). Die biogenen Abfall- und Reststoffe stammen vorwiegend aus China (für 9,5 PJ Kraftstoffe) und Deutschland (für 7,2 PJ Kraftstoffe) [64].

Das einheimische Potenzial an Altfetten ist begrenzt. Mit den HVO-Herstellern konkurrieren die Hersteller konventionellen Biodiesels (FAME) und die Oleochemie um die Rohstoffe. Deshalb wird auch an der Nutzung von Algenöl aus Mikroalgen zur Herstellung von Biodiesel und HVO intensiv geforscht. Die Kultivierung von Mikroalgen ist in industriellen Großanlagen möglich, die Algenzucht erfolgt in Salzwasser. Allerdings ist das Verfahren sehr teuer und energieaufwendig und weist eine schlechte Ökobilanz auf [36].

4.2.3 Vertrieb

HVO-Kraftstoff wird von den Herstellern unter verschiedenen Namen vermarktet. Die Firma Neste beispielsweise nennt den von ihr nach dem NEXBTL-Verfahren erzeugten HVO-Kraftstoff „Neste MY Renewable Diesel™“. Dieser Kraftstoff stammt aus den Raffinerien in Singapur, Rotterdam und Porvoo (Finnland). Die dafür nach eigenen Angaben hauptsächlich eingesetzten Rohstoffe sind tierische Abfallfette, Altspeiseöle sowie Abfall- und Reststoffe aus der Pflanzenölverarbeitung.

Nach Angaben von Neste vom Mai 2021 ist der paraffinische Dieselkraftstoff Neste MY Renewable Diesel gemäß DIN EN 15940 an mehr als 500 Tankstellen in Europa erhältlich. Europäische Länder, in denen HVO als Reinkraftstoff für den Straßenverkehr zugelassen ist, sind Finnland, Schweden, Norwegen, Dänemark, das Vereinigte Königreich, die Niederlande, Belgien, Tschechien, Slowenien, Österreich, Estland, Lettland, Litauen, Spanien und die Schweiz. Frankreich und Italien erlauben den Einsatz in geschlossenen Flotten, wohingegen in Portugal, Polen und Deutschland HVO als Reinkraftstoff nicht an öffentlichen Tankstellen in Verkehr gebracht werden darf. Die meisten Straßentankstellen, an denen HVO-Diesel bezogen werden kann, befinden sich in den Niederlanden, in Schweden und Finnland. Neben Europa wird HVO vor allen Dingen auch in den USA und Kanada als Reinkraftstoff und in Beimischung eingesetzt [54].

Aufgrund der trotz erfolgter Nachhaltigkeitszertifizierung anhaltenden Bedenken hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Palmöl wurden auch bereits vor dem Palmölausstieg im Jahr 2023 HVO-Diesel-Sorten vermarktet, die auf Palmöl als Rohstoff verzichten. Ein Beispiel dafür ist die Marke C.A.R.E Diesel® der Firma ToolFuel Services GmbH. Der Name C.A.R.E. ist ein Akronym und steht für CO₂-Reduction (CO₂-Reduzierung), Arctic Grade (Kältebeständigkeit), Renewable (Erneuerbarkeit) und Emission Reduction (Emissionsreduzierung). Der Kraftstoff wird von mehreren Händlern angeboten. Eine Liste mit Bezugsquellen ist auf der Homepage der Firma ToolFuel abrufbar. Laut Neste kann der Kraftstoff in allen Dieselfahrzeugen ohne Anpassung des Motors eingesetzt werden.

4.2.4 Preis

In Abbildung 10 sind die Gestehungskosten für HVO aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen auf Basis verschiedener Studiendaten angegeben [64]. Die Gestehungskosten werden inflationsbereinigt für das Jahr 2020 dargestellt.

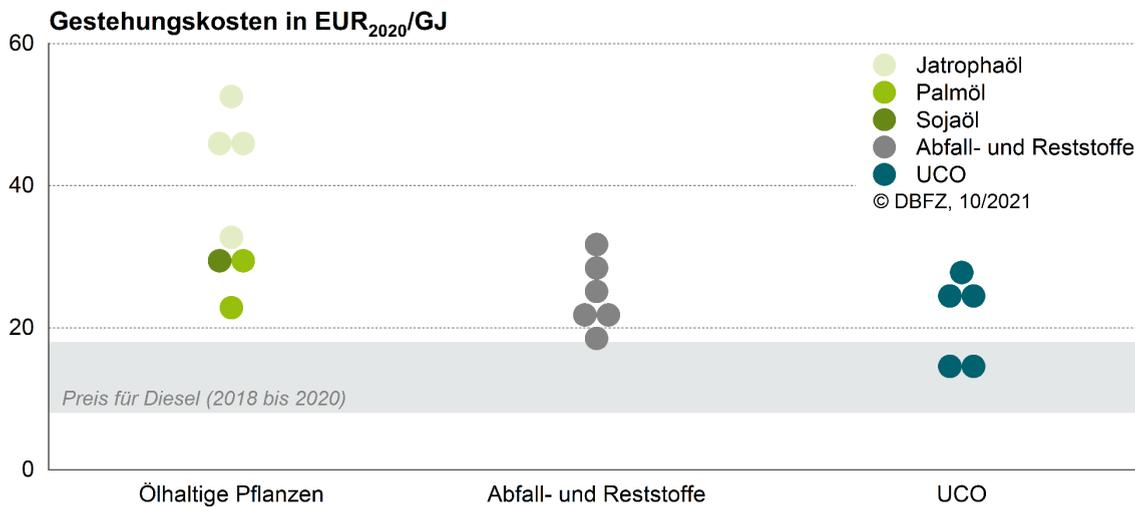


Abbildung 10: Gestehungskosten etablierter Konversionspfade für HVO aufgeteilt nach Rohstoffen (Quelle: SCHRÖDER et al. (2022) [64])

Während die Gestehungskosten für HVO aus gebrauchtem Speiseöl (UCO = Used Cooking Oil) sowie aus Abfall- und Reststoffen zumindest in den günstigsten Fällen im Bereich von Dieseldieselkraftstoff liegen, sind die Gestehungskosten für HVO aus ölhaltigen Pflanzen meist etwas höher. Bei einem Energiegehalt von 34 MJ/l HVO-Diesel betragen die Gestehungskosten für einen Liter HVO-Diesel ca. 0,50 bis 1,00 € ohne Berücksichtigung von Jatrophaöl als Ausgangsstoff. Der zum Vergleich angegebene Dieselpreis versteht sich ohne Energie- und Mehrwertsteuer. Die Preisspanne umfasst einen Bereich von ca. 0,32 bis 0,65 €/l.

Laut Tabelle 1 schwanken die Preise für den HVO-Kraftstoff C.A.R.E.-Diesel je nach Anbieter, Gebindegröße und Angebotsdatum zwischen 1,46 und 2,83 €/l (inkl. Energie- und MwSt. sowie CO₂-Abgabe) und liegen somit immer über den jeweils aktuellen Tankstellen-Dieselpreisen. Bei Anbieter B betragen die Preisdifferenzen bei den drei Angeboten 0,08 bis 0,50 €/l. Gemäß Auskunft der Firma ToolFuel im Januar 2022 liegt der Preis von C.A.R.E.-Diesel als Faustzahl im Durchschnitt rund 0,25 €/l höher als der von Dieseldieselkraftstoff [6].

Bei den Preisen von HVO ist zu berücksichtigen, dass dessen Inverkehrbringer beim THG-Quotenhandel Erlöse für die verkaufte Menge nachhaltigkeitszertifizierten HVO erzielen können, die sie an die Kunden in Form günstigerer Preise weitergeben können. Auch kann bei einer größeren Menge HVO-Kraftstoff, der lose im Tankwagen angeliefert wird, ein günstigerer Verkaufspreis angeboten werden.

Es wird erwartet, dass zukünftig – wegen der gemäß Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) jährlich ansteigenden CO₂-Bepreisung (entspricht insgesamt ca. 0,07 €/l im Jahr 2021 bis ca. 0,17 €/l im Jahr 2026) – die Kostendifferenz zu Dieselkraftstoff tendenziell abnimmt. Andererseits kann es, bei steigender Nachfrage nach HVO und wenn keine Erlöse durch den Quotenhandel erzielt werden können, auch zu einem Anstieg der Kostendifferenz zwischen HVO und Diesel kommen.

Tabelle 1: Preisbeispiele für den HVO-Kraftstoff C.A.R.E.-Diesel aus Rest- und Abfallstoffen inkl. Energie- und MwSt. sowie CO₂-Abgabe (Quelle: eigene Angebotsanfragen und www.spritzkostenrechner.de/spritzpreise-statistik, Datenbasis: Bundeskartellamt, Markttransparenzstelle für Kraftstoffe)

Datum Angebot	Anbieter	Gebinde	HVO-Preis	Diesel-Preis	Sonstiges
04.11.2020	A	1.000-I-IBC ¹⁾	2,83 €/l	1,01 €/l	Zzgl. Versand
29.07.2021	B	12.000-I-Tankwagen	1,46 €/l	1,38 €/l	Inkl. Lieferung
08.02.2022	B	1.000-I-IBC ¹⁾	2,14 €/l	1,64 €/l	Zzgl. Versand
11.08.2022	C	1.000-I-IBC ¹⁾	2,30 €/l	1,86 €/l	Zzgl. Versand
17.08.2022	B	1.000-I-IBC ¹⁾	2,09 €/l	1,92 €/l	Zzgl. Versand

¹⁾ IBC = Intermediate Bulk Container

4.3 Eigenschaften von HVO

Die Eigenschaften hydrierter Pflanzenöle (HVO), die zu den paraffinischen Dieselkraftstoffen zählen, unterscheiden sich nur geringfügig von Dieselkraftstoff. HVO kann fossilem Dieselkraftstoff innerhalb der Grenzen nach DIN EN 590 beigemischt oder unvermischt als Reinkraftstoff nach DIN EN 15940 in geeigneten Motoren eingesetzt werden. Es folgt eine Zusammenstellung wichtiger Anforderungen und Eigenschaften aus Literaturquellen sowie Analyseprotokollen.

4.3.1 Norm DIN EN 15940

Die Norm DIN EN 15940: Kraftstoffe – Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren [26] legt eine qualitätsbezogene Spezifikation und Prüfverfahren für paraffinischen Dieselkraftstoff auf der Basis von Synthesegas oder hydrierten biogenen Ölen und Fetten fest (Tabelle 2). Paraffinischer Dieselkraftstoff nach dieser Norm darf bis zu 7,0 % (V/V) Fettsäuremethylester (FAME) enthalten. Die Norm gilt für die Verwendung als Kraftstoff in Dieselmotoren und Kraftfahrzeugen, die für paraffinischen Dieselkraftstoff geeignet sind.

Tabelle 2: Allgemein anwendbare Anforderungen und Prüfverfahren der DIN 15940 [26]

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte	
		Min.	Max.
Cetanzahl		70 (Kl. A) 51 (Kl. B)	
Dichte bei 15 °C	kg/m ³	765,0 (Kl. A) 780,0 (Kl. B)	800,0 (Kl. A) 810,0 (Kl. B)
Flammpunkt	°C	> 55,0	> 55,0
Viskosität bei 40 °C	mm ² /s	2,000	4,500
Destillation			
% (V/V) aufgefangen bei 250 °C	% (V/V)	–	< 65
% (V/V) aufgefangen bei 350 °C	% (V/V)	85	–
95 % (V/V) aufgefangen bei	°C	–	360
Schmierfähigkeit, korrigierter „Durchmesser der Verschleißskalotte“ (WSD en: wear scar diameter) bei 60°C	µm	–	460 ¹⁾
FAME-Gehalt	% (V/V)	–	7,0
Mangangehalt	mg/l	–	2,0
Gesamtaromatengehalt	% (m/m)	–	1,1
Schwefelgehalt	mg/kg	–	5,0
Koksrückstand (von 10 % Destillationsrückstand)	% (m/m)	–	0,30
Aschegehalt	% (m/m)	–	0,010
Wassergehalt	% (m/m)	–	0,020
Gesamtverschmutzung	mg/kg	–	24
Korrosionswirkung auf Kupfer (3 h bei 50 °C)	Korrosionsgrad	Klasse 1	
Oxidationsstabilität	g/m ³	–	25
	h	20,0 ¹⁾	–

Kl. A = Klasse A, Kl. B = Klasse B; ¹⁾ zusätzliche Anforderung bei mehr als 2 % (V/V) FAME

¹⁾ Grenzwert wird in der neuen Norm-Fassung DIN EN 15940:2023-07 [27] auf 400 µm verschärft

Paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 entspricht weitgehend der Dieselkraftstoff-Norm DIN EN 590. Eine Ausnahme bildet die Dichte, die unterhalb des unteren Grenzwerts für Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 590 von 820 kg/m³ liegt. Allerdings erfüllt paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 die US-Dieselmkraftstoffnorm ASTM D975, weil diese lediglich einen oberen und keinen unteren Grenzwert für die Dichte definiert.

Je nach Produktionsprozess enthält der paraffinische Kraftstoff neben Cycloparaffinen auch n-Paraffine und Isoparaffine. Die molekulare Zusammensetzung beeinflusst die Cetanzahl, die Kenngröße für die Zündwilligkeit des Kraftstoffs. In der DIN EN 15940 werden deshalb zwei Klassen unterschieden, nämlich Klasse A (paraffinischer Dieselkraftstoff mit hoher Cetanzahl) und Klasse B (paraffinischer Dieselkraftstoff mit „normaler“ Cetanzahl).

Im Rahmen der Überarbeitung der Norm wird die neue Norm-Fassung DIN EN 15940:2023-07 [27] veröffentlicht. Eine Änderung ist die Verschärfung der Anforderung an die HFRR-Schmierfähigkeit von 460 auf 400 μm . Diese Anforderung ist somit strenger als für Dieselmotoren nach DIN EN 590. Das Thema Schmierfähigkeit wird in nachfolgendem Abschnitt 4.3.2 genauer erläutert.

4.3.2 Physikalisch-chemische Stoffeigenschaften

HVO ist ein paraffinischer Dieselmotoren, der in vielen seiner Stoffeigenschaften fossilem Dieselmotoren sehr ähnlich ist. Seine Zusammensetzung ist aber homogener. HVO enthält im mittleren Destillationsbereich Iso- und n-Paraffine sowie Kohlenwasserstoffe. Aromaten sind entweder gar nicht oder nur zu einem sehr geringen Anteil vorhanden. Der massebezogene Gesamtaromatengehalt beträgt gemäß Norm DIN EN 15940 max. 1,1 %, was sich günstig auf die Stoffeigenschaften auswirkt. HVO besteht gemäß eigenen Analysen zu ca. 84,8 % aus Kohlenstoff und zu 15,2 % aus Wasserstoff jeweils bezogen auf die Masse. Im Vergleich dazu weist fossiler Dieselmotoren eine massenbezogene Elementarzusammensetzung von ca. 86,5 % Kohlenstoff und 13,5 % Wasserstoff auf. Der untere Heizwert von HVO beträgt ca. 44 MJ/kg bzw. 34 MJ/l, der von fossilem Dieselmotoren 43 MJ/kg bzw. 36 MJ/l [34].

Eine umfangreiche Zusammenstellung von Literaturquellen zu grundlegenden kraftstoffrelevanten Eigenschaften von HVO liefern PECHOUT et al. (2019) [59]. Nachfolgend werden, basierend auf ausgewählten Publikationen verschiedene für den Motorbetrieb relevante Eigenschaften näher betrachtet.

Materialverträglichkeit

ACKERMANN et al. (2020) untersuchten in einem Forschungsvorhaben die Beständigkeit von Werkstoffen sicherheitsrelevanter handelsüblicher Bauteile von Versorgungsanlagen, wie Behälter- und Dichtungswerkstoffen, gegenüber Brenn- und Kraftstoffen [1]. Dabei wurden metallische Werkstoffe und Polymerwerkstoffe unter anderem mit HVO auf ihre Beständigkeit getestet und mit Biodiesel (B100) sowie fossilem Dieselmotoren (B0) verglichen. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Die Metall-Werkstoffe Aluminium, Stahl 1.0037, Stahl 1.4301, Kupfer, Messing und Zink wurden in HVO auf Korrosion getestet. Als beständig werden in Anlehnung an die DIN EN 15228 die Metall-Werkstoffe bezeichnet, deren mittlere Korrosionsraten geringer als 0,1 mm/a sind und bei denen keine lokale Korrosion festgestellt wird. Die Korrosionsraten sowohl in der Dampf- als auch in der Flüssigphase von HVO betragen durchweg null. Somit gilt HVO als beständig gegenüber den genannten Werkstoffen.
- Für die Bewertung der Beständigkeit von Polymeren wurden Zugprüfungen und Shore-Härte-Messungen nach einer Lagerung der Prüfkörper im Kraftstoff durchgeführt. Bei den Polymeren gilt eine Reduzierung der Zugeigenschaften und der Shore-Härte von bis zu 15 % noch als beständig und bis zu 30 % als bedingt beständig. Als Orientierung diente hierfür die BAM-Liste „Anforderungen für Tanks zur Beförderung gefährlicher

Güter“. Die bei 40 °C in HVO gelagerten Prüfkörper aus den Polymeren ACM (Polyacrylatkautschuk), HDPE (Polyethylen hoher Dichte), HNBR (Hydrierter Acrylnitrilbutadienkautschuk), PVC (Polyvinylchlorid), PA6 (Polyamid) und POM (Polyoxymethylen) können hinsichtlich der Änderung von Masse, Zugeigenschaften und Shore-Härte als beständig bewertet werden.

- Als Besonderheit wurde beobachtet, dass ACM in HVO zu einer deutlich geringeren Quellung sowie Verminderung der Shore-Härte und der Zugeigenschaften führt als in B100 und B0. Die bessere Beständigkeit von ACM in HVO liegt darin begründet, dass HVO im Gegensatz zu B100 und B0 keinen sauren Charakter hat [1].

KRAHL et al. (2015) [39] testeten in einer Studie die Veränderung von Werkstoffen durch das Zumischen von HVO und FAME in Diesel. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass HVO im Zugtest die Porosität von Polyamid (PA66) bei einem Blending von 26 % HVO und 7 % FAME im Diesel erhöht. Im Praxistest konnte in den Fahrzeugen jedoch keine Veränderung an den Dichtungen festgestellt werden.

BLIVERNITZ (2019) [3] untersuchte die Beständigkeit und das Quellverhalten von Elastomeren gegenüber HVO. Dabei zeigte sich: Je höher der Anteil an Aromaten im Kraftstoff war, desto höher fiel dessen Diffusionskoeffizient aus und desto mehr drang der Kraftstoff in das Elastomer ein. Da HVO nahezu aromatenfrei und zudem unpolar ist, quellen Elastomere beim Kontakt mit HVO vergleichbar wenig.

WINKLER et al. (2021) [74] weisen in einem technischen Rundschreiben der Deutz AG darauf hin, „*dass es bei älteren Motoren, die längere Zeit mit handelsüblichen Dieselkraftstoffen betrieben und dann auf paraffinische Kraftstoffe umgestellt wurden, gegebenenfalls zu Kraftstoffleckagen kommen kann. Der Grund für dieses Verhalten ist das geänderte Quellungsverhalten von NBR-Polymerdichtungen in paraffinischem Dieselkraftstoff gegenüber herkömmlichem Diesel aufgrund seiner Aromaten-Freiheit. Das Quellungsproblem tritt nicht auf, wenn ein Motor von Anfang an mit paraffinischem Dieselkraftstoff betrieben wird bzw. FKM-Dichtungen und Polymerschläuche verwendet werden. Innerhalb der ersten vier Wochen nach Umstellung auf paraffinischen Dieselkraftstoff empfiehlt DEUTZ regelmäßige Kontrollen der Dichtungen auf Leckagen. Gegebenenfalls müssen kritische Dichtungen ausgetauscht werden.*“ Werden paraffinische Kraftstoffe herkömmlichen Dieselkraftstoffen zugemischt, hat dies keine negativen Einflüsse auf die Polymerverträglichkeit [74].

Schmierfähigkeit

Ungenügende Schmierfähigkeit kann ein Problem bei Kraftstoffen mit niedrigem Schwefelgehalt sein und insbesondere bei der Verwendung in modernen Common-Rail-Einspritzsystemen Schäden durch erhöhten Verschleiß verursachen. Um eine schlechtere Schmierfähigkeit paraffinischen Dieselkraftstoffs zu vermeiden, sind Schmierfähigkeitsverbesserer einzusetzen oder geringe Mengen an Biodiesel beizumischen [59].

In der Norm DIN EN 15940:2016+A1:2018+AC:2019 ist der Grenzwert für eine ausreichende Schmierfähigkeit wie bei Dieselkraftstoff mit 460 µm im HFRR-Test

(EN ISO 121561) festgeschrieben. Erfahrungsgemäß bietet die Erfüllung der Anforderung an die Schmierfähigkeit zwar Schutz gegen Verschleiß, letztlich aber schützt „*Dieselmotoren mit einem hohen Paraffingehalt die Komponenten des Kraftstoffsystems nicht immer ausreichend gegen Reibfressen ...*“ [26]. In der neuen Norm DIN EN 15940:2023-07 [27] wurde deshalb der Grenzwert vorsorglich auf 400 µm herabgesetzt.

Löslichkeitsverhalten

HVO ist unlöslich in Wasser, aber löslich in Methanol sowie in Kohlenwasserstoffen, wie beispielsweise im Kohlenwasserstoffgemisch Dieselmotorenkraftstoff [68].

Die OWI Science for Fuels gGmbH an der RWTH Aachen untersucht aktuell das Löslichkeitsverhalten paraffinischer Dieselmotorenkraftstoffe im Rahmen eines Forschungsprojekts (Laufzeit: 03/2021 bis 08/2023). Die Schwerpunkte liegen auf der Wasseraufnahme und dem Trübungsverhalten, der Kristallisation paraffinischer Komponenten sowie der Phasenstabilität und dem Lösungsvermögen [57].

Löslichkeitsparameter von HVO sowie weiterer Kraftstoffe wurden auch von KRÖNER et al. (2019) [47] untersucht.

Zündwilligkeit, Partikelfilterregeneration und Motorölverdünnung

Versuche von PECHOUT et al. (2019) [59] mit einem Euro-6-Dieselmotoren-Pkw ergaben einen früheren Verbrennungsbeginn und ein früheres Maximum der Wärmefreisetzung mit HVO im Vergleich zu Biodiesel und Diesel aufgrund der höheren Cetanzahl. Zeitweise wurden mehrere Wärmefreisetzungsspitzen in einem Verbrennungsablauf beobachtet. Dies ist der Grund für die Annahme, dass eine Optimierung der Kraftstoffeinspritzung bei HVO Vorteile gegenüber der Standard-Dieseleinstellung haben könnte. Die Partikelfilterregeneration sowohl mit FAME als auch mit HVO führte zu einer stärkeren Motorölverdünnung als mit Diesel und sollte deshalb noch weiter untersucht werden. PECHOUT et al. (2019) [59] berichten im Rahmen ihres Literaturstudiums auch davon, dass die Partikel, die bei der motorischen Verbrennung von HVO entstehen, eine höhere Reaktivität als Dieselpartikel aufweisen und bereits bei etwa 40 K niedrigerer Abgastemperatur im Partikelfilter oxidieren. Daraus wird abgeleitet, dass zusammen mit der bei HVO meist geringeren Partikelmassemmission ein Potenzial für längere Betriebszeiten zwischen zwei Regenerationsintervallen besteht.

KRAHL et al. (2012) [45] untersuchten im Vorhaben „Diesel regenerativ“ den Einsatz zweier Kraftstoffqualitäten (HVO mit 2 und 7 % Biodieselbeimischung) in zwei Fahrzeugflotten. Insgesamt legten die elf Pkw der Emissionsstufen Euro 3 bis Euro 6 über ein Jahr hinweg rund 208.000 km mit den mit Biodiesel geblendeten HVO-Kraftstoffen, die als „Diesel regenerativ“ bezeichnet wurden, zurück. Die zahlreichen Motorölanalysen zeigten keine übermäßige Ölverdünnung und keine Beeinträchtigung der Ölqualität. Alle Kennwerte lagen unterhalb der internen Grenzwerte des VW-Konzerns. Demnach konnten die Ölwechselintervalle entsprechend dem Dieselmotorenbetrieb beibehalten werden. Die Autoren merken aber an, dass die Veränderung der Motorölqualität stark vom Fahrprofil und dem Motor

abhängt und die Ergebnisse wegen der zu geringen Anzahl an Fahrzeugen statistisch nicht abgesichert sind.

GERINGER et al. (2011) [38] und DAMYANOV (2019) [11] untersuchten den Einfluss von HVO auf die Dieselpartikelfilterregeneration durch Späteinspritzung. Dabei wurde festgestellt, dass im Betriebsmodus „DPF-Regeneration“ bei Niedriglast und Standarddieseleinstellungen mit steigendem Anteil HVO im Diesel die Motorölverdünnung zunimmt. Hinzu kommt, dass gleichzeitig die Temperatur am Eingang des Dieselpartikelfilters (DPF) deutlich zurückgeht. In der Folge müsste mehr Kraftstoff eingespritzt werden, um das Temperaturniveau für die Regeneration des DPF zu halten, wodurch der Kraftstoffverbrauch und die Motorölverdünnung zunehmen. Die Ursache dafür liegt in der hohen Zündwilligkeit von HVO, die dazu führt, dass höhere Anteile von HVO bei der Späteinspritzung bereits im Motor umgesetzt werden. Dies bewirkt, dass weniger unverbrannter Kraftstoff zur Anhebung der Abgastemperatur im Oxidationskatalysator für die DPF-Regeneration zur Verfügung steht.

Kältetauglichkeit und Kaltstartfähigkeit

Die klimaabhängigen Anforderungen an Kraftstoffe werden länderspezifisch festgelegt. Als Kennwerte dienen der Cold Filter Plugging Point sowie der Pour Point. Die Grenzwerte in der Norm DIN EN 15940 entsprechen denen von Dieselmotorkraftstoff gemäß DIN EN 590. Die gute Kältetauglichkeit von HVO wird erst durch die Isomerisierung bei der Herstellung erreicht. In der Literatur wird sowohl von besseren als auch von etwa gleich guten Kälteeigenschaften von HVO im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen berichtet [59].

Die Firma Neste gibt an, dass die Kälteeigenschaften des von ihnen hergestellten Diesels „Neste MY Renewable“ weit über den Norm-Anforderungen liegen können, sodass der Kraftstoff auch bei arktischen Temperaturen bis -40 °C eingesetzt werden kann [4]. Allerdings wird überwiegend aus wirtschaftlichen Gründen dieses Spektrum meist nicht ausgereizt und eine Kältebeständigkeit von -22 °C eingestellt.

JOHANSSON et al. (2015) [42] untersuchten die Kaltstartfähigkeit, langfristige Auswirkungen auf Materialien, Emissionen und Kraftstoffverbrauch von HVO im Vergleich zum Dieselmotorkraftstoff. Für die Kaltstartversuche wurde das Fahrzeug für zehn Stunden auf ausgewählte Temperaturstufen bis -27 °C heruntergekühlt und die Zeit bis zum Motorstart gemessen. Die Tests zeigten, dass die Startzeit bis zu -20 °C unter zwei Sekunden lag und kein Unterschied zwischen den Kraftstoffen bestand.

Oxidationsstabilität und Ablagerungen

HVO ist unpolar und weist dadurch eine gute Oxidationsstabilität auf. Die Beständigkeit gegenüber Oxidation nimmt von RME (14,31 min) über OME (87,96 min) hin zu HVO (240,13 min) deutlich zu [70]. Die Oxidationsstabilität von HVO ist damit deutlich besser als von Biodiesel [59].

Interne Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren sind häufige Ursachen für Motorleistungsverluste und erhöhte Schadstoffemissionen. Neben seifen- und amidartigen Ablagerungen tragen auch Kraftstoffalterungsprodukte zur Ablagerungsbildung bei. HVO zeigt

wegen der fehlenden aromatischen Kohlenwasserstoffe im Vergleich zu fossilem Diesel geringere Ablagerungen und keine Sedimentbildung [10].

4.3.3 Emissionen und Energiebilanz

Schadstoffemissionen

Es gibt eine große Anzahl an Untersuchungen zum Abgasverhalten beim Einsatz von HVO-Kraftstoff in Reinform oder in unterschiedlichen Mischungen mit Dieselmotorkraftstoff. Dabei zeigt sich überwiegend in guter Übereinstimmung, dass der Einsatz von HVO gegenüber Diesel tendenziell zu einer Reduzierung der Rohemissionen vor der Abgasnachbehandlung führt.

Die Literaturstudien von PECHOUT et al. (2019) [59] ergaben, dass die hohe Cetanzahl von HVO bei geringerer Last in Zonen mit Sauerstoffmangel zu höheren Partikelemissionen führen kann, wohingegen bei höherer Last das Fehlen von Aromaten in HVO geringere Partikelemissionen hervorruft als im Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Andere Untersuchungen wiederum kommen zu dem Ergebnis, dass insgesamt keine oder nur vernachlässigbare Effekte auf Partikelmasse und -anzahl beim HVO-Betrieb bestehen.

Untersuchungen von JOHANSSON et al. (2015) [42] zur Langzeitbelastung eines Pkw über 100.000 km mit HVO-Kraftstoff zeigten keine negativen Auswirkungen auf die Materialverträglichkeit oder Verdünnung des Motoröls mit Kraftstoff. Prüfstandsmessungen ergaben eine Reduktion der Partikelmasse (PM) im Rohabgas um rund 60 %, in etwa unveränderte Stickstoffoxide (NO_x) und einen um 4 % geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu Dieselmotorkraftstoff. Die Emissionen reduzierten sich im Fahrzeugtest mit HVO-Kraftstoff infolge des günstigeren Wasserstoff-Kohlenstoff-Verhältnisses bei Kohlendioxid (CO_2) um 6 %, Kohlenmonoxid (CO) um 80 % und Kohlenwasserstoffen (HC) um 65 %.

DIMITRIADIS et al. (2019) [28] untersuchten den Einfluss von HVO auf die Verbrennung und Emissionen eines Dieselmotors bei unterschiedlichen Betriebspunkten und Einspritzstrategien. Dabei zeigte sich gegenüber Diesel ein deutlicher Rückgang der PM- und HC-Emissionen im Rohabgas bei etwa gleichbleibenden NO_x -Emissionen. Ferner, so die Autoren, besteht ein großes Potenzial, durch veränderte Motoreinstellungen den PM- NO_x -Trade-off zu reduzieren.

GREN et al. (2021) [40] untersuchten die Auswirkungen von HVO auf die Emissionen. Dabei bestätigte sich auch eine Schadstoffminderung im Rohabgas bei der PM und den Aerosolen.

MCCAFFERY et al. (2020) [50] untersuchten die Abgasemissionen eines leichten Nutzfahrzeugs mit Common-Rail-Einspritzung bei verschiedenen Fahrzyklen. Beim LA-92-Fahrzyklus wurden mit HVO geringere Konzentrationen an Gesamt-HC, CO, NO_x und Partikeln im Rohabgas festgestellt. Die Minderung von Ruß, PM und der Partikelanzahl (PN) wird auf das Fehlen von Aromaten, Polyaromaten und Schwefel zurückgeführt. Beim stationären Testzyklus bestätigte sich die Minderung der Gesamt-HC-Emissionen, wohingegen

bei CO, NO_x und Ruß in den oberen Lastpunkten teilweise auch höhere Konzentrationen zu verzeichnen waren als mit Diesel.

PECHOUT et al. (2019) [59] verzeichneten bei Versuchen an einem Euro-6-Diesel-Pkw mit HVO geringere Formaldehyd- und Lachgasemissionen als mit Biodiesel. Der Partikelfilter war mit Diesel am stärksten beladen, gefolgt von HVO. FAME schnitt diesbezüglich am besten ab.

Im Projekt „Diesel regenerativ“ wurden im Vergleich zu fossilem Dieselkraftstoff Emissionsminderungen für HC, CO und die PM festgestellt. Die NO_x waren leicht erhöht. Letzteres war laut den Autoren bisher nur bedingt in der Literatur bekannt (z. B. bei GTL). Meistens wurden für Nutzfahrzeuge von geringeren NO_x bei der Nutzung von reinem HVO im Vergleich zu fossilem Diesel berichtet. Alle Testfahrzeuge genügten aber im Betrieb sowohl mit „Diesel regenerativ“ als auch mit Dieselkraftstoff den Emissionsanforderungen (KRAHL et al. (2012) [45]).

DAMYANOV (2019) [11] untersuchte das motorische Betriebsverhalten beim Einsatz von HVO. Die Ergebnisse bestätigen die Vorteile von HVO gegenüber Dieselkraftstoff hinsichtlich der Abgasemissionen, ohne dass Effizienzeinbußen hingenommen werden müssen. Beispielsweise können die PM-Emissionen bei hoher Last um bis zu 50 % reduziert werden, was die Folge kleinerer Partikel-Durchmesser ist und nicht die Folge einer verringerten Anzahl an Partikeln. Die geringeren Emissionen an HC, CO, Aldehyden und polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) bei der Verwendung von HVO begründen sich vor allem dadurch, dass HVO im Gegensatz zu Dieselkraftstoff frei von Aromaten ist.

PEMS-Messungen des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) ergaben keine Verschlechterung der Fahrzeugemissionen und des Kraftstoffverbrauchs bei einer Beimischung von 33 % HVO zu Diesel, vereinzelt waren leichte Verbesserungen erkennbar [73].

SWIDERSKI et al. (2022) [66] untersuchten die Flammenstrukturen und Verbrennungsprozesse von HVO-Diesel-Blends (30 und 70 %) in Großdieselmotoren. Dabei waren keine signifikanten Unterschiede gegenüber reinem Diesel erkennbar. Form und Aufbau der Flammen im Test waren sich sehr ähnlich. Mit steigendem HVO-Anteil war lediglich ein etwas geringeres Temperatur- und Rußniveau erkennbar.

BORTEL et al. (2019) [4] testeten reines HVO, HVO-Blends und Diesel in einem Einzylinder-Selbstzündungsmotor mit Common-Rail-Einspritzsystem. Dabei wurde festgestellt, dass sich mit HVO gegenüber Diesel die Leistung, der Motorwirkungsgrad, die NO_x- und die CO₂-Emissionen leicht verbessern und dass es zur signifikanten Minderung bei den CO-, HC- und PM-Emissionen (62 %, 64 %, 80 %) kommt. Zur Erklärung wurden die höhere Cetanzahl und die Aromatenfreiheit von HVO-Kraftstoff angeführt.

Eine Studie aus Finnland von LAKANEN et al. (2021) [48] zeigt auf, dass durch die Umstellung aller Pkw in Helsinki die Luftqualität der Stadt wesentlich verbessert werden könnte. Vor allem die Feinstaubemissionen PM_{2.5} wie auch die NO_x-Emissionen könnten demnach reduziert werden.

Treibhausgasemissionen

In der EU-Richtlinie (EU) 2018/2001 [34] zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen sind typische Werte für Treibhausgasemissionen über den gesamten Produktionsweg (Anbau, Verarbeitung, Transport und Vertrieb) von Biokraftstoffen genannt. Für HVO aus Altspeiseöl beträgt der typische Wert demnach 11,9 g CO_{2eq}/MJ, für HVO aus Rapsöl 45,8 g CO_{2eq}/MJ, für HVO aus Palmöl (offenes Abwasserbecken) 62,2 g CO_{2eq}/MJ sowie für HVO aus Palmöl (Verarbeitung mit Methanbindung an der Ölmühle) 44,1 g CO_{2eq}/MJ. Gegenüber dem fossilen Vergleichswert entsprechen diese Werte einer THG-Minderung für HVO aus Altspeiseöl von 87 %, für HVO aus Rapsöl von 52 %, für HVO aus Palmöl (offenes Abwasserbecken) von 32 % sowie für HVO aus Palmöl (Verarbeitung mit Methanbindung an der Ölmühle) von 51 %. Die genannten Werte berücksichtigen keine durch Landnutzungsänderungen verursachten THG-Emissionen. In der EU-Richtlinie 2018/2001 heißt es dazu: *„Da nicht eindeutig und mit dem nötigen Präzisionsgrad bestimmt werden kann, wie hoch die durch indirekte Landnutzungsänderungen bedingten Treibhausgasemissionen sind, können sie bei der Methode zur Berechnung der Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt werden.“* [34]

Das in Deutschland im Jahr 2020 verwendete nachhaltigkeitszertifizierte HVO wies nach Angaben der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) eine mittlere THG-Einsparung von 79 % gegenüber Diesel auf. Bei HVO, das durch Co-Processing, also zusammen mit Erdölprodukten erzeugt wurde, liegt der Wert bei 81 % [7].

THG-Emissionen bzw. THG-Einsparungen sind abhängig von der Art und Herkunft der Rohstoffe, der Technologie der Herstellung sowie der Bewertung von Nebenprodukten sowie von Rest- und Abfallstoffen. HVO-Pfade, bei denen Palmöl oder Algen als Ausgangsstoffe eingesetzt werden, weisen die größten Bandbreiten auf [51]. Ursache dafür sind vor allem der unterschiedliche Umgang mit Rest- und Abfallstoffen bzw. die unterschiedliche Berücksichtigung abfall- und abwasserbedingter Emissionen in der Palmölmühle (offene Lagerung oder gasdicht abgedeckte Lagerung der Abwässer mit Methanabscheidung und ggf. energetischer Methangasnutzung; Rückführung der leeren Palmfruchthüllen auf die Plantagen oder Kompostierung bzw. Vergasung). Algenbasierte Kraftstoffe sind stark abhängig vom Energie- und Nährstoffeinsatz bei der Algenproduktion. Je nach verwendeten Algenreaktoren können deutliche Unterschiede in der THG-Bilanz resultieren [51]. Hohe THG-Einsparungen werden vor allem durch den Einsatz von Rest- und Abfallstoffen erzielt, da hierfür keine Vorkettenemissionen für die Rohstoffproduktion angesetzt werden.

Energiebilanz

Wie auch bei den THG-Emissionen wird die Energiebilanz wesentlich durch die Definition der Systemgrenzen beeinflusst. PRUSSI et al. (2020) [60] berechnen Energiebilanzen für HVO aus verschiedenen Rohstoffen und weisen dabei den Anteil fossiler, nuklearer und regenerativer Energie (auf Basis des jeweils vorliegenden Strommixes) aus. In Abbildung 11 sind die Energieaufwände für verschiedene Rohstoffquellen, Herstellungsprozesse und unterschiedliche Anrechnungen des Nebenprodukts Rapsschrot nach PRUSSI et al. (2020)

[60] dargestellt. Die Energiebilanzen für Raps- und Sonnenblumensaat als Rohstoff bewegen sich im Bereich von 1,00 bis 1,12 MJ Energie, die eingesetzt werden, um 1,00 MJ HVO herzustellen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in der Bilanz auch der Heizwertanteil des Rohstoffs mit enthalten ist.

Für das Herstellungsverfahren nach UOP/ENI (siehe auch Unterkapitel 4.1) liegt der fossile Anteil der Energiebilanz für Rapssaat als Rohstoff bei etwa 50 %, für das Verfahren nach Neste bei 40 %. Auffällig ist der niedrige fossile und hohe regenerative Anteil bei der HVO-Produktion aus Palmöl. Dies ist in dieser Studie auf die Verwendung von Abfällen aus der Palmölproduktion zur Wärme- und Energiebereitstellung zurückzuführen [60]. Werden Reststoffe als Rohstoffe für die HVO-Herstellung verwendet, werden keine Energieaufwendungen für den Rohstoff berücksichtigt. Dies erfolgt analog zum Vorgehen bei der THG-Bilanzierung. Die fossilen Energieaufwendungen für die Herstellung von HVO aus Abfall- und Reststoffen werden im Bereich von 0,16 bis 0,25 MJ/MJ_{HVO} angegeben.

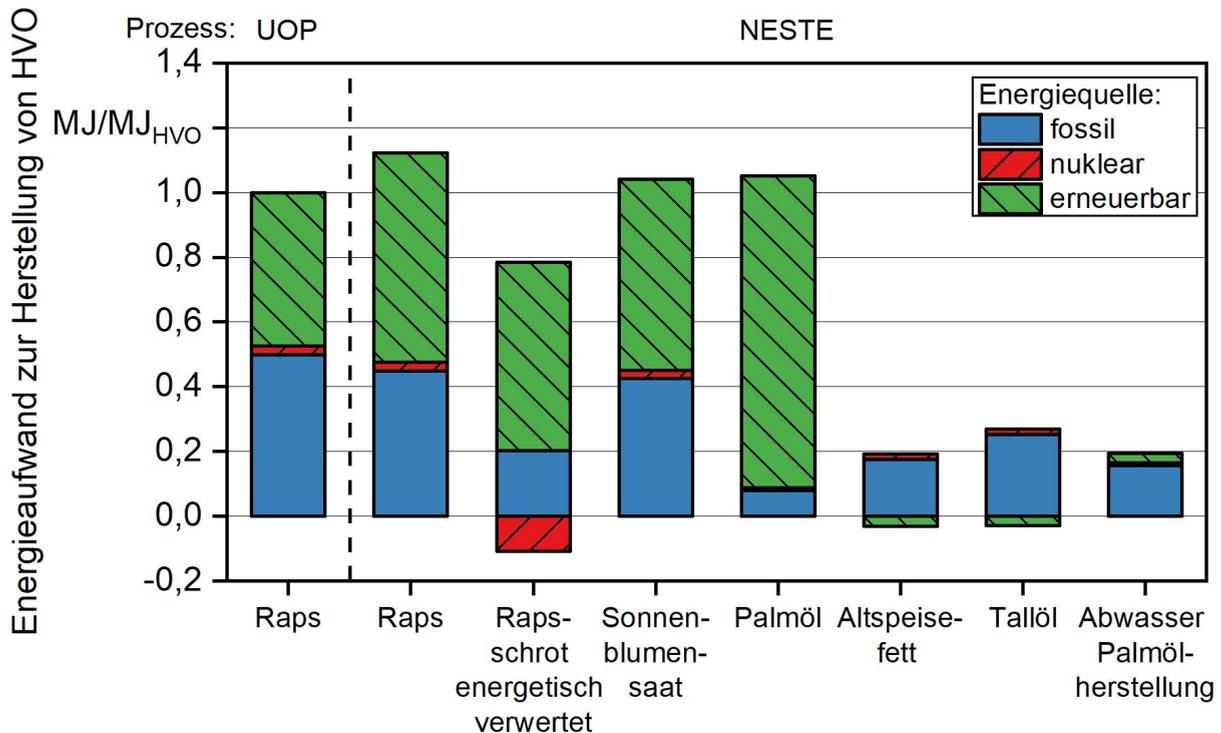


Abbildung 11: Energieaufwand zur Herstellung von HVO für verschiedene Rohstoffquellen, Herstellungsprozesse und bei unterschiedlicher Anrechnung des Nebenprodukts Rapsschrot nach PRUSSI et al. (2020) [60]

In den Energiebilanzen enthalten sind auch die Aufwendungen für die Produktion des Wasserstoffs, der für die Hydrierung notwendig ist. Der Bedarf an Wasserstoff ist abhängig von Rohstoff und Herstellungsprozess und bewegt sich zwischen 0,07 und 0,13 MJ/MJ_{HVO} [60], was umgerechnet etwa 2,6 bis 4,8 kg Wasserstoff für 100 kg HVO entspricht. NIKANDER (2008) [55] berichtet für die Produktion von 100 kg HVO von einem Verbrauch von 4,2 kg Wasserstoff, was mit den Daten nach PRUSSI et al. (2020) [60] sowie SCHRÖDER et al. (2022) [64] übereinstimmt.

4.4 Rahmenbedingungen

Die gesetzlichen Rahmenbedingungen bei der Abgabe und beim Einsatz von HVO aus Rest- und Abfallstoffen sind nicht durchweg schlüssig nachvollziehbar [46]. Dies betrifft beispielsweise das Inverkehrbringen von HVO an öffentlichen Tankstellen, was einerseits durch die Nichtnennung in der Zehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (10. BImSchV) ausgeschlossen wird, während das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz [23] den Einsatz von HVO in Fuhrparks öffentlicher Einrichtungen als Option nennt, um die CO₂-Vorgaben zu erfüllen. Rechtliche Unsicherheiten bestehen auch hinsichtlich des Einsatzes von HVO in Fahrzeugen und Maschinen, für die keine Typprüfung oder explizite Zulassung für paraffinischen Kraftstoff nach DIN EN 15940 vorliegt.

4.4.1 Inverkehrbringen von HVO

Die **10. BImSchV** (Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen)) [22] nimmt keinen Bezug auf paraffinischen Dieseldieselkraftstoff bzw. HVO gemäß DIN EN 15940. Aus diesem Grund und weil HVO-Kraftstoff auch nicht die Anforderungen an Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 590 in Bezug auf die Dichte erfüllt, darf er in Deutschland nicht als Reinkraftstoff für den Einsatz im Straßenverkehr in Verkehr gebracht werden. Ein generelles Verkaufsverbot gilt aber nicht [46] [41].

In mobilen Maschinen und Geräten sowie in land- und forstwirtschaftlichen Zugmaschinen ist der Einsatz paraffinischen Dieseldieselkraftstoffs nach Ansicht des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft von Baden-Württemberg erlaubt, da sein Schwefelgehalt den Wert von 10 mg/kg nicht überschreitet und damit die Anforderungen von § 4 Absatz 2 10. BImSchV erfüllt werden [41]. Im angeführten Absatz steht: *„Dieseldieselkraftstoff zur Verwendung für mobile Maschinen und Geräte, für land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen sowie für Binnenschiffe und Sportboote darf nur dann gewerbsmäßig oder im Rahmen wirtschaftlicher Unternehmungen gegenüber dem Letztverbraucher in den Verkehr gebracht werden, wenn sein Gehalt an Schwefelverbindungen, berechnet als Schwefel, 10 Milligramm pro Kilogramm Dieseldieselkraftstoff nicht überschreitet.“* Diese Anforderung erfüllt HVO. Widersprüchlich ist jedoch, dass nach § 1 Absatz 4 Dieseldieselkraftstoff wie folgt definiert wird: *„Dieseldieselkraftstoff zur Verwendung für mobile Maschinen und Geräte, für land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen sowie für Binnenschiffe und Sportboote ist jeder aus Erdöl gewonnene flüssige Kraftstoff im Sinne des Kapitels 27 der Kombinierten Nomenklatur, einschließlich der Zubereitungen mit einem Gehalt an Mineralöl von mindestens 70 Gewichtshundertteilen, in denen diese Öle der Grundbestandteil sind [...]“*. Da HVO keine entsprechend hohen Anteile Mineralöl enthält, besteht Klärungsbedarf, ob der Einsatz in landwirtschaftlichen Maschinen und Geräten zulässig ist oder nicht.

Öffentliche Einrichtungen dürfen – anders als privatwirtschaftliche Unternehmen – paraffinischen Dieseldieselkraftstoff bzw. HVO als Reinkraftstoff in ihren Fuhrparks verwenden, beispielsweise um die CO₂-Vorgaben des Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetzes

(**SaubFahrzeugBeschG**) [23] zu erfüllen. Ausgenommen ist paraffinischer Dieseldieselkraftstoff, der mit fossilem Kraftstoff vermischt ist und aus Rohstoffen hergestellt wurde, die ein hohes Risiko für indirekte Landnutzungsänderungen bergen (Palmöl). Das SaubFahrzeugBeschG setzt verpflichtende Mindestziele zur CO₂-Einsparung bei bestimmten Straßenfahrzeugen und Dienstleistungen, für die Straßenfahrzeuge eingesetzt werden, die der öffentlichen Auftragsvergabe unterliegen.

Darüber hinaus können gemäß § 16 Absatz 1 10. BImSchV in besonderen Einzelfällen auch Ausnahmegenehmigungen für paraffinischen Dieseldieselkraftstoff zu Forschungs- und Erprobungszwecken erteilt werden, wenn schädliche Umweltwirkungen nicht zu erwarten sind. Eine solche Ausnahmegenehmigung ist nicht erforderlich, wenn der Kraftstoff betriebsintern zu Forschungs- und Erprobungszwecken verwendet wird, schädliche Umweltwirkungen nicht zu erwarten sind und er nicht über öffentliche Tankstellen in Verkehr gebracht wird.

Gemäß § 4 Absatz 1 10. BImSchV darf paraffinischer Dieseldieselkraftstoff konventionellem Dieseldieselkraftstoff beigemischt werden, solange das Endprodukt die Anforderungen der DIN EN 590 erfüllt. Aufgrund der unterschiedlichen Dichte ist somit eine Beimischung von bis zu etwa 26 % paraffinischem zu konventionellem Dieseldieselkraftstoff möglich. Ein Beispiel für einen solchen Mischkraftstoff ist Diesel R33 [39].

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) hat am 12.07.2022 im „Sofortprogramm für den Sektor Verkehr aufgrund einer Überschreitung der zulässigen Jahresemissionsmenge für das Jahr 2021 auf Grundlage von § 8 Absatz 1 KSG“ vorgeschlagen, paraffinische Kraftstoffe gemäß DIN EN 15940 in die 10. BImSchV aufzunehmen. In ihrem Positionspapier „Klimaschutz: Mit Bestandsflotten unmittelbar aus fossilen Kraftstoffen aussteigen – HVO100 aus Rest- und Abfallstoffen für den Straßenverkehr rechtlich zulassen“ vom 24.01.2023 fordern zahlreiche Verbände und Unternehmen, darunter namhafte Motoren- und Nfz-Hersteller sowie Logistik- und Transportdienstleister, die rasche Marktöffnung für erneuerbare paraffinische Reinkraftstoffe aus Rest- und Abfallstoffen gemäß DIN EN 15940 durch deren Aufnahme in die 10. BImSchV. Anfang März 2023 meldeten der Bundesverband für Logistik und Spedition e. V. (DLSV) sowie der Bundesverband freier Tankstellen und unabhängiger deutscher Mineralölhändler e. V. (bft), dass sich die Bundesregierung darauf geeinigt habe, paraffinischen Dieseldieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940 in die 10. BImSchV aufzunehmen und so die Grundlage für den Verkauf an öffentlichen Tankstellen zu schaffen.

4.4.2 Energiesteuer

Die Höhe der Energiesteuer (früher: Mineralölsteuer) ist im Energiesteuergesetz (EnergieStG) [16] festgelegt. Auf Anfrage des TFZ vom 12.10.2021 bei der Generalzolldirektion in Dresden bezüglich der anfallenden Energiesteuer für HVO und zur möglichen Steuerrück-erstattung bei der Verwendung in der Land- und Forstwirtschaft wurde Folgendes geant-wortet:

„Paraffinisches Gasöl ist ein Energieerzeugnis nach § 1 Absatz 2 Nr. 2 EnergieStG und unterliegt dem Steuersatz von 470,40 €/1000 l nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 b) EnergieStG. Es wird nach dem Ähnlichkeitsprinzip des § 2 Absatz 4 Satz 1 EnergieStG wie Gasöl mit ei-nem Schwefelgehalt von höchstens 10 mg/kg besteuert. Bei einer Verwendung als Kraft-stoff in Betrieben der Land- und Forstwirtschaft und Vorliegen der übrigen Voraussetzun-gen wird für folgende – nach § 2 Abs. 1 Nr. 4 EnergieStG versteuerte – Energieerzeug-nisse eine Steuerentlastung nach § 57 Absatz 1 i. V. mit Absatz 5 EnergieStG gewährt:

– Gasöl – § 57 Absatz 5 Nr. 1 EnergieStG

– die in § 50 Absatz 3 Satz 4 Nrn. 1 und 2 genannten Biokraftstoffe Fettsäuremethylester (FAME, Biodiesel) und Pflanzenöl – § 57 Absatz 5 Nr. 2 a) und b) EnergieStG

Hier ist anzumerken, dass paraffinisches Gasöl bei einer Verwendung als Kraftstoff zwar wie Gasöl besteuert wird, es gilt jedoch nicht als Gasöl im Sinne des § 57 Absatz 5 Nr. 1 EnergieStG.

Die weitere Steuerentlastung für die Biokraftstoffe FAME und Pflanzenöl ist auf paraffini-sches Gasöl ebenfalls nicht anwendbar, da in § 57 Absatz 5 EnergieStG keine dem § 50 Absatz 3 Satz 5 EnergieStG vergleichbare Regelung („Für andere als die in Satz 2 ge-nannten Biokraftstoffe, die nach den Steuersätzen des § 2 Absatz 1 Nummer 4 versteuert worden sind, gelten die Sätze 1 und 3 Nr. 1 entsprechend [...]“) getroffen worden ist, um die Art der entlastungsfähigen Energieerzeugnisse über Gasöl, FAME und Pflanzenöl hin-aus zu erweitern.

Eine Steuerentlastung nach § 57 EnergieStG für paraffinischen Kraftstoff kann daher nicht gewährt werden.“ [37]

Diese Aussage der Generalzolldirektion Dresden wird auch bestätigt durch die Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU zur steuerlichen Be-günstigung von Biodiesel und Pflanzenöl sowie XtL-Kraftstoffen in Betrieben der Land- und Forstwirtschaft. Darin heißt es:

„Kraftstoffe nach DIN EN 15940 können herkömmlichem Diesel nach DIN EN 590 beige-mischt werden. [...] Sofern das Gesamtgemisch als Diesel besteuert wird, kann bereits eine Entlastung nach § 57 Absatz 5 Nummer 1 EnergieStG für die darin enthaltenen XtL-Komponenten beantragt werden. Eine darüberhinausgehende Anpassung der Energie-steuerentlastung nach § 57 EnergieStG ist derzeit nicht geplant.“ [15]

4.4.3 THG-Quotenanrechnung (EU-Richtlinie 2018/2001 und BImSchG) für den Verkehrssektor

Gemäß § 37b Absatz 5 BImSchG [19] sind „*hydrierte biogene Öle [...] nur dann Biokraftstoffe, wenn sie aus biogenen Ölen oder Fetten gewonnen werden, die selbst Biomasse im Sinne der Biomasseverordnung sind, und wenn die Hydrierung nicht in einem raffiniertechnischen Verfahren gemeinsam mit mineralölstämmigen Ölen erfolgt ist.*“ Sie können dann auf die Erfüllung der THG-Minderungsquote angerechnet werden. Nicht auf die Erfüllung von Quotenverpflichtungen angerechnet werden nach § 37d Absatz 8 BImSchG „*biogene Öle, die in einem raffiniertechnischen Verfahren gemeinsam mit mineralölstämmigen Ölen hydriert wurden*“, und „*Biokraftstoffe, die vollständig oder teilweise aus tierischen Ölen oder Fetten hergestellt wurden*“, die nicht in Artikel 8 und 9 der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 aufgeführt sind. HVO-Biokraftstoff aus Co-Processing konnte in Deutschland nur im Zeitraum vom 1. Januar 2018 bis zum Verpflichtungsjahr 2020 auf die Treibhausgasquote angerechnet werden (§10 der 37. BImSchV) [20].

Daneben gibt es Bestimmungen für Mindestanteile für fortschrittliche Biokraftstoffe und Obergrenzen für Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, aus Altspeiseölen und tierischen Fetten sowie aus Rohstoffen mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen (Palmöl). Nachfolgend wird der gesetzliche Rahmen hinsichtlich THG-Minderung im Kraftstoffsektor beschrieben, zunächst der europäische Rahmen mit der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) [34] und danach der nationale Rahmen für Deutschland mit dem einschlägigen Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [19] sowie der nachgeordneten 38. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) [17].

Gemäß Artikel 25 der als „Erneuerbare-Energien-Richtlinie“ oder „RED II“ bekannten EU-Richtlinie 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen [34] muss jeder Mitgliedsstaat dafür sorgen, dass der energetische Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors bis zum Jahr 2030 mindestens 14 % beträgt. Innerhalb dieses Mindestanteils muss der Beitrag fortschrittlicher Biokraftstoffe am Endenergieverbrauch des Verkehrssektors im Jahr 2022 mindestens 0,2 %, im Jahr 2025 mindestens 1 % und im Jahr 2030 mindestens 3,5 % ausmachen. Biokraftstoffe gelten dann als fortschrittlich, wenn sie aus einem der in der EU-Richtlinie 2018/2001 Anhang IX, Teil A genannten biobasierten Rest- und Abfallstoffe hergestellt wurden. Der Anteil von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen im Verkehrssektor eines Mitgliedsstaats darf maximal 1 % höher sein als ihr Anteil im Straßen- und Schienenverkehr im Jahr 2020, jedoch nicht höher als 7 %. Die Mitgliedsstaaten können auch einen niedrigeren Grenzwert für Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen als die 7 % festlegen und dann entsprechend auch den Mindestanteil von 14 % absenken. Biokraftstoffe, die unter hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen hergestellt werden dürfen nicht über den Verbrauch des Jahres 2019 in diesem Mitgliedsstaat hinausgehen. Ihr maximaler Anteil muss zwischen dem 31. Dezember 2023 und dem 31. Dezember 2030 stufenweise auf 0 % abgesenkt werden. Des Weiteren werden Biokraftstoffe, die aus Rohstoffen des Anhangs IX Teil B hergestellt werden (gebrauchtes Speiseöl und tierische Fette) nur bis zu maximal 1,7 % angerechnet. Ausnahmen von diesem Wert können bei der EU-Kommission beantragt werden.

Die nationale Umsetzung dieser Richtlinie in Deutschland erfolgt im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [19] sowie den nachgeordneten Bundes-Immissionsschutzverordnungen (BImSchV). Nach § 37a Absatz 4 BImSchG beträgt die mindestens erforderliche THG-Minderung der in Verkehr gebrachten Kraftstoffe ab dem Jahr 2020 6 %, ab 2022 7 %, ab 2023 8 %, ab 2024 9,25 %, ab 2025 10,5 %, ab 2026 12 %, ab 2027 14,5 %, ab 2028 17,5 % ab 2029 21 % und ab 2030 25 %. Biokraftstoffe werden nur angerechnet, wenn gültige Nachweise entsprechend der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung [21] vorliegen. Daneben wurden noch Mindestanteile für fortschrittliche Biokraftstoffe festgelegt, die zunächst nur für Unternehmen gelten, die eine Mindestmenge an Kraftstoff in Verkehr gebracht haben bzw. bringen werden (2021 und 2022 jeweils mindestens 10 PJ; 2023 und 2024 jeweils mindestens 2 PJ). Die Mindestanteile betragen 0,1 % im Jahr 2021, 0,2 % im Jahr 2022, 0,3 % im Jahr 2023, 0,4 % im Jahr 2024, 0,7 % im Jahr 2025, 1,0 % ab dem Jahr 2026, 1,7 % ab dem Jahr 2028 und 2,6 % ab dem Jahr 2030 [17].

Seit 2022 wird der energetische Anteil der Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen zur Erfüllung der THG-Quote gemäß § 13 38. BImSchV [17] auf maximal 4,4 % begrenzt. Abfallbasierte Biokraftstoffe entsprechend der Anlage 4 der 38. BImSchV (gebrauchtes Speiseöl, nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Fette) werden gemäß § 13a der 38. BImSchV bis zu einer Obergrenze von 1,9 % auf die Quotenerfüllung angerechnet. Die Obergrenze für die Anrechenbarkeit von Biokraftstoffen aus Rohstoffen mit einem hohen Risiko, indirekte Landnutzungsänderungen zu verursachen (Palmöl) beträgt entsprechend § 13b 38. BImSchV im Jahr 2022 0,9 % und ab 2023 0 %, sofern sie nicht gemäß Artikel 4 der Verordnung (EU) 2019/807 [33] als Biokraftstoffe mit geringem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen zertifiziert sind, z. B. wenn sie nachweislich aus „zusätzlichen Rohstoffen“ gewonnen wurden. Es herrscht somit derzeit ein begrenztes Ausbaupotenzial für HVO auf Basis der letztgenannten Rohstoffe, wenn diese auf die THG-Emissionen des Sektors Verkehr angerechnet werden sollen.

4.4.4 Treibhausgasminderung für den Sektor Landwirtschaft

Zu den Treibhausgasemissionen des Sektors Landwirtschaft zählen auch die energiebedingten Emissionen, die durch die Verbrennung von Brennstoffen in der Land- und Forstwirtschaft verursacht werden (Quellkategorie 1.A.4.c) [18]. Unabhängig von der THG-Quotenanrechnung für den Verkehrssektor führt für den Sektor Landwirtschaft jeder vermiedene Liter fossilen Kraftstoffs zu einer Treibhausgasreduzierung. Die verursachten Treibhausgasemissionen für die Produktion von HVO werden den für die Produktion verantwortlichen Sektoren des jeweiligen Produktionslands zugeordnet.

4.4.5 Herstellerfreigaben

Viele Hersteller geben seit kurzem Dieselfahrzeuge auch für den Einsatz von 100 % HVO (paraffinischer Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940) frei, überwiegend Neufahrzeuge, teilweise auch Bestandsfahrzeuge. Eine Liste mit Freigaben von Fahrzeugherstellern ist abrufbar auf der Homepage von Neste unter: <https://www.neste.de/neste-my-renewable-diesel/produktinformationen/von-fahrzeugherstellern-freigegeben>. Neste gibt dort an, dass jedes Dieselfahrzeug mit Neste MY Renewable Diesel betankt werden kann, ohne dass der Motor umgerüstet werden muss. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass, wenn bei einem nicht freigegebenen Dieselfahrzeug, für das noch die Herstellergarantie gilt, ein Problem auftritt, das eindeutig auf den Kraftstoff zurückzuführen ist, die Gefahr besteht, dass die Garantieleistung verweigert wird, wenn ein nicht vom Hersteller freigegebener Kraftstoff verwendet wurde [52].

Neben der Frage nach Garantie und Gewährleistung besteht auch eine gewisse Unsicherheit darüber, welche weiteren Folgen es haben kann, wenn die Typgenehmigung der mobilen Maschine lediglich für Dieselkraftstoff nach DIN EN 590 und nicht für paraffinischen Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 vorliegt. Erlischt beispielsweise die allgemeine Betriebserlaubnis oder die Fahrzeugzulassung? Diese Fragestellungen sind bisher ungeklärt und zuständige Stellen zur Klärung konnten während des Projektzeitraums nicht identifiziert werden.

4.4.6 Lagerung und Betankung

Die Anforderungen an die Lagerung und Betankung ergeben sich aufgrund der Gefährdungsmerkmale von HVO. Grundsätzlich ist HVO als Gefahrstoff einzuordnen, jedoch sind in Abhängigkeit vom Hersteller bzw. Lieferanten unterschiedliche Gefahrenausprägungen festzustellen. In Tabelle 3 sind ausgewählte Informationen aus den Sicherheitsdatenblättern von drei HVO-Herstellern bzw. -Lieferanten gegenübergestellt. HVO des Herstellers ENI ist durch einen Flammpunkt von < 60 °C gekennzeichnet, wird daher als entzündbar nach Kategorie 3 der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 eingestuft und muss abweichend vom HVO der anderen Hersteller mit dem GHS-Symbol für entzündbare Stoffe gekennzeichnet werden (GHS = Global Harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien). Auch die Einstufung in die Wassergefährdungsklasse (WGK) 2 ist für das HVO von ENI höher als für die anderen beiden HVO-Kraftstoffe, die lediglich in WGK 1 einzuordnen sind. Herkömmlicher fossiler Dieselkraftstoff wird in WGK 2 und Biodiesel in WGK 1 eingeordnet. Ursache für diese unterschiedliche Einstufung der HVO-Kraftstoffe kann beispielsweise eine andere Zusammensetzung der Kohlenwasserstofffraktionen oder die Verwendung unterschiedlicher Kraftstoffadditive sein.

Tabelle 3: Ausgewählte Informationen aus den Sicherheitsdatenblättern von HVO verschiedener Hersteller [68] [30] [69]

Hersteller/Lieferant	TOOL-FUEL	TotalEnergies	ENI
GHS-Symbole			
Gefahrenhinweise	H304	H304	H304, H226
Flammpunkt	> 61 °C	> 60 °C	< 60 °C
UN-Nummer	1202	1202	1202
Wassergefährdungs- klasse	1	1	2
Abbaubarkeit	schnell abbaubar	leicht biologisch ab- baubar	leicht biologisch ab- baubar

H304 – Kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein.
H226 – Flüssigkeit und Dampf entzündbar.

Da HVO als wassergefährdend eingestuft wird, ergeben sich für Lagerung und Betankung Anforderungen im Sinne des Gewässerschutzes, die im Wasserhaushaltsgesetz (WHG), der Anlagenverordnung wassergefährdende Stoffe (AwSV) [71] und der TRwS 781 [25] definiert sind. Für Eigenverbrauchstankstellen, die häufig in der Landwirtschaft zu finden sind, sind insbesondere die Anforderungen nach der technischen Regel wassergefährdende Stoffe 781 maßgeblich. Grundsätzlich unterscheiden sich die Anforderungen für HVO nicht von denen einer Dieselmotortankstelle.

4.5 Nutzungsbeispiele

Motoren- und Landmaschinenhersteller erteilen seit Kurzem für neuere (teilweise auch für ältere) Modelle Freigaben für die Verwendung paraffinischen Dieselmotortoffs nach DIN EN 15940. Um sicherzugehen, dass ein Fahrzeug für paraffinischen Dieselmotortoff freigegeben ist, muss beim Hersteller angefragt werden. Zwar ist paraffinischer Dieselmotortoff nicht in der 10. BImSchV gelistet und darf folglich in Deutschland nicht an öffentlichen Tankstellen abgegeben werden, kann nach Einschätzung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft von Baden-Württemberg [41] aber in Eigenverbrauchstankstellen für mobile Maschinen und Geräte im Bereich der Land- und Forstwirtschaft bereitgestellt werden (siehe hierzu Abschnitt 4.4.1). Ebenso kann HVO betriebsintern zu Forschungs- und Erprobungszwecken verwendet werden. Es ist geplant, paraffinischen Dieselmotortoff nach DIN EN 15940 in die 10. BImSchV aufzunehmen, sodass der Verkauf an öffentlichen Tankstellen gestattet wäre.

In dem vom StMELF geförderten und vom TFZ durchgeführten Vorhaben „KlimaTrak“ (Förderkennzeichen: G2/KS/18/01) [24] wurden seit Mai 2020 unter anderem zwei neue Valtra-Traktoren, die für HVO freigegeben sind, am Staatsgut Kringell erfolgreich eingesetzt. Darüber hinaus wurden weitere Maschinen an unterschiedlichen Standorten mit HVO erprobt (Kapitel 5).

Am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wurde HVO (C.A.R.E.-Diesel®) im Rahmen des Projekts „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ umfassend auf seine Praxistauglichkeit geprüft [44]. Fahrzeug- und Flottentests mit sechs Lkw, die über 350.000 km zurückgelegt hatten, zeigten keinerlei Probleme in der Anwendung. Weitere Tests und eine Ausweitung der Flotte waren geplant. Versuche mit einem Schienenfahrzeugmotor verliefen ebenfalls positiv.

Das Liebherr-Werk Ehingen GmbH betankt seit Anfang September 2021 seine Mobil- und Raupenkrane sowie fast den gesamten Werksverkehr ausschließlich mit reinem HVO. Daneben soll der Großteil der Produkte der Liebherr-Sparte „Maritime Krane“ zukünftig mit HVO erstbetankt werden. Auch in den Erdbewegungs- und Materialumschlagmaschinen sowie in den Minenfahrzeugen kann HVO zum Einsatz kommen. Die Autoren halten jedoch die flächendeckende Nutzung von HVO in dieser Branche aufgrund des hohen Energiebedarfs und der nur begrenzten Verfügbarkeit des Kraftstoffs in naher Zukunft für nicht realistisch [61].

Gemäß den Angaben auf der Homepage der Firma Liebherr können alle Liebherr-Dieselmotoren in Muldenkippern und Hydraulikbaggern mit bis zu 100 Prozent HVO als Kraftstoff betrieben werden [49].

Die Firma Volvo CE setzt HVO seit 2019 erfolgreich als Kraftstoff im Kundenzentrum ein. Weder Tankanlagen noch Fahrzeuge mussten modifiziert werden. Alle Demonstrationmaschinen fahren mit HVO [72].

Die DEUTZ AG gibt diverse Motor-Baureihen für den Einsatz paraffinischer Dieselkraftstoffe frei [74].

Die Deutsche Bahn gab im März 2022 bekannt, künftig palmölfreies, rest- und abfallstoffbasiertes HVO für die „letzte Meile der Lieferkette“ einzusetzen, um durchgehend klimaneutrale Lieferketten zu ermöglichen. In der Presseinformation heißt es, dass die vorhandene Diesellokflotte der DB Cargo mit dem HVO-Kraftstoff ohne Leistungseinschränkung betrieben werden könne, wie umfangreiche Testreihen ergeben hätten [13].

Darüber hinaus hat die Deutschen Bahn angekündigt, ab sofort 57 Regionalzüge in Baden-Württemberg mit hydriertem Pflanzenöl (HVO) auf Basis von Abfallstoffen zu betreiben [12]. Die Deutsche Bahn sieht die Umstellung als eine sofort umsetzbare Maßnahme, um die Dauer bis zur Elektrifizierung der Fahrstrecken zu überbrücken.

Weitere Firmen, die HVO-Kraftstoff in ihren Fahrzeugflotten einsetzen, sind auf der Internetseite von Neste unter Kundenreferenzen aufgeführt.

5 Praxistest

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden insgesamt zwölf Maschinen mit HVO getestet, zwei davon ausschließlich auf dem Prüfstand. Bei der Beantragung des Vorhabens war geplant, mindestens zwei Traktoren, die vom Maschinenhersteller nicht freigegeben sind, auf einem Standort der Bayerischen Staatsgüter (BaySG) mit HVO zu betreiben. Nachfolgend werden alle bis zum Zeitpunkt der Berichterstellung mit HVO betankten Maschinen der BaySG hinsichtlich der bisherigen Betriebserfahrungen betrachtet. Dabei werden auch Ergebnisse einbezogen, die im Forschungsprojekt „Klimaschutz mit regenerativen Antriebssystemen auf staatlichen Versuchsgütern – KlimaTrak“, gefördert durch das StMELF [32], erzielt wurden.

5.1 Maschinen und Methoden

Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung waren neun mit C.A.R.E.-Diesel betriebene Maschinen auf den BaySG gleichzeitig im Einsatz. Der Valtra VA-V wurde planmäßig gegen einen Valtra VA-V2 ausgetauscht. Die Bezeichnung sowie die technischen Daten der Maschinen sind in Tabelle 4 aufgelistet.

Tabelle 4: Technische Daten der mit HVO betriebenen Maschinen

Kürzel	Hersteller	Model	Abgasstufe	Baujahr	Leistung in kW	Motor
<i>Maschinen, die nachstellerauskunft für HVO freigegeben sind [2] [5]</i>						
VA-V	Valtra	T 214 Direct	V	2020	159	AGCO Power
VA-V2	Valtra	T 215 Direct	V	2021	159	AGCO Power
JD-IV	John Deere	6215 R	IV	2020	159	John Deere
FE-V	Fendt	211 V	V	2021	77	AGCO Power
<i>Maschinen, für die keine HVO-Freigabe vom Fahrzeughersteller vorliegt</i>						
SK-IV	SILOKING	SelfLine 1612	IV	2021	105	Volvo
FE-IV	Fendt	209 S Vario	IV	2020	67	Deutz TCD
FE-IV2	Fendt	312 Vario	IV	2020	93	Deutz TCD
FE-IIIB	Fendt	720 Vario	IIIB	2018	148	Deutz TCD
WE-IIIB	Weidemann	3080	IIIB	2017	56	Deutz TCD
ST-S	Steyr	4075 Kompakt	IIIB	2018	55	FPT Industrial
JD-II	John Deere	6920	II	2004	111	John Deere
FE-0	Fendt	F 370 GTA	0	1997	52	Deutz KHD

Die HVO-Flotte setzt sich demnach aus acht Traktoren (VA-V, VA-V2, JD-IV, FE-IV, FE-IV2, FE-IIIB, JD-II, FE-0), einem selbstfahrenden Futtermischwagen (SK-IV) und einem Hoflader (WE-IIIB) zusammen. Zusätzlich wurden noch zwei Traktoren, ein Fendt 211 V (FE-V) sowie ein Steyr Kompakt 4075 (ST-S), die im Feldeinsatz üblicherweise mit B100 betrieben werden, am Traktorenprüfstand mit HVO gemessen.

Nach Angaben des Kraftstoffproduzenten Neste Oyj sind alle Motoren und Fahrzeuge der Testflotte der Marken John Deere, AGCO, Volvo und Deutz (Modellreihe TCD) für den Kraftstoff freigegeben [52]. Dies heißt jedoch nicht, dass auch die Hersteller ihrerseits Freigaben erteilt haben. So gibt beispielsweise AGCO Fendt gemäß eigener Auskunft nur Traktoren der Abgasstufe V auf Nachfrage für den Betrieb mit paraffinischem Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 frei [5]. John Deere gibt teilweise Traktoren ab Abgasstufe IIIA für den Einsatz von HVO gemäß DIN EN 15940 frei [5]. CNH gibt an, dass keine ihrer Maschinen für HVO freigegeben ist [5]. Beide Valtra-Traktoren der aktuellen (strengsten) Abgasstufe V waren bereits bei der Auslieferung ab Werk, wie bei allen Traktoren von Valtra üblich, mit HVO-Kraftstoff betankt [2]. Gemäß diesen Herstellerinformationen [2] [5] sind nur die Maschinen VA-V, VA-V2, JD-IV und FE-V für den HVO-Betrieb ab Werk zugelassen.

Der genaue rechtlich Status in Bezug auf die Herstellerfreigabe für die älteren Maschinen ist ungeklärt, da erst ab Abgasstufe V die Typgenehmigung für alternative Kraftstoffe gesetzlich vorgeschrieben wurde. Davor erfolgte die Typprüfung ausschließlich mit Dieselkraftstoff. Die restlichen Maschinen FE-IV, FE-IV2, FE-IIIB, WE-IIIB, JD-II und FE-0, bei denen keine explizite Herstellerfreigabe vorliegt, wurden Anfang des Jahres 2022 von Diesel auf HVO umgestellt. Die beiden neueren Maschinen der Abgasstufe IV, der Traktor JD-IV und der Futtermischwagen SK-IV, fahren bereits seit kurz nach der Auslieferung in den Jahren 2020 bzw. 2021 mit HVO-Kraftstoff.

Alle zehn Maschinen im Feldtest tankten somit bis zum Juli 2022 mindestens ein halbes Jahr ausschließlich den HVO-Kraftstoff C.A.R.E-Diesel und absolvierten in diesem Zeitraum insgesamt rund 2.500 Betriebsstunden. Die Landmaschinen befinden sich auf insgesamt fünf Standorten der BaySG im Praxiseinsatz, nämlich Kringell (VA-V, VA-V2, WE-IIIB, FE-IIIB), Grub (JD-IV, JD-II), Schwarzenau (FE-IV), Schwaiganger (FE-IV2) und Freising (FE-0). Die BaySG planen, die Maschinen auch weiterhin mit HVO zu betreiben. Abbildung 12 zeigt vier Traktoren und Abbildung 13 einen Futtermischwagen sowie einen Hoflader, die mit HVO-Kraftstoff auf unterschiedlichen Betrieben der BaySG getestet werden.



Abbildung 12: HVO-betriebene Traktoren VA-V2 (oben links), Traktor FE-III B (oben rechts), Traktor JD-IV (unten links), Traktor FE-IV (unten rechts) auf Betrieben der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)



Abbildung 13: HVO-betriebener Futtermischwagen SK-IV (links) und Hoflader WE-III B (rechts) auf Betrieben der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)

5.2 Ergebnisse

Anhand von Gesprächen mit den Betreibern und Aufzeichnungen in Betriebstagebüchern bei ausgewählten Traktoren wurde das Betriebsverhalten im täglichen Einsatz ermittelt. Dadurch soll die Zuverlässigkeit beurteilt und mögliche technische Schwachstellen der Traktoren erkannt werden. Darüber hinaus wurden Motorölanalysen durchgeführt, die Aufschluss über den möglichen Einfluss des HVO-Betriebs auf die Schmierölqualität sowie den Motorverschleiß geben können. Die BaySG wurden zudem bei der Einrichtung von Hoftankstellen sowie bei der Beschaffung des HVO-Kraftstoffs C.A.R.E.-Diesel und der Kraftstoffqualitätssicherung unterstützt. Schließlich wurden im Forschungsprojekt „Klima-Trak“ [32] ermittelte Ergebnisse aus Abgas- und Leistungsmessungen aufgenommen.

Betriebsverhalten

Während des Betrachtungszeitraums arbeiteten die HVO-Maschinen zuverlässig im täglichen Praxiseinsatz. Es kam zu keinen gravierenden Problemen, die längere Ausfallzeiten zur Folge gehabt hätten.

Eine Störung ereignete sich am Hoflader Weidemann 3080 (WE-IIIB) im Kraftstoffniederdrucksystem. Der Betreiber berichtete, dass wenige Wochen nach der Umstellung von Diesel auf HVO aus dem Gehäuse der Kraftstoffförderpumpe (Abbildung 14) Kraftstoff ausgetreten sei. Aufgrund der geringen Teilekosten von unter 100 € wurde das Bauteil vom Händler vorsorglich getauscht.



Abbildung 14: Kraftstoffpumpe des Hofladers Weidemann 3080 (WE-IIIB)

Ein Testlauf am TFZ mit der ausgetauschten Pumpe zeigte, dass diese funktionstüchtig und auch dicht war. Die Kraftstoffleckage kann deshalb mit großer Wahrscheinlichkeit auf eine Undichtigkeit bei der Verbindung von Pumpe und Kraftstoffschlauch zurückgeführt werden. Beim Einbau der neuen Pumpe in den Hoflader wurde diese Verbindung neu abgedichtet. Da der Kraftstoffschlauch nicht porös war, wurde er wiederverwendet. Ein Tausch der Pumpe wäre somit nicht notwendig gewesen.

Undichtigkeiten von Elastomeren im Kraftstoffsystem, die nach der Umstellung auf HVO durch Auswaschung von im Dieselbetrieb angereicherten Aromaten oder durch unterschiedliches Quellverhalten hervorgerufen werden können, sind aus der Literatur bekannt (Abschnitt 4.3.2). Andere, eventuell durch HVO bedingte Störungen, wie beispielsweise

Verstopfung von Kraftstofffiltern infolge abgelöster Ablagerungen im Kraftstoffsystem, wurden in der Testflotte nicht beobachtet.

Es ist bekannt, dass (unzureichend additiviertes) HVO weniger schmierfähig sein kann als (additivierter) fossiler Dieselmotorkraftstoff nach DIN EN 590 (Abschnitt 4.3.2). Dies kann möglicherweise zum verstärkten Abrieb in kraftstoffführenden Komponenten und in der Folge zu leicht erhöhten Verschleißmetallgehalten im Motoröl führen. Allerdings werden, wie bei Dieselmotorkraftstoff auch, dem HVO-Kraftstoff Komponenten zur Verbesserung der Schmierfähigkeit zugesetzt. Gemäß Tabelle 5 belegen die durchgeführten Motorölanalysen nur geringe Konzentrationen der Verschleißelemente Eisen, Chrom, Zinn, Aluminium, Nickel, Kupfer und Blei im Motorenöl. Die Gehalte liegen alle unterhalb der Grenz- bzw. Warnwerte, die das Analyselabor dafür angibt. Allerdings waren die Laufzeiten der Motoröle zum Teil recht kurz, sodass davon ausgegangen werden muss, dass für einzelne Verschleißmetalle bei voller Laufzeit eines üblichen Motorölwechselintervalls Warnwerte überschritten worden wären.

Insgesamt können keine kritische Motorölverdünnung und kein auffälliger Verschleiß anhand der Motorölanalysen festgestellt werden. Der Kraftstoffgehalt im Motoröl liegt bei allen Proben unterhalb von 0,1 % und ist daher vernachlässigbar gering. Auch alle übrigen ermittelten Motorölkennwerte zu Verunreinigungen und Motorölalterung liegen innerhalb der zulässigen oder erwarteten Wertebereiche.

Tabelle 5: Verschleißmetalle im Motorenöl beim Betrieb verschiedener Maschinen mit HVO

Maschine	Warnwerte ¹⁾	SK-IV	FE-IIIB	VA-V2	FE-IV	FE-IV2	VA-V
<i>Laufzeit der Maschine bzw. Laufzeit des Motoröls in Betriebsstunden (Bh)</i>							
Laufzeit des Motoröls		48	95	151	367	390	420
Gesamtlaufzeit der Maschine		48	2.895	151	367	898	919
<i>Verschleißmetalle in mg/kg</i>							
Eisen	80–180	13	11	12	14	7	10
Chrom	4–28	0	1	0	0	0	1
Zinn	12–24	0	0	0	1	1	0
Aluminium	12–55	1	12	0	1	1	1
Nickel	1–5	0	0	0	0	0	0
Kupfer	25–60	17	1	24	2	1	12
Blei	10–30	0	0	6	4	3	4

¹⁾ Bereich von Warnwerten, angegeben von der Firma Oelcheck [56]

Hoftankstellen und Kraftstoffqualität

Für die Versorgung der Maschinen auf den verschiedenen Standorten der BaySG mit C.A.R.E.-Diesel wurden unterschiedliche Eigenverbrauchstankstellen eingerichtet. Am Standort Grub wird ein vorhandener, 10.000 Liter fassender doppelwandiger Erdstahltank genutzt, der zuvor mit Dieselkraftstoff gefüllt war. In Schwaiganger und Kringell wurden oberirdische doppelwandige Tanks mit 3.000 bzw. 10.000 l Fassungsvermögen neu beschafft und jeweils in einer Maschinenhalle aufgestellt. Abbildung 15 zeigt die HVO-Tankstelle des Herstellers Piusi am Standort Kringell, die aus einem doppelwandigen Stahlbehälter und einer Zapfsäule besteht.



Abbildung 15: HVO-Tankstelle am Standort Kringell der Bayerischen Staatsgüter (BaySG)

Die Tanks wurden mit paraffinischem Dieselkraftstoff nach DIN EN 15940 befüllt. Zur Qualitätssicherung wurden Proben bei der Anlieferung des Kraftstoffs aus dem Tankwagen oder nach der Anlieferung aus dem Zapfhahn der Hoftankstellen gezogen. Die Analyseergebnisse der HVO-Kraftstoffchargen sowie die Grenzwerte gemäß DIN EN 15940 sind in Tabelle 6 aufgelistet. Die Grenzwerte der DIN EN 15940 werden überwiegend eingehalten. Nur bei den Probenchargen HVO III und HVO IV wurde der Grenzwert der Gesamtaromaten von 1,1 % überschritten. Die Probenahme erfolgte bei den beiden Proben aus der Hoftankstelle. Vermutlich wurde das nahezu aromatenfreie HVO bei der Kraftstoffumstellung im Lagertank durch eine Restmenge aromatenhaltigen Diesels verunreinigt. Diese Annahme begründet sich dadurch, dass die normkonformen Proben HVO I und HVO II, die direkt vom Tankwagen entnommen wurden, keine Verunreinigung mit Aromaten aufwiesen. Aus technischer Sicht ist der geringfügig höhere Aromatengehalt ohne Bedeutung. Die angelieferten HVO-Chargen wiesen keine Qualitätsmängel auf.

Tabelle 6: *Eigenschaften des verwendeten C.A.R.E.-Diesels aus Rest- und Abfallstoffen (HVO gemäß DIN EN 15940) verschiedener Chargen (Werte in Fettdruck kennzeichnen eine Grenzwertüberschreitung)*

Prüfparameter	Kraftstoffproben				Grenzwert DIN EN 15940		Einheit
	HVO I	HVO II	HVO III	HVO IV	min.	max.	
Charge							
Probenahmestelle	Tankwagen		Hoftankstelle				
Cetanzahl (ICZ ¹⁾)	75	76	77	78	70		--
Dichte (15 °C)	781	781	784	782	765	800	kg/m ³
Flammpunkt	84	89	83	83	55	–	°C
Kin. Viskosität ²⁾ (40 °C)	3,0	3,0	3,0	3,0	2	4,5	mm ² /s
Destillationsvol. bei 250 °C	3,4	3,4	4,3	3,6	–	65	% (V/V)
Destillationsvol. bei 350 °C	> 98	> 98	> 98	99	85	–	% (V/V)
95 %-Punkt bei	294	296	297	307	–	360	°C
HFRR (Schmierfähigk. 60 °C)	350	380	390	360	–	460	µm
FAME-Gehalt	< 0,1	< 0,1	0,4	0,2	–	7	% (V/V)
Mangangehalt	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	–	2	mg/l
Gesamtaromatengehalt	< 0,5	0,6	2,0	1,2	–	1,1	% (m/m)
Schwefelgehalt	<5(<1)	<5(<1)	<5(<1)	<5(<1)	–	5	mg/kg
Koksrückstand (10 % D. ³⁾)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	–	0,30	% (m/m)
Aschegehalt (775 °C)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	–	0,01	% (m/m)
Wassergehalt	< 31	< 30	< 30	< 30	–	200	mg/kg
Gesamtverschmutzung	< 12	< 12	< 12	< 12	–	24	mg/kg
Korrosionswirkung auf Kupfer	1	1	1	1	–	Klasse 1	Kor.grd ⁴⁾
Oxidationsstabilität	44	> 48	> 48	> 48	20	–	h
CFPP ⁵⁾	-32	-22	-34	-33	–	-20	°C

¹⁾ ICZ = Indizierte Cetanzahl

²⁾ Kin. Viskosität = Kinematische Viskosität

³⁾ 10 % D. = aus 10 % Destillationsrückstand

⁴⁾ Kor.grd = Korrosionsgrad

⁵⁾ CFPP = Cold Filter Plugging Point

Abgas- und Leistungsmessungen

Am Traktorprüfstand des TFZ wurden im Forschungsprojekt „KlimaTrak“ Leistungs- und Abgasmessungen an mit HVO betriebenen Traktoren durchgeführt. Die Beschreibung des Prüfstands, der Messgeräte, der Fahrzyklen und der Vorgehensweise erfolgt bei Ettl et al. (2023) [32] und Ettl (2021) [31]. Abbildung 14 zeigt den Traktor VA-V am Prüfstand des TFZ. Die Ergebnisse der Abgasmessungen an den zwei Valtra-Traktoren und dem Fendt 211 V (alle Abgasstufe V) sowie dem Steyr Kompakt 4075 (Abgasstufe IIIB) belegen, dass bei den Abgaskomponenten Stickstoffoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC) und Partikelmasse (PM) kaum Unterschiede zwischen paraffinischem und konventionellem Dieselmotorkraftstoff bestehen.

Abbildung 17 zeigt exemplarisch die Konzentrationen von NO_x , CO, HC und PM des Valtra Traktors VA-V im stationären (NRSC) und transienten Fahrzyklus (NRTC) mit HVO und Diesel bei wiederkehrenden Messungen. Es sind weder zwischen den Kraftstoffen noch bei unterschiedlichen Betriebsstundenständen relevante Unterschiede erkennbar. Lediglich die PM ist erwartungsgemäß unter transienten Bedingungen etwas höher, unabhängig vom verwendeten Kraftstoff. Die Abgasgrenzwerte der Abgasstufe V werden durchweg eingehalten. Auch die hier nicht dargestellten Abgasemissionen im realen Fahrbetrieb sind selbst bei ungünstigen Bedingungen (Straßentransport) mit beiden Kraftstoffen auf ähnlich niedrigem Niveau [32].



Abbildung 16: HVO-betriebener Valtra-Traktor (VA-V) am Prüfstand des TFZ bei Abgas- und Leistungsmessungen

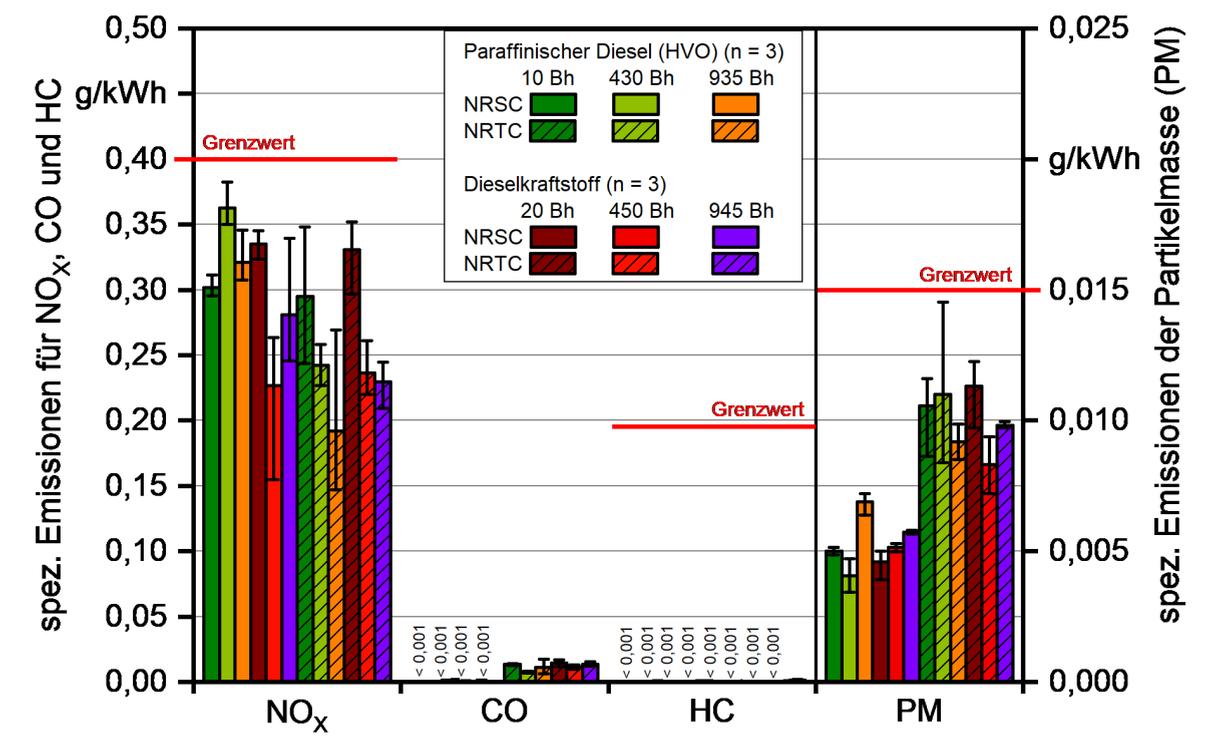


Abbildung 17: NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen des Traktors Valtra T214 (VA-V) beim stationären Fahrzyklus (NRSC) und transienten Fahrzyklus (NRTC) mit paraffinischem (HVO) und konventionellem Diesekraftstoff

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse wiederkehrender Leistungsmessungen am Traktor Valtra T214 (VA-V) mit Diesel und HVO über den Drehzahlverlauf im Motorkennfeld dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Motordrehmoment und Zapfwellenleistung mit Diesel geringfügig höher liegen als mit HVO. Dies ist auf den etwas höheren volumenbezogenen Energiegehalt von Diesel zurückzuführen, was sich auch in einem etwas geringeren volumenbezogenen Kraftstoffverbrauch zeigt. Aufgrund der Dichteunterschiede der beiden Kraftstoffe ist jedoch der massenbezogene Kraftstoffverbrauch von HVO geringer als mit Diesel. Der Wirkungsgrad an der Zapfwelle ist mit beiden Kraftstoffen über alle Messungen hinweg gleich. Die Harnstofflösung („AdBlue“) dient zur Minderung von NO_x-Emissionen im SCR-Abgaskatalysator. Der Verbrauch ist abhängig von der NO_x-Konzentration im Abgas vor dem Katalysator (Rohabgas). In Abbildung 18 zeichnet sich ein etwas geringerer Verbrauch an Harnstofflösung beim Einsatz von HVO ab, was auf leicht niedrigere NO_x-Emissionen im Rohabgas im Vergleich zu Diesel hindeuten könnte.

Das Ergebnis von Untersuchungen an älteren Motorengenerationen aus der Literatur (Abschnitt 4.3.3), wonach sich mit HVO gegenüber Diesel Leistung, Motorwirkungsgrad sowie die NO_x-, CO-, HC- und PM-Emissionen verbessern, konnte hier nicht beobachtet werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei dem Valtra-Traktor der Abgasstufe V keine erheblichen Unterschiede hinsichtlich, Abgasemissionen, Leistung und Verbrauch zwischen HVO und Diesel erkennbar sind. Gleiches gilt auch für weitere Traktoren, die am TFZ im Forschungsprojekt „KlimaTrak“ mit HVO und Diesekraftstoff gemessen wurden.

6 Meinungsbild

Für die Einholung eines Meinungsbilds zur Akzeptanz von HVO aus Rest- und Abfallstoffen wurden 24 Beschäftigte der bayerischen Landwirtschaftsverwaltung befragt. Von den Befragten haben elf eine leitende Funktion („Führungskraft“), 13 Personen werden als „Fachkraft“ eingestuft. Die Interviews wurden telefonisch von Mitarbeitern des TFZ geführt. Als Vorlage diente ein vom TFZ erstellter schriftlicher Fragebogen (Anhang 1).

Zu Beginn wurde gefragt, ob der Kraftstoff HVO bekannt ist. Daraufhin informierte der Interviewende über die wichtigsten Fakten zu HVO und wies darauf hin, dass alle Fragen sich auf palmölfreies HVO aus Rest- und Abfallstoffen beziehen. Im Anschluss sollte der Befragte Kraftstoffe bzw. Antriebe auswählen, die seiner Meinung nach für einen klimafreundlichen Betrieb von Maschinen der staatlichen Versuchsbetriebe geeignet sind, und auch einen Favoriten benennen. Des Weiteren wurde gefragt, wie viele Kraftstoffe gleichzeitig auf einem Betrieb gut handhabbar seien. Dann folgten 15 Aussagen über HVO, die die Befragten mit einer fünfstufigen Bewertungsskala bejahen oder verneinen konnten. Die Antwortmöglichkeit „weiß ich nicht“ konnte ebenfalls gewählt werden. Abschließend konnten die Befragten aus ihrer Sicht Relevantes zum Thema HVO bzw. zum Einsatz regenerativer Antriebe in Land- und Forstmaschinen der Staatsverwaltung anmerken.

Ergebnis der Befragung

Die Frage „Kennen Sie hydriertes Pflanzenöl, das auch HVO genannt wird?“ wurde von zwei Drittel der Befragten mit „ja“ beantwortet. Die Führungskräfte sind im Vergleich zu den Fachkräften weniger mit dem Begriff HVO vertraut. Abbildung 19 zeigt die Antworten aller Befragten insgesamt (links), der Fachkräfte (Mitte) sowie der Führungskräfte (rechts).



Abbildung 19: Antworten auf die Frage „Kennen Sie hydriertes Pflanzenöl, das auch HVO genannt wird?“ (24 Befragte, davon 13 Fach- und 11 Führungskräfte)

Abbildung 20 zeigt, wie häufig verschiedene vorgegebene Kraftstoffe (inkl. Elektroantrieb) als gute Antriebsoptionen für die land- und forstwirtschaftlichen Betriebe genannt wurden, sowohl von allen Befragten als auch getrennt nach Fach- und Führungskräften. Mehrfachnennungen waren möglich. Mit insgesamt 22 bzw. 20 Stimmen wurden HVO und Pflanzenöl am häufigsten als gute Kraftstoffalternativen genannt. Der Elektroantrieb wird noch von 15 Teilnehmern als gute Option angesehen, allerdings mit der Einschränkung, dass dieser nur eine gute Alternative für kleinere Fahrzeuge am Betrieb, wie z. B. Lader oder Gabelstapler darstellt, nicht aber für große Schlepper. Auch FAME (Biodiesel) ist für über die Hälfte der Befragten eine gute Alternative zu Diesel. Ein Vergleich der Antworten von Führungskräften und Fachkräften zeigt, dass die Führungskräfte alle alternativen Antriebsoptionen ähnlich oft nennen, wohingegen die Fachkräfte HVO und Pflanzenöl am häufigsten als gute Optionen sehen, gefolgt von Elektroantrieb und FAME. Auf Bio-CNG, Bio-LNG und Wasserstoff entfielen jeweils nur zwei Stimmen. Für eine Führungskraft ist auch fossiler Dieselmotorkraftstoff eine gute Option.

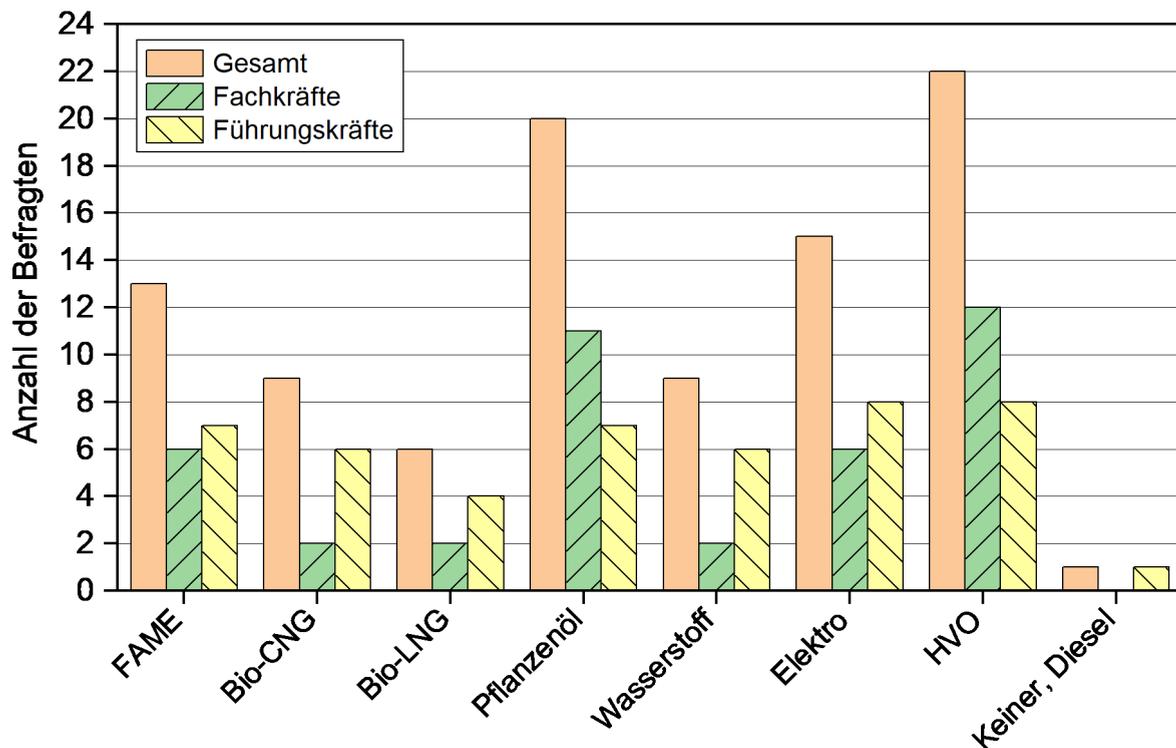


Abbildung 20: Antworten auf die Frage „Welcher Kraftstoff stellt für Sie eine gute Option für den klimafreundlichen Betrieb von Traktoren der staatlichen Versuchsbetriebe dar?“ (24 Befragte, davon 13 Fach- und 11 Führungskräfte)

Bei der Wahl eines Favoriten wurde am häufigsten HVO (zwölf Befragte), gefolgt von Pflanzenöl (acht Befragte) und FAME (sechs Befragte) genannt. Fachkräfte wählten HVO und Pflanzenöl zu ihren Favoriten, Führungskräfte HVO und FAME. Zwei Befragte gaben keinen Favoriten an, da sie auf einen Kraftstoffmix zum Erreichen der Klimaziele setzen.

Ein Befragter favorisierte weiterhin Diesel als Kraftstoff für die Maschinen der Versuchsgüter.

Auf die Frage, wie viele verschiedene Kraftstoffe sie auf ihrem Betrieb maximal gleichzeitig einsetzen würden, antworteten 11 von 24 Befragten mit zwei, gefolgt von einer oder drei Kraftstoffsorten. Keiner würde mehr als drei Kraftstoffe am Betrieb einsetzen wollen. Eine Ladestation für Elektrofahrzeuge wurde bei dieser Frage nicht mitgezählt.

Die Ergebnisse von zwölf Aussagen und drei zusammenfassenden Fragen zu HVO aus Rest- und Abfallstoffen sind in Abbildung 21 dargestellt. Die Aussagen und Fragen können auch dem Fragebogen in Anhang 1 entnommen werden. Es zeigt sich, dass HVO überwiegend als umweltfreundlich eingestuft wird. 96 % der Befragten stimmten der Aussage voll oder eher zu, dass HVO zum Klimaschutz beiträgt (Nr. 2), 79 % halten HVO nicht oder eher nicht schädlich für die Umwelt (Nr. 6) und 63 % sind ganz oder eher der Meinung, dass die Luftschadstoffemissionen durch HVO reduziert werden (Nr. 7).

HVO wird überwiegend als gut verträglich für neue Fahrzeuge und Maschinen (Nr. 3) angesehen. Bei den Bestandsfahrzeugen (Nr. 4) waren die Aussagen vorsichtiger, so sprach sich ein höherer Anteil für „eher gut verträglich“ aus oder zeigte sich unentschlossen. 75 % der Befragten stimmten auch der Aussage voll oder eher zu, dass ein Mehrpreis von 20 ct/l für die Versuchsbetriebe akzeptabel sei (Nr. 5) und der Freistaat Bayern seiner Vorbildfunktion beim Klimaschutz durch die Nutzung von HVO gerecht werde (Nr. 11). Drei Personen meinen jedoch, dass der Freistaat so eher nicht oder gar nicht seiner Vorbildfunktion beim Klimaschutz gerecht wird.

Ob die heimische Landwirtschaft von Herstellung und Nutzung von HVO profitiert, wird sehr unterschiedlich eingeschätzt (Nr. 1). Zwei Drittel der Befragten sehen ein Versorgungsproblem („ja“ oder „eher ja“), wenn HVO nicht in Deutschland produziert wird (Nr. 9). Die Meinungen zu der Aussage gehen auseinander, ob HVO vorrangig in der Luftfahrt eingesetzt werden soll (Nr. 8). Auch sind sich die Befragten uneins, ob HVO mit Biodiesel um die gleichen Rohstoffe konkurriert (Nr. 10).

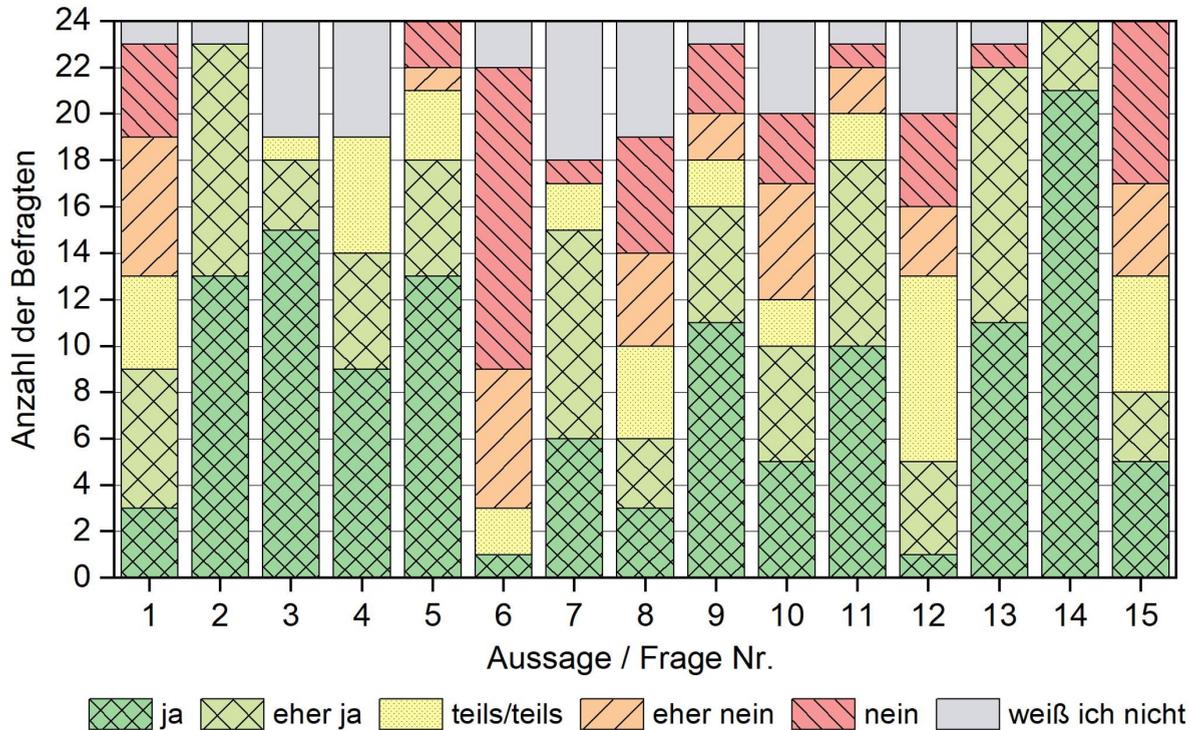
Die Aussage „HVO sollte der bevorzugte Kraftstoff für alle Betriebe sein.“ (Nr. 12) wird am häufigsten mit „teils/teils“ beantwortet (33 %). HVO stellt für viele einen Bestandteil des zukunftsfähigen Kraftstoffmixes dar und wird weniger als alleinige oder beste Alternative angesehen.

Auf die Frage „Ist HVO Ihrer Meinung nach eine nachhaltige Alternative zum Dieselmotorkraftstoff?“ (Nr. 13) antworteten 22 der 24 Befragten mit „ja“ und „eher ja“.

Die Frage Nr. 14 „Würden Sie HVO in Maschinen mit Freigabe durch den Hersteller tanken?“ wird von allen Teilnehmern mit „ja“ oder „eher ja“ beantwortet. Es liegen also kaum Bedenken für die Verwendung von HVO als Kraftstoff in freigegebenen Maschinen vor.

Bei der letzten Frage Nr. 15 „Würden Sie HVO in älteren Maschinen tanken, auch wenn keine Freigabe durch den Hersteller besteht?“ waren die Meinungen wieder geteilt. Die Führungskräfte sind eindeutig vorsichtiger beim Gebrauch ohne Freigabe, denn keiner hat diese Frage mit „ja“ oder „eher ja“ beantwortet. Die Fachkräfte hingegen haben weniger

Bedenken: 26 % beantworteten diese Frage mit „ja“ und „eher ja“. Die detaillierten Antworten, differenziert nach Führungs- und Fachkräften, können Anhang 2 und Anhang 3 entnommen werden.



Liste der Aussagen / Fragen nach Nummer:

- 1 Die heimische Landwirtschaft profitiert von der Herstellung und Nutzung von HVO.
- 2 Die Verwendung von HVO trägt zum Klimaschutz bei.
- 3 Der Kraftstoff HVO ist gut verträglich für neue Fahrzeuge und Maschinen.
- 4 Der Kraftstoff HVO ist gut verträglich für Bestandsfahrzeuge.
- 5 Ein Mehrpreis von HVO gegenüber Diesel von 20 Cent/l ist für die Versuchsbetriebe akzeptabel.
- 6 Der Kraftstoff HVO ist für die Umwelt schädlich.
- 7 Der Kraftstoff HVO reduziert Luftschadstoffemissionen.
- 8 Der Kraftstoff HVO soll künftig vorrangig in der Luftfahrt eingesetzt werden.
- 9 Ich sehe ein Versorgungsproblem, wenn HVO nicht in Deutschland produziert wird.
- 10 Der Kraftstoff HVO konkurriert um die gleichen Rohstoffe wie Biodiesel.
- 11 Mit der Nutzung von HVO wird der Freistaat Bayern seiner Vorbildfunktion beim Klimaschutz gerecht.
- 12 HVO sollte der bevorzugte Kraftstoff für alle landwirtschaftlichen Betriebe sein.
- 13 Ist HVO Ihrer Meinung nach eine nachhaltige Alternative zum Dieselmotorkraftstoff?
- 14 Würden Sie HVO in Maschinen mit Freigabe durch den Hersteller tanken?
- 15 Würden Sie HVO in älteren Maschinen tanken, auch wenn keine Freigabe durch den Hersteller besteht?

Abbildung 21: Einschätzungen von 24 Befragten zu 15 Aspekten der Nutzung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen (Fragebogen in Anhang 1)

Im Folgenden werden die wichtigsten Kommentare und Bemerkungen aus den Interviews sinngemäß aufgeführt:

- Die Nutzung von Rest- und Abfallstoffen für HVO wird grundsätzlich als positiv bewertet, HVO aus Palmöl erreicht dagegen keine hohe Akzeptanz.
- Der Energieaufwand für die Herstellung und Verteilung von HVO ist wichtig, um die Nachhaltigkeit des Kraftstoffs zu bewerten.
- Rund die Hälfte der Befragten betonte während des Interviews, dass ein Kraftstoffmix zum Erreichen der Klimaziele wichtig sei. Pflanzenölkraftstoff ist für Landwirte eine gute Alternative, HVO ein guter Schritt in die richtige Richtung.
- HVO hat den großen Vorteil, dass keine aufwendigen technischen Anpassungen an den Maschinen notwendig sind.
- Manchen Befragten fehlen Erfahrungswerte bei der Verwendung von HVO. Es sei beispielsweise noch zu wenig über das Abgasverhalten beim HVO-Betrieb bekannt.
- Mehrfach wurde erwähnt, dass die Energiewende rasch umgesetzt werden müsse und ein schnelles Handeln erforderlich sei.
- Umfrageteilnehmer, die über Praxiserfahrungen mit HVO verfügten, berichteten, dass diese sowohl bei Alt- als auch bei Neumaschinen durchweg positiv seien.
- Die BaySF geben zu bedenken, dass sie mit ihren Fahrzeugen vor allem auf öffentliche Tankstellen angewiesen seien.
- Als problematisch werden der Bezug und die hohen Kosten von HVO angesehen.

Fazit

Die Befragten der Bayerischen Staatsverwaltung haben überwiegend eine positive Meinung zu HVO, vor allem hinsichtlich des Nutzens für den Klima- und Umweltschutz. Auch ist das Vertrauen in die Funktionstüchtigkeit mit HVO betriebener Maschinen sehr hoch, sofern Herstellerfreigaben vorliegen. Ohne Freigaben der Landtechnikhersteller herrscht vor allem bei den Führungskräften eher Skepsis. Auch wenn HVO, gefolgt von Pflanzenöl, Elektroantrieb und Biodiesel, zu den am meisten favorisierten Kraftstoffen bzw. Antrieben für Land- und Forstmaschinen gehört, wird es nur als eine Option unter mehreren verstanden. Als Nachteile werden am häufigsten mögliche Versorgungsengpässe und höhere Preise genannt. Die Mehrheit der Befragten ist positiv gegenüber HVO eingestellt, nur vereinzelt sind ablehnende Haltungen vorhanden.

7 Bewertung und Handlungsempfehlung

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln werden nachfolgend die Vor- und Nachteile sowie die Chancen und Risiken beim Einsatz von HVO-Kraftstoff aus Rest- und Abfallstoffen diskutiert. Dies kann als Entscheidungshilfe dienen, ob Land- und Forstmaschinen der Bayerischen Staatsverwaltung auch auf HVO neben weiteren erneuerbaren Energieträgern umgestellt werden sollen, um das Ziel einer klimaneutralen Staatsverwaltung bis 2028 gemäß Bayerischem Klimaschutzgesetz zu erreichen. Zur Beurteilung sind technische, ökologische, ökonomische sowie gesellschaftliche, rechtliche und politische Aspekte in Betracht zu ziehen. In Unterkapitel 7.1 werden zunächst Arbeiten aus der Literatur dargestellt, in denen HVO-Kraftstoff meist zusammen mit weiteren Kraftstoffoptionen anhand unterschiedlicher Kriterien bewertet wird. Anschließend erfolgt in Unterkapitel 7.2 eine eigenständige Analyse, die konkreter die Situation der Staatsbetriebe berücksichtigt.

7.1 Bewertung von HVO in der Literatur

In der KTBL-Schrift 519 „Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen“ [63] wird ein umfassender Überblick über den Stand der Entwicklung alternativer Kraftstoffe und Antriebssysteme für Landmaschinen gegeben. Dabei erfolgt auch eine Bewertung der Antriebsoptionen anhand von 21 Kriterien. Tabelle 7 zeigt einen Ausschnitt dieser Bewertungsmatrix für Antriebe mit Verbrennungsmotor und die Kraftstoffe HVO aus Palmöl, HVO aus Altspeiseölen und Fettsäureresten, Dieselkraftstoff, Rapsölkraftstoff, Biodiesel aus Rapsöl und Biodiesel aus Altspeiseölen und Fettsäureresten sowie einen batterieelektrischen Antrieb (Elektromotor mit Akku), gespeist mit Strom aus regenerativen Energien.

Demnach zeichnet sich HVO durch sehr günstige chemische und physikalische Eigenschaften, wie Cetanzahl, Temperaturverhalten und Viskosität aus. Generell besitzt HVO ähnliche Eigenschaften wie Dieselkraftstoff und kann deshalb in marktüblichen Dieselmotoren ohne Umrüstung verwendet werden. Lediglich die geringere Dichte kann Anpassungen der Motorsteuerung erforderlich oder empfehlenswert machen [63]. HVO ist bereits am Markt verfügbar und kann auch kurzfristig eingesetzt werden. Allerdings sind die Mengen begrenzt und reichen nicht für eine Umstellung der gesamten Land- und Forstwirtschaft oder anderer Sektoren im großen Stil aus. Die Energie- und THG-Bilanzen von HVO variieren je nach verwendetem Rohstoff stark. Am günstigsten ist die Nutzung von Abfall- und Reststoffen, da für sie der Aufwand bei der Rohstoffbereitstellung unberücksichtigt bleibt. Die Herstellungskosten sind in hohem Maße von den Rohstoffkosten und dem Wasserstoffbedarf abhängig. Zwar fällt kein Mehrpreis bei der Maschinenanschaffung an, aber der Marktpreis für HVO liegt meist höher als für andere flüssige Biokraftstoffe, wie z. B. Rapsölkraftstoff oder Biodiesel. Von Nachteil ist auch, dass bei der Erzeugung kaum Möglichkeiten zur Erhöhung der regionalen Wertschöpfung und Selbstversorgung in der Landwirtschaft gegeben sind. Die gesellschaftliche Akzeptanz von HVO auf Basis von Palmöl wird als gering, auf Basis von Rest- und Abfallstoffen als hoch eingeschätzt. Die zugrunde gelegten Kriterien werden wie die Bewertungen selbst in [63] näher erläutert.

Tabelle 7: Bewertung von Antriebssystemen und Energieträgern für die Nutzung in landwirtschaftlichen Maschinen [63]

Kriterium	Dieselmotortreibstoff	Rapsölmotortreibstoff	Biodiesel aus Rapsöl	Biodiesel aus Altspeiseölen	HVO aus Palmöl	HVO aus Altspeiseölen und Fettsäureresten	Elektromotor mit Akkumulatoren Strom regenerativ
Chemische und physik. Eigenschaften des Energieträgers, Rot: sehr ungünstig; Grün: sehr günstig	+	0	+	+	++	++	1)
Verfügbarkeit der Rohstoffe bzw. der elektrischen Energie Rot: stark limitiert; Grün: nicht limitiert	+	0	0	0	0	0	+
Wertigkeit von Koppelprodukten Rot: niedrig; Grün: hoch	++	++	++	0	0	0	1)
Verfügbarkeit Technologie der Energieträgerbereitstellung Rot: nicht verfügbar; Grün: verfügbar	++	++	++	++	+	+	++
Zeitschiene Rot: nicht kurzfristig umsetzbar; Grün: kurzfristig umsetzbar	++	++	++	++	+	+	+
Energieeffizienz Energieträgerbereitstellung Rot: niedrig; Grün: hoch	+	+	0	+	-	+	++
Wirkungsgrad Antriebssystem Rot: niedrig; Grün: hoch	-	-	-	-	-	-	++
Treibhausgasemissionen Rot: hoch; Grün: niedrig	--	+	+	++	0	++	+
Lokale Schadstoffemissionen Rot: hohe Belastung; Grün: keine Belastung	0	0	0	0	0	0	++
Klassifizierung als Gefahrstoff Rot: viele Warnhinweise; Grün: keine Warnhinweise	--	++	++	++	--	--	1)
Vorbeugender Boden- und Gewässerschutz Rot: hohe Gefährdung; Grün: niedrige Gefährdung	--	++	+	+	+	+	++
Qualitätssicherung/Normen Rot: nicht vorhanden; Grün vollständig vorhanden	++	++	++	++	++	++	1)
Infrastruktur für Betankung oder Laden Rot: nicht vorhanden; Grün: flächendeckend vorhanden	++	+	0	0	0	0	+
Betankung oder Ladevorgang; Rot: langsam, geringe Energiemenge; Grün: schnell, große Energiemenge	++	++	++	++	++	++	--
Energiespeicherkapazität Rot: gering; Grün: hoch	++	++	++	++	++	++	--
Verfügbarkeit am Markt rot: kein Angebot; Grün: großes Angebot vorhanden	++	0	0	0	0	0	+
Investitions- und Betriebskosten Rot: hoch; Grün: niedrig	++	+	+	+	0	0	0
Regionale Wertschöpfung und Selbstversorgung Rot: nicht machbar; Grün: gut machbar	--	++	+	--	--	--	++
Rechtliche Rahmenbedingungen Rot: nicht förderlich; Grün: stark förderlich	-	0	0	0	-	0	0
Akzeptanz beim Anwender Rot: niedrig; Grün: hoch	++	0	0	0	0	0	0
Akzeptanz in der Gesellschaft Rot: niedrig; Grün: hoch	0	-	-	+	--	+	++

1) Nicht bewertbar.

Auch im DBFZ-Report Nr. 44 „Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr“ [64] wurde eine vergleichende Bewertung für verschiedene Energieträger durchgeführt. Dabei wird auch zwischen HVO aus biogenen Hauptprodukten und biogenen Nebenprodukten unterschieden. Die Autoren bewerten die Technologiereife zur Herstellung von HVO als sehr hoch. Dagegen wird das verfügbare Potenzial als niedrig bis begrenzt eingeschätzt. Die THG-Emissionen sind stark abhängig von der Rohstoffbasis, Gleiches gilt für die Gesteungskosten. Aspekte, wie Normierung und Regulierung, Betankungsinfrastruktur, Kompatibilität mit etablierter Fahrzeugflotte und das Reichweitenäquivalent, also „wie weit man mit einer Tankfüllung kommt“, werden positiv beurteilt. Bei den Luftschadstoffemissionen sowie der Einordnung als Gefahrstoff ist der Unterschied zu Dieselmotorkraftstoff nur unwesentlich.

PANOUSOU et al. (2021) [58] untersuchten die Herausforderungen für den Markthochlauf nachhaltiger fortschrittlicher Biokraftstoffe für den Transportsektor. HVO aus Altspeiseölen und Abfallstoffen zählt zu den fortschrittlichen Biokraftstoffen. Es ist relativ kostengünstig, in der vorhandenen Verteilungsinfrastruktur einsetzbar und für den Luftverkehr, den Straßenverkehr sowie für den Schwerlastverkehr geeignet. Vorteilhaft sind die gute Kompatibilität von HVO mit bestehenden Antrieben und die generell gute Drop-in-Fähigkeit, die den Autoren zufolge HVO zu dem am meisten präferierten nachhaltigen Biokraftstoff macht. Einschränkend wird aber angeführt, dass die Verfügbarkeit von Ausgangsstoffen stark limitiert ist, vor allem wenn Palmöl ausgeschlossen ist. Trotzdem wird davon ausgegangen, dass zumindest in begrenztem Umfang noch weitere Rohstoffpotenziale gehoben werden können.

7.2 Bewertung von HVO – eigene Analyse für den Einsatz am Beispiel der Bayerischen Staatsbetriebe

Die Bewertung von HVO als Kraftstoff in Unterkapitel 7.1 bezieht sich auf eine breite Einführung des HVO-Kraftstoffs in der Landwirtschaft oder allgemein in Kraftfahrzeugen. Nachfolgend soll die Verwendung von HVO speziell für die Landmaschinen der Staatsbetriebe beurteilt werden. Hierbei sind neben den allgemeinen Bewertungskriterien weitere Aspekte zu berücksichtigen, denn die Staatsbetriebe ...

- besitzen eine Vorbildfunktion,
- sind Dienstleister im Versuchs- und Bildungswesen,
- müssen konkrete Zielvorgaben gemäß dem Bayerischen Klimaschutzgesetz erfüllen,
- erhalten keine Energiesteuerrückvergütung und
- haben einen begrenzten Kraftstoffbedarf.

Die Stärken und Schwächen sowie die Chancen und Risiken im Sinne einer SWOT-Analyse von HVO-Kraftstoff beim Einsatz auf den Staatsbetrieben werden in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Stärken-Schwächen-Analyse zum Einsatz unvermischten HVO-Kraftstoffs in den Maschinen der bayerischen Staatsbetriebe

Stärken	Schwächen
Gute Kompatibilität mit bestehender Dieselmotortechnik und Betankungsinfrastruktur → in Bestandsflotte einsetzbar	Eventuell Leckagen oder Materialunverträglichkeiten an Schläuchen und Dichtungen v. a. in der Umstellungsphase von Diesel auf HVO (evtl. erhöhter Wartungsaufwand)
Teilweise Fahrzeugfreigaben vorhanden, Landmaschinenindustrie sieht HVO-Einsatz meist positiv	Offene Fragen bzgl. Langzeitverhalten von Abgasnachbehandlung und Schmierfähigkeit des Kraftstoffs
Keine Investitionskosten für Maschinenanpassungen	Höhere Kraftstoffkosten
Hohe Energiedichte → keine oder nur geringfügige Leistungseinbußen oder Reichweiteneinschränkungen	Teilweise keine HVO-Freigaben → Auswirkungen auf Garantie- und Gewährleistungsansprüche sowie Kulanz sind ungewiss
Gute Kältestabilität und Kaltstarteigenschaften, hohe Zündwilligkeit	Bei fehlenden Freigaben rechtliche Unsicherheiten bezüglich der Betriebserlaubnis vorhanden
Geringere Schadstoffemissionen bei älteren Traktoren ohne Abgasnachbehandlung, bei neuen Motoren kaum Unterschiede zu Diesel	Hoher Wasserstoff-/Energiebedarf bei der Herstellung → schlechtere Energiebilanz im Vergleich zu anderen Biokraftstoffen
Hohes THG-Einsparpotenzial, v. a. bei der Nutzung von Abfall- und Reststoffen	Nicht an öffentlichen Tankstellen erhältlich → Eigenverbrauchstankstelle notwendig
HVO gilt als fortschrittlicher nachhaltiger Kraftstoff, da er aus Rest- und Abfallstoffen besteht	Einordnung als Gefahrstoff und als wassergefährdend (WGK 1 oder 2) → kaum Vorteile gegenüber Diesel
Chancen	Risiken
Sofort einsetzbar → erfolgreiche Umsetzung der Maßnahme „Klimaverträgliche Bewirtschaftung“ der Staatsbetriebe möglich	Abfall- und Reststoffpotenzial begrenzt → Versorgungsengpass möglich, da Konkurrenz mit Luftfahrt sowie anderen Sektoren
Für Großteil der Bestandsflotte ist HVO die einzig verfügbare, sinnvolle Alternative, wenn sich Investitionen für Maschinenumrüstungen nicht mehr lohnen	Für Ölpflanzen sowie Abfall- und Reststoffe aus der Palmölproduktion, die als Rohstoffe verwendet werden, könnte zukünftig die Akzeptanz fehlen
Ausreichende Mengen für die Versuchsbetriebe voraussichtlich verfügbar	Gesetzliche Mengenbegrenzung für HVO aus Altpeiseölen zur Anrechnung auf die THG-Quote
Positives Meinungsbild zu HVO beim Großteil der befragten Mitarbeiter der Landwirtschaftsressorts	HVO wird nicht in Deutschland erzeugt → Importabhängigkeit, keine Selbstversorgung möglich
Breite Rohstoffbasis an Pflanzen sowie Rest- und Abfallstoffen möglich	Zukunftsaussichten von HVO für nicht staatliche landwirtschaftliche Betriebe ungewiss, da derzeit keine Energiesteuerrückvergütung für HVO gewährt wird
Vorbildfunktion der Staatsbetriebe erfüllt, da Klimaschutzziele erreicht werden können	Vorbildfunktion getrübt, da Landwirtschaft nicht profitiert und wertvolle Koppelprodukte fehlen

Aus technischer Sicht ist der Einsatz von HVO in den landwirtschaftlichen Maschinen der Staatsbetriebe eine vielversprechende Option, um Diesel zu ersetzen. Logistik und Handhabung von HVO unterscheiden sich praktisch nicht von herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff. Einige neue Land- und Forstmaschinen sind bereits von den Herstellern für HVO nach DIN EN 15940 freigegeben. Somit fallen bei diesen keine zusätzlichen Investitionskosten für

etwaige Anpassungen an und es bestehen auch keine Bedenken bezüglich des Fortbestands von Garantie- und Gewährleistungsansprüchen. Auch Leistung und Verbrauch weichen mit HVO kaum vom Dieselbetrieb ab. Die Störanfälligkeit von Maschinen, die mit HVO betrieben werden, ist nach aktuellem Kenntnisstand gering. Kaltstartfähigkeit und Kältetauglichkeit sind positiv zu bewerten. Allerdings besteht bei Maschinen, die bereits längere Zeit mit fossilem Dieseldieselkraftstoff betrieben worden sind, die Gefahr, dass nach der Umstellung Undichtigkeiten an kraftstoffführenden Bauteilen, insbesondere an Schlauchverbindungen und Dichtungen, auftreten können. Darüber hinaus ist auf eine ausreichende Schmierfähigkeit von HVO zu achten, die aber vom Kraftstoffhersteller durch entsprechende Additivierung sichergestellt werden kann. Weil insgesamt noch zu wenige Erfahrungen in Landmaschinenflotten mit HVO-Kraftstoff vorliegen, bleibt ein gewisses Restrisiko in Bezug auf die Langzeitverträglichkeit mit Komponenten des Kraftstoff-, Motor- und Abgasnachbehandlungssystems bestehen. Auch wenn für Bestands- oder Neumaschinen keine Herstellerfreigaben für HVO existieren, kann von einem weitgehend problemlosen Motorbetrieb ausgegangen werden. Allerdings besteht derzeit noch Unsicherheit darüber, welche rechtlichen Folgen es haben kann, wenn Maschinen mit paraffinischem Dieseldieselkraftstoff nach DIN EN 15940 betankt werden, obwohl sie dafür nicht freigegeben sind.

Hinsichtlich des Gefährdungspotenzials für die Anwender und der Schadstoffemissionen bietet HVO geringfügige Vorteile gegenüber Dieseldieselkraftstoff. Für den praktischen Umgang damit, z. B. bei der Lagerung, ergeben sich jedoch keine Änderungen zu Dieseldieselkraftstoff, es sind prinzipiell die gleichen Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Im Vergleich zu Rapsölkraftstoff bietet HVO für den Einsatz in umweltsensiblen Bereichen wie der Land- und Forstwirtschaft weniger Vorteile, da Rapsöl aufgrund seiner geringeren Gefährdungsmerkmale keiner Wassergefährdungsklasse (WGK) zugeordnet ist und HVO in WGK 1 bzw. 2 eingestuft wird. Die Höhe der THG-Emissionen bei der Bereitstellung hängt stark von der Rohstoffbasis ab. Bei der Verwendung von Rest- und Abfallstoffen, wie beim C.A.R.E.[®]-Diesel, werden THG-Einsparungen von bis zu 80 % gegenüber fossilem Dieseldieselkraftstoff erzielt. Für die Staatsbetriebe bedeutet dies, dass beim Einsatz von HVO zwar eine hohe THG-Minderung verbucht, hinsichtlich anderer Umweltgefährdungen aber kaum Vorteile gegenüber fossilem Dieseldieselkraftstoff erzielt werden können.

Die Herstellung von HVO erfolgt überwiegend in industriellen Anlagen weltweit. Anders als Pflanzenölkraftstoff und FAME wird HVO nicht in Deutschland erzeugt. Somit besteht eine Importabhängigkeit aus Drittländern, was die Versorgungssicherheit in Krisenzeiten beeinträchtigen kann. Dies ist insbesondere in der Landwirtschaft von Bedeutung, weil diese die Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln, Produkten und Energieträgern gewährleisten muss. Auch wenn die Abhängigkeit von Energieträgerimporten für die Landwirtschaft nur eine untergeordnete Rolle spielen mag, so erfüllt dieser Aspekt nicht den Anspruch auf Vorbildfunktion. Regional, landwirtschaftlich erzeugte Biokraftstoffe mit regional produzierten Eiweißfuttermitteln als Koppelprodukt wären diesbezüglich weitaus attraktiver.

HVO ist nicht in der 10. BImSchV gelistet, sodass es nicht an öffentlichen Tankstellen abgegeben werden darf. In Eigenverbrauchstankstellen ist dies jedoch nach Einschätzung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft von Baden-Württemberg für

land- und forstwirtschaftliche Maschinen und Geräte möglich [34], ebenso wie für Fuhrparks öffentlicher Auftraggeber [46] sowie betriebsintern für Forschungs- und Erprobungszwecke. In den meisten Mitgliedsstaaten ist die Abgabe von HVO an öffentlichen Tankstellen nicht eingeschränkt und auch in Deutschland ist geplant, paraffinischen Dieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940 durch Aufnahme in die 10. BImSchV für den Verkauf an Tankstellen zuzulassen. Für viele Staatsbetriebe ist das aktuelle Verkaufsverbot von HVO an öffentlichen Tankstellen kaum relevant, da auf den Betrieben in der Regel Hoftankstellen vorhanden sind oder errichtet werden können. Die Maschinen der BaySF hingegen wechseln häufiger ihren Einsatzort und sind stärker auf öffentliche Tankstellen angewiesen, sodass die Versorgung mit HVO nicht immer gewährleistet ist. Ist temporär kein HVO-Kraftstoff verfügbar, kann jederzeit auch wieder Diesel getankt werden.

Die Preise von HVO schwanken stark. Als Faustzahl sind sie im Durchschnitt ca. 0,20 €/l höher als von Diesel. Auf längere Sicht wird erwartet, dass sich fossiler Dieselkraftstoff aufgrund der zunehmenden CO₂-Bepreisung sowie des CO₂-Zertifikatehandels verteuert. HVO kann in den THG-Quotenhandel gebracht werden, wodurch die Hersteller zusätzliche Erlöse erzielen können und somit günstigere Verkaufspreise möglich sind. Die Preisentwicklung von HVO ist jedoch schwerlich abzuschätzen. Es ist anzunehmen, dass künftig die Nachfrage nach Rest- und Abfallstoffen aus dem Industrie- und Energiesektor und damit auch deren Preis steigen werden, was höhere Kraftstoffkosten nach sich ziehen könnte. Hinzu kommt, dass HVO auch in anderen Sektoren, wie der Luftfahrt, als bevorzugte kurzfristig verfügbare Diesel- bzw. Kerosinalternative gilt. Schließlich könnten auch die Beimischungsanteile von HVO zu fossilem Dieselkraftstoff erhöht werden. All dies kann erhebliche Nutzungskonkurrenzen zwischen den verschiedenen Einsatzoptionen herbeiführen, die zu Preissteigerungen und Versorgungsengpässen führen können. Land- und forstwirtschaftlichen Betrieben wird derzeit auf Antrag die Energiesteuer auf fossilen Diesel in Höhe von 47,04 Ct/l teilweise (21,48 Ct/l) rückerstattet. Dies gilt jedoch nicht für HVO. Solange sich die Gesetzeslage nicht ändert, ist HVO gegenüber Agrardiesel kaum wettbewerbsfähig. Auf staatlichen Betrieben hingegen, die keine Energiesteuererstattung erhalten, wird die Wirtschaftlichkeit von HVO gegenüber Diesel bereits bei geringeren Preisabständen erreicht.

Gemäß Umfrage im erweiterten potenziellen Nutzerkreis der Bayerischen Landwirtschaftsverwaltung besitzt HVO, das aus Rest- und Abfallstoffen gewonnen wird, ein überwiegend positives Image in Bezug auf Nachhaltigkeit und Einsatztauglichkeit. Dies mag vor allem daran liegen, dass es, wie Erfahrungen der BaySG belegen, als Drop-in-Kraftstoff fossilen Dieselkraftstoff schnell und problemlos ersetzen kann und die vorgegebenen Klimaziele ohne große Gewohnheitsänderungen oder Einschränkungen zu erreichen sind. Auch ein höherer Kraftstoffpreis erscheint für diesen Nutzerkreis gerechtfertigt.

Das größte Risiko beim vermehrten Einsatz von HVO-Kraftstoff auf den Staatsbetrieben besteht darin, dass längerfristig nicht genügend HVO aus Rest- und Abfallstoffen zu akzeptablen Preisen zur Verfügung steht. Auch bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Entwicklung des Images von HVO in der Gesellschaft, insbesondere dann, wenn Abfall- und Reststoffe als Rohstoffbasis nicht mehr ausreichen oder in großen Mengen aus anderen Teilen der Welt nach Deutschland importiert werden. Die Vorbildfunktion sowie der

Versuchs- und Bildungsauftrag der Staatsbetriebe können durch die alleinige Verwendung von HVO-Kraftstoff nicht erfüllt werden. Es gibt diesbezüglich bessere Optionen an heimischen Biokraftstoffen. Als gute Strategie könnte sich ein Mix an alternativen Kraftstoffen und Antrieben erweisen. Ein derartiger Mix wird von der Landmaschinenindustrie [67], in der Wissenschaft und von den befragten Mitarbeitern des Landwirtschaftsressorts als tragfähige, zukünftige Option für die Landwirtschaft erachtet.

Handlungsempfehlung am Beispiel der BaySG

Eine sehr schnelle und flächendeckende Umstellung aller Maschinen der BaySG bis zum Zieljahr 2025 wäre aus technischer Sicht möglich. Dabei ist nur mit vereinzelt Störungen, vor allem in der Umstellungsphase, zu rechnen. Kraftstoffbedingte Schäden sind nicht zu erwarten. Entsprechend dem eingeholten Meinungsbild ist eine hohe Akzeptanz für den Kraftstoff HVO bei den Angestellten der BaySG zu erwarten, wenngleich eine gewisse Skepsis beim Einsatz in nicht für HVO freigegebenen Maschinen besteht. Welche Konsequenzen es hat, eine nicht für HVO freigegebene Maschine mit HVO zu betreiben, ist rechtlich noch nicht geklärt. Diese Klärung sollte baldmöglichst erfolgen. Die hohe THG-Minderung bei der Verwendung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen dient zum Erreichen des vorgegebenen Ziels einer klimafreundlichen Bewirtschaftung der Staatsgüter. Allerdings ist fraglich, ob HVO auch eine langfristige Lösung für die gesamte Landwirtschaft sein kann. Dagegen spricht vor allem, dass die produzierbaren Mengen den Bedarf nur weniger Akteure abdecken können. Somit besteht die Gefahr, sich von nur einer Kraftstoffoption abhängig zu machen. Um der Vorbildfunktion der Staatsbetriebe gerecht zu werden – und aus eigenem Interesse –, sollten die Staatsbetriebe deshalb auch unterschiedliche alternative Antriebe testen und demonstrieren sowie an Lösungen mitwirken, die es der Landwirtschaft ermöglichen, sich selbst stärker mit nachhaltigen Energieträgern, ggf. auch autark, zu versorgen. Folgende Strategie ist also in Betracht zu ziehen:

Maschinen, die bereits jetzt mit den erneuerbaren Energieträgern Rapsölkraftstoff und Biodiesel erfolgreich laufen, sollten mit diesen weiterhin betrieben werden. Darüber hinaus sollten vorhandene Maschinen, die entweder Freigaben für Biodiesel besitzen oder sinnvoll auf Rapsölkraftstoff umgerüstet werden können, auf diese Kraftstoffe umgestellt werden. Die restliche Bestandsflotte sollte nach und nach mit HVO betrieben werden. Allerdings ist vorher noch die rechtliche Situation endgültig abzuklären.

Bei der Beschaffung neuer Maschinen ist zu prüfen, ob diese nicht vorzugsweise mit Rapsölkraftstoff, Biodiesel, Biomethan oder erneuerbarem Strom betrieben werden könnten. Auf HVO aus Rest- und Abfallstoffen oder nachhaltig erzeugten Pflanzenölen sollte vor allem dann zurückgegriffen werden, wenn andere erneuerbare Optionen ausscheiden. Dass die gesamte Landwirtschaft flächendeckend auf HVO umstellt, ist nicht zu erwarten. Die Gründe hierfür sind, wie oben erwähnt, die begrenzte Verfügbarkeit des Kraftstoffs sowie die höheren Kosten, da für paraffinischen Dieselkraftstoff keine Energiesteuerrückvergütung gewährt wird.

Zusammenfassung

Um das Ziel einer klimaneutralen Staatsverwaltung in Bayern bis 2028 zu erreichen, sollen die land- und forstwirtschaftlichen Staatsbetriebe auf erneuerbare Energieträger umstellen. Ziel des Vorhabens „ParaDies2025“ ist es zu untersuchen, ob paraffinischer Dieseldieselkraftstoff gemäß DIN EN 15940 auf Basis von Rest- und Abfallstoffen für die bestehenden Fuhrparks der Staatsbetriebe eine nachhaltige und bis zum Jahr 2025 umsetzbare Alternative zu fossilem Dieseldieselkraftstoff darstellen kann. Die erzielten Erkenntnisse sollen auch für nicht staatliche landwirtschaftliche Betriebe und private Unternehmen als Entscheidungshilfe bei der Einführung von Klimaschutzmaßnahmen im Kraftstoffbereich dienen.

Zunächst wurde der Kenntnisstand zum Einsatz paraffinischen Dieseldieselkraftstoffs, zu dem auch hydriertes Pflanzenöl (HVO) gehört, in Fahrzeugen, speziell in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen zusammengetragen. In einem Praxisversuch wurden mehrere Traktoren und landwirtschaftliche Maschinen der Staatsbetriebe von Diesel auf HVO umgestellt und dabei wissenschaftlich begleitet. Um die Akzeptanz des HVO-Kraftstoffs bei den potenziellen Nutzern zu prüfen, wurde ein Meinungsbild zum Einsatz von palmölfreiem HVO auf land- und forstwirtschaftlichen Betrieben im Eigentum des Freistaats Bayern in telefonischen Interviews eingeholt. Unter Einbeziehung aller Erkenntnisse wurde eine abschließende Bewertung durchgeführt.

HVO hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Es wird durch eine katalytische Reaktion von pflanzlichen oder tierischen Ölen und Fetten mit Wasserstoff sowie anschließendes Cracken und Isomerisieren in industriellen Anlagen hergestellt. Als Ausgangsstoffe dienen überwiegend Pflanzenöle, aber auch Rest- und Abfallstoffe, wie z. B. Altspeiseöle sowie Pyrolyseöle. HVO kann fossilem Dieseldieselkraftstoff beigemischt oder auch unvermischt als Reinkraftstoff eingesetzt werden. Die Eigenschaften hydrierter Pflanzenöle unterscheiden sich nur geringfügig von Dieseldieselkraftstoffeigenschaften.

Die Norm DIN EN 15940 „Paraffinischer Dieseldieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren“ spezifiziert die Anforderungen und Prüfverfahren für Dieseldieselkraftstoff auf der Basis von Synthesegas oder hydrierten biogenen Ölen und Fetten. Paraffinischer Dieseldieselkraftstoff entspricht mit Ausnahme der zu geringen Dichte der Dieseldieselkraftstoff-Norm DIN EN 590. HVO weist günstige Kraftstoffeigenschaften, wie hohe Zündwilligkeit und gute Kältestabilität, auf. Die nahezu völlige Aromatenfreiheit von HVO wirkt sich in den meisten Untersuchungen positiv auf geringe Schadstoffemissionen aus, bewirkt allerdings auch, dass es nach längerem Dieseldieselbetrieb aufgrund veränderten Quellverhaltens von Elastomeren vereinzelt zu Undichtigkeiten im Kraftstoffsystem kommen kann. Die THG-Einsparung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen gegenüber Diesel beträgt rund 80 %.

Das Inverkehrbringen von HVO an öffentlichen Tankstellen ist in Deutschland im Gegensatz zu den meisten anderen europäischen Ländern nicht gestattet. Für mobile Maschinen und Geräte sowie land- und forstwirtschaftliche Zugmaschinen ist HVO nach Einschätzung des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft von Baden-Württemberg ebenso wie für Fuhrparks öffentlicher Auftraggeber sowie betriebsintern für Forschungs- und Erprobungszwecke die Abgabe paraffinischen Dieseldieselkraftstoffs als Reinkraftstoff aus

Eigenverbrauchstankstellen erlaubt. Demnach dürfen also die Staatsbetriebe HVO als Reinkraftstoff verwenden. Rechtliche Unsicherheiten bestehen derzeit noch hinsichtlich des Einsatzes von HVO in Bestandsfahrzeugen und -maschinen, für die keine Typprüfung oder explizite Zulassung für paraffinischen Kraftstoff nach DIN EN 15940 vorliegt. Hinsichtlich der Lagerung und Betankungseinrichtungen gelten prinzipiell die gleichen Anforderungen wie für Dieselmotorkraftstoff. Vorhandene Dieseltankstellen können auch für HVO genutzt werden, gegebenenfalls sind neue Eigenverbrauchstankstellen an geeigneten Stellen zu errichten. Auf paraffinischen Dieselmotorkraftstoff gemäß DIN EN 15940 wird die gleiche Energiesteuer wie auf Dieselmotorkraftstoff erhoben, eine teilweise Energiesteuerrückerstattung wie bei Agrardiesel ist nicht möglich.

HVO aus Palmöl kann seit dem Jahr 2023 nicht mehr zur Erfüllung der THG-Quote im Verkehrssektor angerechnet werden. Für HVO, das aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen sowie Altspeiseölen und Tierfetten gewonnen wird, sind nur begrenzte Mengen für die Anrechnung der THG-Quote zulässig. Bereits heute basiert ein großer Anteil von HVO auf Altspeisefetten aus Asien. Es bestehen daher Unsicherheiten, in welchen Mengen und aus welchen Rohstoffen HVO zukünftig in Deutschland verfügbar sein wird. Da HVO fossilen Dieselmotorkraftstoff ersetzt, kann der Einsatz direkt zur Reduzierung der THG-Emissionen der Quellgruppe 1.A.4.c des Inventars des Sektors Landwirtschaft führen und somit zur Verringerung der THG-Emissionen beitragen.

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von Anwendungsbeispielen für HVO in mobilen Maschinen und Geräten, in Nutzfahrzeugen, auf Flughäfen, bei der Bahn wie auch in Fuhrparks großer Firmen. Die Einsatzerfahrungen sind überwiegend positiv. Auch ein Praxistest über mehrere Monate mit zehn Maschinen auf den bayerischen Staatsbetrieben verlief ohne größere Störungen. Lediglich an einer älteren Maschine wurde nach der Umstellung eine Undichtigkeit im Kraftstoffsystem festgestellt, die aber mit wenig Aufwand behoben werden konnte. Motorölqualität, Motorleistung und Abgasverhalten unterschieden sich im Praxistest nicht vom Dieselmotorkraftstoffbetrieb. Auch die Umstellung der Kraftstoffversorgung auf HVO verlief problemlos.

Das erarbeitete Meinungsbild zur Akzeptanz von HVO aus Rest- und Abfallstoffen zeigt unter den Befragten überwiegend eine positive Meinung zu HVO, insbesondere im Hinblick auf Klimaschutz und technische Zuverlässigkeit. Als Nachteile werden mögliche Versorgungsengpässe und die höheren Preise gesehen. Zwar ist die große Mehrzahl der Befragten positiv gegenüber HVO eingestellt, aber es sind auch vereinzelt ablehnende Haltungen festzustellen, die zu berücksichtigen sind.

Die abschließende Bewertung kommt zu dem Ergebnis, dass die mit Eigenverbrauchstankstellen ausgerüsteten land- und forstwirtschaftlichen Betriebe im Umfeld des StMELF durch die aus technischer Sicht zu erwartende problemlose Umstellung auf HVO das vorgegebene Ziel einer klimafreundlichen Bewirtschaftung der Staatsbetriebe kurzfristig bis 2025 erreichen können. Da jedoch die Gefahr besteht, sich von einer nur begrenzt verfügbaren Kraftstoffoption abhängig zu machen, und um der Vorbildfunktion der Staatsbetriebe gerecht zu werden, sollten der Einsatz weiterer Biokraftstoffe wie Pflanzenölkraftstoff, Biodiesel und Biomethan sowie die Umstellung auf elektrische Antriebe weiter forciert werden.

Summary

In order to achieve the goal of a climate-neutral state administration in Bavaria by 2028, the agricultural and forestry state enterprises should switch to renewable energy sources. The aim of the project “ParaDies2025” is to investigate whether paraffinic diesel fuel in accordance with DIN EN 15940 based on residual and waste materials can be a sustainable alternative to fossil diesel fuel for the existing vehicle fleets of state-owned enterprises that can be implemented in the short term by 2025. The findings obtained should also serve as a decision-making aid for non-state farms and private companies when introducing climate protection measures in the fuel sector.

First, the state of knowledge on the use of paraffinic diesel fuel, which also includes hydrogenated vegetable oil (HVO), in vehicles, especially in agricultural and forestry machinery, was compiled. In a practical test, several tractors and agricultural machines of BaySG were converted from diesel to HVO and scientifically accompanied. In order to test the acceptance of HVO fuel among potential users, an opinion survey on the use of palm oil-free HVO on agricultural and forestry operations owned by the Free State of Bavaria was conducted in telephone interviews. A final evaluation was carried out, taking into account all the findings.

HVO has gained much importance in recent years. It is produced by a catalytic reaction of vegetable or animal oils and fats with hydrogen and subsequent cracking and isomerization in industrial plants. The starting materials are mainly vegetable oils, but also residual and waste materials such as used cooking oils and pyrolysis oils. HVO can be blended with fossil diesel fuel or used unmixed as a pure fuel. The properties of hydrogenated vegetable oils differ only slightly from diesel fuel.

The standard DIN EN 15940 “Paraffinic diesel fuel from synthesis or hydrogenation processes” specifies the requirements and test methods for diesel fuel based on synthesis gas or hydrogenated biogenic oils and fats. With the exception of its low density, paraffinic diesel fuel complies with the diesel fuel standard DIN EN 590. HVO has favourable fuel properties such as high ignition readiness and good low-temperature stability. The almost complete absence of aromatics in HVO has a positive effect on low pollutant emissions in most studies. However, this also means that after longer periods of diesel operation, leaks can occur in the fuel system due to changes in the swelling behaviour of elastomers. The GHG savings of HVO from residual and waste materials compared with diesel are around 80 %.

In contrast to most other European countries, the marketing of HVO at public filling stations is not yet permitted in Germany. For mobile machines and equipment as well as for agricultural and forestry tractors, dispensing of paraffinic diesel fuel as a pure fuel from own-use filling stations is permitted for research and development purposes. Public entities, which include state-owned enterprises, are also allowed to use HVO as pure fuel. Legal uncertainties currently remain regarding the use of HVO in existing vehicles and machinery for which no type approval or explicit approval for paraffinic fuel in accordance with DIN EN 15940 is available. With regard to storage and refuelling facilities, the same require-

ments apply in principle as for diesel fuel. Existing diesel refuelling stations can also be used for HVO; if necessary, new self-consumption refuelling stations must be built at suitable locations. The same energy tax is levied on paraffinic diesel fuel in accordance with DIN EN 15940 as on diesel fuel, a partial energy tax refund as for agricultural diesel is currently not possible.

HVO from palm oil can no longer be counted towards meeting the GHG quota in the transport sector from 2023. For HVO derived from food and feed crops as well as used cooking oils and animal fats, only limited quantities are allowed to count towards the GHG quota. Already today, a large share of HVO is based on used cooking oils from Asia. There are uncertainties regarding the quantities and raw materials from which HVO will be available in Germany in the future. Since HVO replaces fossil diesel fuel, its use can directly lead to the reduction of GHG emissions of source group 1.A.4.c of the agriculture sector inventory and thus contribute to the reduction of GHG emissions.

In the meantime, there is a large number of application examples for HVO in mobile machinery and equipment, in commercial vehicles, at airports, in railroads as well as in fleets of large companies. The experiences with the use of HVO are predominantly positive. A practical test over several months with 10 machines on the state farms also ran without any major malfunctions. Only one older machine was found to have a leak in the fuel system after the changeover, but this could be repaired with little effort. Engine oil quality, engine performance and exhaust gas behaviour did not differ from diesel operation in the field test. The changeover of the fuel supply to HVO also went without any problems.

The opinion survey on the acceptance of HVO from residual and waste materials shows that the majority of respondents have a positive opinion of HVO, especially with regard to climate protection and technical reliability. Possible supply bottlenecks and higher prices are seen as disadvantages. Although the vast majority of respondents have a positive attitude towards HVO, however there are also a few negative attitudes that need to be taken into account.

The final evaluation comes to the conclusion that the agricultural and forestry enterprises in the vicinity of the StMELF equipped with self-consumption tank stations can achieve the specified goal of climate-friendly management of the state-owned estates in the short term by 2025 through the conversion to HVO. It is expected to be problem-free from a technical point of view. However, since there is a risk of becoming dependent on a fuel option that is only available to a limited extent, and in order to fulfil the exemplary function of state farms, the use of other biofuels, such as vegetable oil fuel, biodiesel and biomethane, as well as the conversion to electric drives should be pushed further.

Quellenverzeichnis

- [1] ACKERMANN, H.; PLUM, W.; PÖTZSCH, S.; WELTSCHEV M.; BÄBLER, R. (2020): Entwicklung einer Prüfmethode zur Bewertung der Materialbeständigkeit von Bauteilen in Mitteldestillatsanwendungen. Forschungsbericht, Nr. 780. Hrsg.: DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für nachhaltige Energieträger, Mobilität und Kohlenstoffkreisläufe e. V., Hamburg, 153 Seiten, ISSN 0937-9762
- [2] AGCO DEUTSCHLAND GMBH; NESTE GERMANY GMBH (2022): Valtra bringt Neste MY erneuerbarer Diesel in über 75 Länder weltweit – eine Tankfüllung nach der anderen. Marktoberdorf, Düsseldorf, URL: <https://www.valtra.de/> (Stand: 02.08.2022)
- [3] BLIVERNITZ, A. (2020): Untersuchung der Verträglichkeit von Elastomeren mit synthetischen Flugturbinenkraftstoffen anhand ablaufender Diffusionsprozesse. Dissertation. München: Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, LRT 4 – Institut für Mechanik, 212 Seiten
- [4] BORTEL, I.; VÁVRA, J.; TAKÁTS, M. (2019): Effect of HVO fuel mixtures on emissions and performance of a passenger car size diesel engine. *Renewable Energy*, Bd. 140, Nr. 2 (September), S. 680–691
- [5] BRANCHENPLATTFORM BIOKRAFTSTOFFE IN DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT (2020): Umfrage an Landtechnikhersteller zur Freigabe alternativer Kraftstoffe vom Oktober 2020 (unveröffentlicht)
- [6] BRANDSTETTER, S. (2022): Preisverläufe und CO₂-Emissionsfaktoren der letzten Jahre von dem HVO-Kraftstoff C.A.R.E. Diesel, E-Mail, Januar 2022
- [7] BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (BLE) (2021): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Stand redaktionell: Dezember 2021, Stand Datenbankauszug: September 2021. Hrsg.: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bonn, 100 Seiten
- [8] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2022): Verkehr in Zahlen 2021/2022. 50. Jahrgang. Redaktionsschluss: September 2021, Korrektur der PDF-Ausgabe: 21. Februar 2022. Bearbeitung: DLR e. V., DIW Berlin. Flensburg: Kraftfahrt-Bundesamt, 372 Seiten
- [9] C.A.R.M.E.N. E. V. (2022): Marktübersicht Elektrolyseure. Straubing: C.A.R.M.E.N. E. V. 15 Seiten, URL: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktuebersicht-elektrolyseure/> (Stand: 04.04.2023)
- [10] CRUSIUS, S.; JUNK, R.; HARNDORF, H. (2014): Interne Ablagerungen in Common-Rail-Injektoren. Einsatz von hydrogenated vegetable oil (HVO) als Alternative zum Dieselmotorkraftstoff. Special Issue: ProcessNet-Jahrestagung 2014 und 31. DECHEMA-Jahrestagung der Biotechnologen. *Chemie Ingenieur Technik*, Bd. 86, Nr. 9, S. 1355
- [11] DAMYANOV, A. (2019): Hydriertes Pflanzenöl (HVO). In: MAUS, W. (Hrsg.): Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 891–901, https://doi.org/10.1007/978-3-662-58006-6_37

- [12] DEUTSCHE BAHN AG (2022): Grüner unterwegs im Regionalverkehr: DB Regio setzt auf Biokraftstoff. Pressemitteilung vom 02.09.2022. 2 Seiten, URL: https://www.deutschebahn.com/pr-stuttgart-de/aktuell/presseinformationen/133-pm_bio_kraftstoff_db_regio_ba_wue-8775966 (Stand: 04.04.2023)
- [13] DEUTSCHE BAHN AG (2022): Neuer Biokraftstoff für das Klima bei DB Cargo. Presseinformation vom 07.03.2022. 1 Seite, URL: https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Neuer-Biokraftstoff-fuer-das-Klima-bei-DB-Cargo--7324688#? (Stand: 04.04.2023)
- [14] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (2019): Regenwald im Tank – Palmölimporte nach Deutschland. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Steffi Lemke, Uwe Kekeritz, Ottmar von Holtz, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Berlin: Deutscher Bundestag, Drucksache, Nr. 19/10967 vom 13.06.2019, 24 Seiten
- [15] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG (2022): Steuerliche Begünstigung von Biodiesel und Pflanzenöl. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU – Drucksache 20/1833. Berlin: Deutscher Bundestag, Drucksache, Nr. 20/2097 vom 27.05.2022, 2 Seiten
- [16] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN (2022): Energiesteuergesetz (EnergieStG) vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534), zuletzt geändert durch Art. 1 Energiesteuersenkungsgesetz vom 24. Mai 2022 (BGBl. I S. 810), Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 2006, Nr. 33, S. 1534–1561 und Bd. 2022, Teil I, Nr. 18, S. 810–811, ISSN 0341-1095
- [17] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT (2017): Achtunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Treibhausgasminderung bei Kraftstoffen – 38. BImSchV) vom 8. Dezember 2017 (BGBl. I S. 3892), zuletzt geändert durch Art. 1 VO zur Festlegung weiterer Bestimmungen zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote vom 12. November 2021 (BGBl. I S. 4932), Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 2017, Teil I, Nr. 77, S. 3892–2898 und Bd. 2021, Teil I, Nr. 79, S. 4932–4940, ISSN 0341-1095
- [18] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), zuletzt geändert durch Art. 1 Erstes ÄndG vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905), Bundesgesetzblatt, Bd. 2019, Teil I, Nr. 48, S. 2513–2521 und Bd. 2021, Nr. 59, Teil I, S. 3905–3907, ISSN 0341-1095
- [19] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2022): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274, berichtigt 2021, S. 123), zuletzt geändert durch Art. 2, Viertes Gesetz zur Änderung des Bundesnaturschutzgesetzes vom 20. Juli 2022, Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 2013, Nr. 25, S. 1274–1311 und Bd. 2022, Teil I, Nr. 28, S.1362–1371, ISSN 0341-1095

- [20] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2020): Siebenunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote – 37. BImSchV) vom 15. Mai 2017 (BGBl. I S. 1195), zuletzt geändert durch Art. 20 Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138), Bundesgesetzblatt, Teil I, Bd. 2017, Nr. 28, S. 1195–1200 und Bd. 2020, Nr. 65, S. 3138–3205, ISSN 0341-1095
- [21] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND NUKLEARE SICHERHEIT; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE; BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (2021): Verordnung über Anforderungen an eine nachhaltige Herstellung von Biokraftstoffen (Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung – Biokraft-NachV) vom 2. Dezember 2021 (BGBl. I S. 5126, 5143), Bundesgesetzblatt, Bd. 2021, Teil I, Nr. 82, S. 5126–5159
- [22] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (2019): Zehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen – 10. BImSchV) vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1849), zuletzt geändert durch Art. 1 VO zur Umsetzung der RL 2014/94/EU und weiterer immissionsschutzrechtlicher Rechtsakte der EU vom 13. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2739), Bundesgesetzblatt, Bd. 2010, Teil I, Nr. 62, S. 1849–1861 und Bd. 2019, Teil I, Nr. 50, S. 2739–2756, ISSN 0341-1095
- [23] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2021): Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz – SaubFahrzeugBeschG) vom 9. Juni 2021, Bundesgesetzblatt, Bd. 2021, Teil I, Nr. 31, S. 1691–1698, ISSN 0341-1095
- [24] DEUTSCHE BUNDESREGIERUNG; BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR (2021): Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), zuletzt geändert durch Art. 11 Viertes Gesetz zur Änderung des Straßenverkehrsgesetzes und anderer straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften vom 12. Juli 2021 (BGBl. I S. 3091), Bundesgesetzblatt, Bd. 2012, Teil I, Nr. 18, S. 679–952 und Bd. 2021, Teil I, Nr. 48, S. 3091–3107, ISSN 0341-1095
- [25] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (DWA) (2019): Arbeitsblatt DWA-A 781 (TRwS 781). Technische Regel wassergefährdender Stoffe – Tankstellen für Kraftfahrzeuge. Dezember 2018. 1. Auflage, korrigierte Fassung: Mai 2019. Hennef: DWA, 75 Seiten, ISBN 978-3-88721-756-3
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2019): DIN EN 15940, 2019: Kraftstoffe – Paraffinischer Dieselkraftstoff aus Synthese oder Hydrierungsverfahren – Anforderungen und Prüfverfahren; deutsche Fassung EN 15940:2016+A1:2018+AC:2019; Oktober 2019. Berlin: Beuth, 30 Seiten
- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2023): DIN EN 15940:2023-07 – Kraftstoffe – Paraffinischer Dieselkraftstoff von Synthese oder Wasserstoffbearbeitung – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 15940:2023; Juli 2023 (vorab bereitgestellt). Berlin: Beuth, 29 Seiten

- [28] DIMITRIADIS, A.; SELJAK, T.; VIHAR, R.; ŽVAR BAŠKOVIČ, U.; DIMARATOS, A.; BEZERGIANNI, S.; SAMARAS, Z.; KATRAŠNIK, T. (2020): Improving PM-NOx trade-off with paraffinic fuels. A study towards diesel engine optimization with HVO. *Fuel*, Bd. 265, Nr. 1, Art.-Nr. 116921, S. 1–20
- [29] ENGMAN, A.; HARTIKKA, T.; HONKANEN, M.; KIISKI, U.; KURONEN, M.; LETHO, K.; MIKKONEN, S.; NORTIO, J.; NUOTTIMÄKI, J.; SAIKKONEN, P. (2016): *Neste Renewable Diesel Handbuch*. Stand: Mai 2016, Espoo: Neste Corporation, 62 Seiten
- [30] ENI TRADE & BIOFUELS (2023): HVO-Diesel Sicherheitsdatenblatt. Überarbeitungsdatum 12.01.2023. 20 Seiten, Rome: ENI s.p.a, URL: <https://msds.eni.com/AthosSDS/?lingua=EN#https://msds.eni.com/AthosSDS/#> (Stand: 04.04.2023)
- [31] Ettl, J. (2021): *Reales Abgasemissionsverhalten von Traktoren am Prüfstand und im Feldeinsatz*. Dissertation, München. Technische Universität München. TUM School of Life Sciences, Lehrstuhl für Agrarsystemtechnik, 149 Seiten, ISBN 978-3-8439-4780-0
- [32] Ettl, J.; Huber, G.; Emberger, P.; Thüneke, K.; Remmele, E. (im Druck): *Klimafreundliche Landmaschinen im Feldtest*. Berichte aus dem TFZ, Nr. 80. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
- [33] EUROPÄISCHE UNION (2019): Delegierte Verordnung (EU) 2019/807 der Kommission vom 13. März 2019 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Bestimmung der Rohstoffe mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen, in deren Fall eine wesentliche Ausdehnung der Produktionsflächen auf Flächen mit hohem Kohlenstoffbestand zu beobachten ist, und die Zertifizierung von Biokraftstoffen, flüssigen Biobrennstoffen und Biomasse-Brennstoffen mit geringem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen, *Amtsblatt der Europäischen Union*, Bd. 62, Nr. L 133, S. 1–7
- [34] EUROPÄISCHES PARLAMENT; EUROPÄISCHER RAT (2022): Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (ABl. L 328 S. 82, berichtigt 2020 L 311 S. 11, berichtigt 2022 L 41 S. 37), zuletzt geändert durch Art. 1 VO (EU) 2022/759 vom 14. Dezember 2021 (ABl. 2022 L 139 S. 1), *Amtsblatt der Europäischen Union*, Bd. 61, L 328, S. 82–209
- [35] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK UMSICHT (2022): *TCR-Technologie: CO₂-neutrale Energieträger aus biogenen Reststoffen*. 5 Seiten, München, Sulzbach-Rosenberg: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V., URL: <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/de/unsere-loesungen/tcr-technologie.html> (Stand: 06.09.2022)
- [36] GEHRER M.; SEYFRIED, H.; STAUDACHER, H. (2015): Life Cycle Assessment of BtL as compared to HVO Paths in Alternative Aviation Fuel Production. In: *DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT – LILIENTHAL-OBERTH E. V. (DGLR) (Hrsg.): Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2014*, Augsburg, 16.–18. September, Kongress am Park. Bonn: DGLR, S. 1–10, URL: https://publikationen.dglr.de/?tx_dglrpublications_pi1%5Bdocument_id%5D=340090 (Stand: 25.08.2022)
- [37] GENERALZOLLDIREKTION DRESDEN (2021): *Schriftliche Auskunft auf eine Frage zur Energiesteuer von HVO vom 25.10.2021*

- [38] GERINGER, B.; HOFMANN, P.; PFLAUM, H. (2011). Potenzial von Hydriertem Pflanzenöl (HVO) unter besonderer Berücksichtigung alternativer Brennverfahren und Einspritzstrategien. In: LEIPERTZ, A. (Hrsg.): Motorische Verbrennung – Engine Combustion Processes. 10. Tagung, München, 24.–25. März, Haus der Technik. Berichte zur Energie- und Verfahrenstechnik (BEV), Nr. 11.1. Erlangen: ESYTEC, S. 211–224, ISBN 3-931901-72-6
- [39] GÖTZ, K.; ZICKMANN, S.; FEY, B.; BÜNGER, J.; STAPF, W.; FAN, Z.; GARBE, T.; MUNACK, A.; KRAHL, J. (2015): Diesel R33. Abschlussbericht zum Projektvorhaben. Fuels Joint Research Group – Interdisziplinäre Kraftstoffforschung für die Mobilität der Zukunft, Nr. 15. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier, 190 Seiten, eISBN 978-3-7369-8169-0
- [40] GREN, L.; MALMBORG, V. B.; FALK, J.; MARKULA, L.; NOVAKOVIC, M.; SHAMUN, S.; ERIKSSON, A. C.; KRISTENSEN, T. B.; SVENNINGSSON, B.; TUNÉR, M.; KARJALAINEN, P.; PAGELS, J. (2021): Effects of renewable fuel and exhaust aftertreatment on primary and secondary emissions from a modern heavy-duty diesel engine. In: Journal of Aerosol Science, Bd. 156, Nr. 1, Art.-Nr. 105781, S. 1–16
- [41] HAUBMANN, J.; MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT (2021): Synthetische Kraftstoffe. Drucksache 16/9739. Hrsg.: Landtag von Baden-Württemberg, Stuttgart. 4 Seiten, URL: https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP16/Drucksachen/9000/16_9739_D.pdf (Stand: 04.04.2023)
- [42] JOHANSSON, M.; JACOBSSON, L.; SIMONSEN, H. (2015): Investigation of Cold Start Operability, Long Term Impact, Emissions and Fuel Consumption of HVO Fuel in Volvo Car Engines and Vehicles. In: DENBRATT, I.; SUBIC, A.; WELLNITZ, J. (Hrsg.): Sustainable Automotive Technologies 2014. Proceedings of the 6th ICSAT. Lecture Notes in Mobility. Cham: Springer International Publishing, S. 189–196, ISBN 978-3-319-17999-5, ISSN 2196-5552
- [43] KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (2016): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 1867 Seiten, ISBN 978-3-662-47438-9
- [44] KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT) (2021): reFuels für den breiten Einsatz geeignet. Presseinformation, Nr. 066/2021. Karlsruhe: KIT Gesamtkommunikation, 41 Seiten, URL: https://www.kit.edu/kit/pi_2021_066_refuels-fur-den-breiten-einsatz-geeignet.php (Stand: 04.04.2023)
- [45] KRAHL, J.; ZIMON, A.; SCHRÖDER, O.; FEY, B.; BOCKEY, D. (2012): Diesel regenerativ. Fuels Joint Research Group – Interdisziplinäre Kraftstoffforschung für die Mobilität der Zukunft, Nr. 2. 1. Auflage. Göttingen: Cuvillier, 81 Seiten, ISBN 978-3-95404-174-9
- [46] KRÖGER, W. (2021): Paraffinische Kraftstoffe – ja oder nein? In: Brennstoffspiegel + Mineralölrundschau, Bd. 17, Nr. 09, S. 46–49
- [47] KRÖNER, G.; UNGLERT, M. (2019): Löslichkeitsparameter und die Vereinfachung der Erfassung durch Permittivität. In: HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN COBURG (Hrsg.): 10. Biokraftstoffsymposium. Coburg, 25.–26. Juli, URL: <https://docplayer.org/storage/117/226377635/1687939722/digvegFALO4JKihY2W-JPg/226377635.pdf> (Stand: 28.06.2023)

- [48] LAKANEN, L.; GRÖNMAN, K.; VÄISÄNEN, S.; KASURINEN, H.; SOININEN, A.; SOUKKA, R. (2021): Applying the handprint approach to assess the air pollutant reduction potential of paraffinic renewable diesel fuel in the car fleet of the city of Helsinki. In: Journal of Cleaner Production, Bd. 290, Art.-Nr. 125786, S. 1–9
- [49] LIEBHERR INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH (2023): Emissionsfreie Mining-Geräte. Biberach an der Riß: Liebherr-International Deutschland GmbH, 16 Seiten, URL: <https://www.liebherr.com/de/deu/magazin/zero-emission-mining/zero-emission-mining.html> (Stand: 09.03.2023)
- [50] MCCAFFERY, C.; KARAVALAKIS, G.; DURBIN, T.; JUNG, H.; JOHNSON, K. (2020): Engine-Out Emissions Characteristics of a Light Duty Vehicle Operating on a Hydrogenated Vegetable Oil Renewable Diesel. SAE Technical Paper, Nr. 2020-01-0337. Warrendale, PA, USA: SAE International, 12 Seiten
- [51] NAUMANN, K.; SCHRÖDER, J.; OEHMICHEN, K.; ETZOLD, H.; MÜLLER-LANGER, F.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; RAKSHA, T.; SCHMIDT, P. (2019): Monitoring Biokraftstoffsektor. DBFZ Report, Nr. 11. 4. Auflage. Leipzig: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH, 170 Seiten, ISBN 978-3-946629-36-8, ISSN 2197-4632
- [52] NESTE GERMANY GMBH (2022): Von führenden Fahrzeugherstellern freigegeben. 2 Seiten, Düsseldorf: Neste Germany GmbH, URL: <https://www.neste.de/neste-my-renewable-diesel/produktinformationen/von-fahrzeugherstellern-freigegeben> (Stand: 06.07.2022)
- [53] NESTE GERMANY GMBH (2023): Kundenreferenzen. 5 Seiten, Düsseldorf: Neste Germany GmbH, URL: <https://www.neste.de/neste-my-renewable-diesel/kundenreferenzen> (Stand: 09.03.2023)
- [54] NESTE OYJ (2021): Telefonische Auskunft von Marco Lietz vom 09.06.2021
- [55] NIKANDER, S. (2008): Greenhouse gas and energy intensity of product chain: case transport biofuel. Thesis, Degree: Master of Science in Engineering. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology, 112 Seiten, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil and Environmental Engineering, URL: https://www.neste.fi/sites/neste.fi/files/case_study_of_nexbtl_ghg_and_energy_intensity.pdf (Stand: 04.04.2023)
- [56] OELCHECK GMBH (2022): Limitwerte für Schmierstoffanalysen. 30 Seiten, Brandenburg: OELCHECK GmbH, URL: <https://de.oelcheck.com/wiki/limitwerte-schmierstoffanalysen/> (Stand: 02.08.2022)
- [57] OWI SCIENCE FOR FUELS gGMBH, AN-INSTITUT DER RWTH AACHEN (2022): Paraffinische Dieselkraftstoffe. Untersuchungen und Beschreibung des Löslichkeitsverhalten von paraffinischen Dieselkraftstoffen. 4 Seiten, Herzogenrath: OWI Science for Fuels gGmbH, An-Institut der RWTH Aachen, URL: <https://www.owi-aachen.de/forschung-entwicklung/brenn-kraftstoffe/projekte-zu-brenn-kraft-und-schmierstoffen/paraffinische-dieselkraftstoffe/> (Stand: 11.08.2022)
- [58] PANOUTSOU, C.; GERMER, S.; KARKA, P.; PAPADOKOSTANTAKIS, S.; KROYAN, Y.; WOJCIESZYK, M.; MANIATIS, K.; MARCHAND, P.; LANDALV, I. (2021): Advanced biofuels to decarbonise European transport by 2030. Markets, challenges, and policies that impact their successful market uptake. Energy Strategy Reviews, Bd. 34, Nr. 8, Art.-Nr. 100633, S. 1–23

- [59] PECHOUT, M.; KOTEK, M.; JINDRA, P.; MACOUN, D.; HART, J.; VOJTISEK-LOM, M. (2019): Comparison of hydrogenated vegetable oil and biodiesel effects on combustion, unregulated and regulated gaseous pollutants and DPF regeneration procedure in a Euro6 car. *The Science of the total environment*, Bd. 696, Nr. 2, Art.-Nr. 133748, S. 1–14
- [60] PRUSSI, M.; YUGO, M.; PRADA, L. DE; PADELLA, M.; EDWARDS, R.; LONZA, L. (2020): JEC Well-to-Tank report v5 – Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context., EUR 30269 EN, JRC119036, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 248 Seiten, ISBN 978-92-76-19926-7, ISSN 1831-9424
- [61] RECYCLING MAGAZIN (Hrsg.) (2022): HVO als ein alternativer Kraftstoff. 4 Seiten, München: DETAIL Business Information GmbH, URL: <https://www.recyclingmagazin.de/2022/01/19/hvo-als-ein-alternativer-kraftstoff/> (Stand: 19.05.2022)
- [62] REMMELE, E. (2009): Handbuch Herstellung von Rapsölkraftstoff in dezentralen Ölgewinnungsanlagen. 2. Auflage. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 88 Seiten, ISBN 978-3-9803927-9-2
- [63] REMMELE, E.; ECKEL, H.; PICKEL, P.; RATHBAUER, J.; REINHOLD, G.; STIRNIMANN, R.; HÖRNER, R.; UPPENKAMP, N. (2020): Alternative Antriebssysteme für Landmaschinen. KTBL-Schrift, Nr. 519. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), 133 Seiten, ISBN 978-3-945088-73-9
- [64] SCHRÖDER, J.; NAUMANN, K.; DÖGNITZ, N.; COSTA DE PAIVA, G.; HAUSCHILD, S.; MEISEL, K.; ETZOLD, H.; NIEß, S.; KÖCHERMANN, J.; GÖRSCH, K.; CYFFKA, K.-F.; MÜLLER-LANGER, F.; REMMELE, E.; THUNEKE, K.; NEULING, U.; ZITSCHER, T.; BAUER, C.; SACCHI, R. (2022): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. Stand: 21. Januar 2022. 1. Auflage. Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH (DBFZ) (Hrsg.), Leipzig. DBFZ-Report, Nr. 44, 342 Seiten, ISBN 978-3-946629-82-5, ISSN 2197-4632
- [65] SIEVERS, A.; WILLNER, T. (2020): Fuels from Waste and Hydrogen – The HAW Hamburg Approach. In: WERNER, J.; BIETHAHN, N.; KOLKE, R.; SUCKY, E.; HONEKAMP, W. (Hrsg.): *Mobility in a Globalised World 2019. Logistik und Supply Chain Management*, Nr. 23. Bamberg: University of Bamberg Press, S. 291–304, ISBN 978-3-86309-732-5, ISSN 2191-2424
- [66] SWIDERSKI, E.; STENGEL, B.; PINKERT, F.; BUCHHOLZ, B. (2022): Einfluss von E-Fuels auf Flammenstrukturen und Verbrennungsprozesse von Großdieselmotoren. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, Bd. 83, Nr. 5, S. 54–61
- [67] THUNEKE, K.; REMMELE, E. (2021): Klimafreundliche Antriebe für Landmaschinen. *Schule und Beratung*, Nr. 5-7, S. 29–32
- [68] TOOL-FUEL SERVICES GMBH (2020): Sicherheitsdatenblatt – C.A.R.E. Diesel. 40 Seiten, Hamburg: TOOL-FUEL Services GmbH, URL: https://www.edi-hohenlohe.de/wp-content/uploads/pdf/sicherheitsdatenblaetter/SDB_C.A.R.E.-Diesel.pdf <https://toolfuel.eu/> (Stand: 04.04.2023)
- [69] TOTALENERGIES MARKETING & SERVICES (2023): Sicherheitsdatenblatt Hydrogenated Vegetable Oil (HVO) – UILE VEGETALE HYDROTRAITÉE (HVO). Überarbeitungsdatum 31.03.2023, 39 Seiten, Berlin: TotalEnergies Marketing Deutschland GmbH, URL: <https://sdstotalms.total.com/TotalPullWebsite/en/Home/Ge-tSds?docid=1626683> (Stand: 04.04.2023)

- [70] UNGLERT, M.; KÖSTNER, T. (2021): Entwicklung einer on-board Sensorik zur Früherkennung von Ablagerungsbildungen in biodieselhaltigen Kraftstoffen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2016–31.01.2021. Förderkennzeichen: UFOP-Projekt 540/151 BMBF13FH028PX5. Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e. V. (UFOP) (Hrsg.). UFOP-Schriften – Biodiesel & Co, Berlin, Coburg. Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg, 102 Seiten
- [71] Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 905), zuletzt geändert durch Art. 256 Elfte ZuständigkeitsanpassungsVO vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328)
- [72] VOLVO GROUP HEADQUARTERS (2019): Innovation and sustainability key when Volvo CE invests for the future in Eskilstuna. Press Information, 7/12/2019. 1 Seite, Gothenburg, Sweden: Volvo Group Headquarters, URL: <https://www.volvoce.com/global/en/news-and-events/press-releases/2019/innovation-and-sustainability-key-when-volvo-ce-invests-for-the-future-in-eskilstuna/> (Stand: 04.04.2023)
- [73] WAGNER, U.; FUCHS, S. (2021): Ohne synthetische Kraftstoffe schaffen wir die Klimawende nicht. Eine Zwischenbilanz des Projekts „reFuels – Kraftstoffe neu denken“ am KIT. Campus-Report, Nr. 1022. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, URL: https://media.bibliothek.kit.edu/world/2021/DIVA-2021-253_mp3.mp3 (Stand: 19.05.2022)
- [74] WINKLER, M.; RILL, A. (2021): Kraftstoffe (Dieselmotoren) – Technisches Rundschreiben. TR_0199_99_01218_5_DE Ersatz für: 0199-99-01218/4 0199-99-01218/5 DE. Datum: 25.08.2021. ID 002893-05. Hrsg.: Deutz AG. Köln: DEUTZ Motoren, 36 Seiten

Anhang

Anhang 1: Fragebogen zum Meinungsbild

Fragebogen zum Meinungsbild

Hydriertes Pflanzenöl (HVO) als Reinkraftstoff für Traktoren
der staatlichen Versuchsbetriebe, um die Ziele der Klimaschutzoffensive zu erfüllen

Kennen Sie hydriertes Pflanzenöl, das auch HVO genannt wird?

ja ich habe schon davon gehört nein

Kurzinformation zu hydriertem Pflanzenöl (HVO) als Kraftstoff

- HVO ist ein Biokraftstoff, der aus Pflanzenölen sowie aus Rest- und Abfallstoffen hergestellt werden kann. Zur Herstellung wird auch Wasserstoff benötigt.
- Die Herstellung erfolgt großtechnisch in Anlagen weltweit, in Deutschland wird kein HVO produziert.
- HVO ist in der DIN 15940 genormt und zählt zu den paraffinischen Dieselmotoren.
- HVO kann in Dieselmotoren und als Kerosinersatz in der Luftfahrt in Beimischung zu fossilem Kraftstoff oder unvermischt eingesetzt werden.
- Mehrere Landmaschinenhersteller geben ihre Dieselfahrzeuge für HVO nach DIN 15940 frei.
- Für HVO wird keine Agrardiesel-Rückvergütung (Gasölbeihilfe) gewährt.
- An öffentlichen Tankstellen in Deutschland darf HVO in Reinform nicht verkauft werden.
- HVO, das fossilem Diesel beigemischt wird, wird bisher hauptsächlich aus Palmöl und zu geringen Anteilen aus Rest- und Abfallstoffen produziert.
- Ab dem Jahr 2023 darf in der EU kein Palmöl mehr für die Herstellung von HVO verwendet werden.
- Das unter dem Namen C.A.R.E.-Diesel® vermarktete HVO enthält seit 2019 kein Palmöl mehr und besteht ausschließlich aus Altspeisefetten, nicht mehr als Nahrungsmittel verkäuflichen Pflanzenölen sowie aus Reststoffen aus der Pflanzenölverarbeitung.

Nachfolgende Fragen beziehen sich auf palmölfreies C.A.R.E.-Diesel® aus Reststoffen zur Anwendung in Reinform in den Maschinen der staatlichen Versuchsbetriebe als eine mögliche Option Dieselmotoren zu ersetzen.

Welcher Kraftstoff stellt für Sie eine gute Option für den klimafreundlichen Betrieb von Traktoren der staatlichen Versuchsbetriebe dar?

– mehrere Antworten sind möglich –

FAME (Biodiesel) Biomethan (CNG) Biomethan (LNG) Pflanzenöl
 Wasserstoff Elektroantrieb HVO keiner, weiterhin Diesel

Was ist Ihr Favorit/ sind Ihre Favoriten? _____

Anhang 1: Fragebogen zum Meinungsbild (Fortsetzung)

Wie viele verschiedene Kraftstoffe würden Sie auf ihrem Betrieb maximal gleichzeitig einsetzen (Anzahl Hoftankstellen)?

Welche Aussagen bezüglich HVO aus Rest- und Abfallstoffen treffen zu? - Bitte ankreuzen -

1. Die heimische Landwirtschaft profitiert von der Herstellung und Nutzung von HVO.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
2. Die Verwendung von HVO trägt zum Klimaschutz bei.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
3. Der Kraftstoff HVO ist gut verträglich für neue Fahrzeuge und Maschinen.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
4. Der Kraftstoff HVO ist gut verträglich für Bestandsfahrzeuge.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
5. Ein Mehrpreis von HVO gegenüber Diesel von 20 Cent/l ist für die Versuchsbetriebe akzeptabel.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
6. Der Kraftstoff HVO ist für die Umwelt schädlich.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
7. Der Kraftstoff HVO reduziert Luftschadstoffemissionen.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
8. Der Kraftstoff HVO soll künftig vorrangig in der Luftfahrt eingesetzt werden.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
9. Ich sehe ein Versorgungsproblem, wenn HVO nicht in Deutschland produziert wird.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
10. Der Kraftstoff HVO konkurriert um die gleichen Rohstoffe wie Biodiesel.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht
11. Mit der Nutzung von HVO wird der Freistaat Bayern seiner Vorbildfunktion beim Klimaschutz gerecht.
 ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht

Anhang 1: Fragebogen zum Meinungsbild (Fortsetzung)

12. HVO sollte der bevorzugte Kraftstoff für alle landwirtschaftlichen Betriebe sein.

- ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht

Abschließend noch drei zusammenfassende Fragen zu HVO:

13. Ist HVO Ihrer Meinung nach eine nachhaltige Alternative zum Dieselmotorkraftstoff?

- ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht

14. Würden Sie HVO in Maschinen mit Freigabe durch den Hersteller tanken?

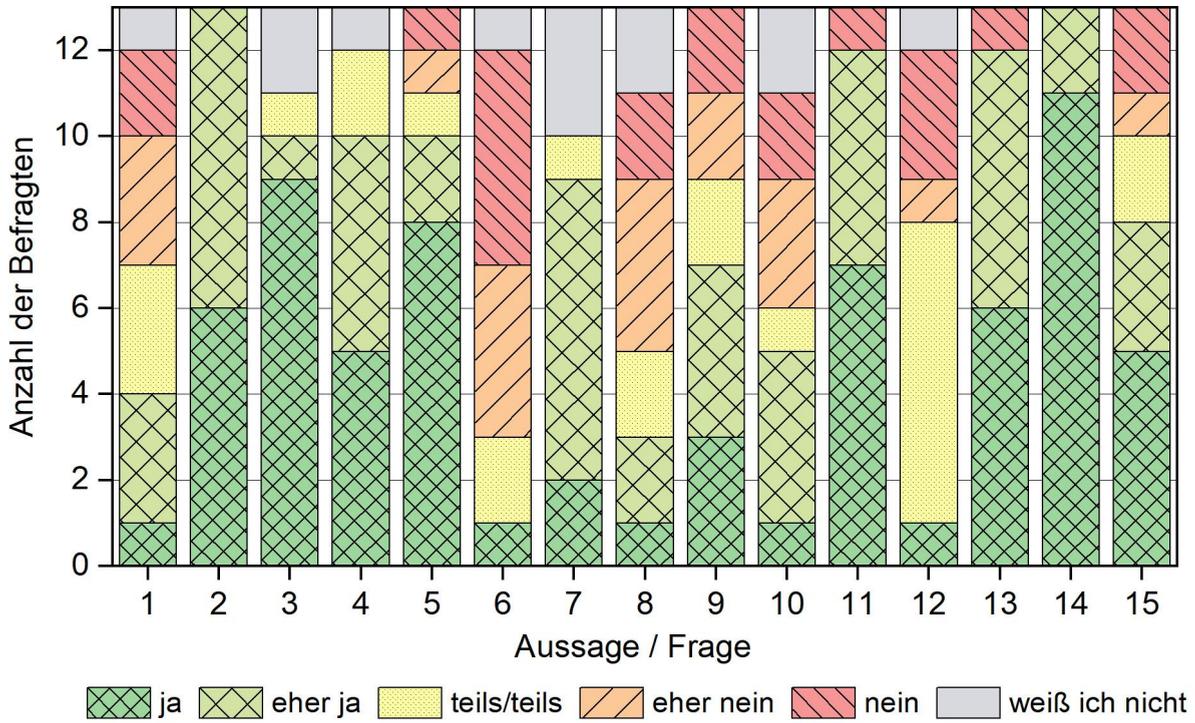
- ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht

15. Würden Sie HVO in älteren Maschinen tanken, auch wenn keine Freigabe durch den Hersteller besteht?

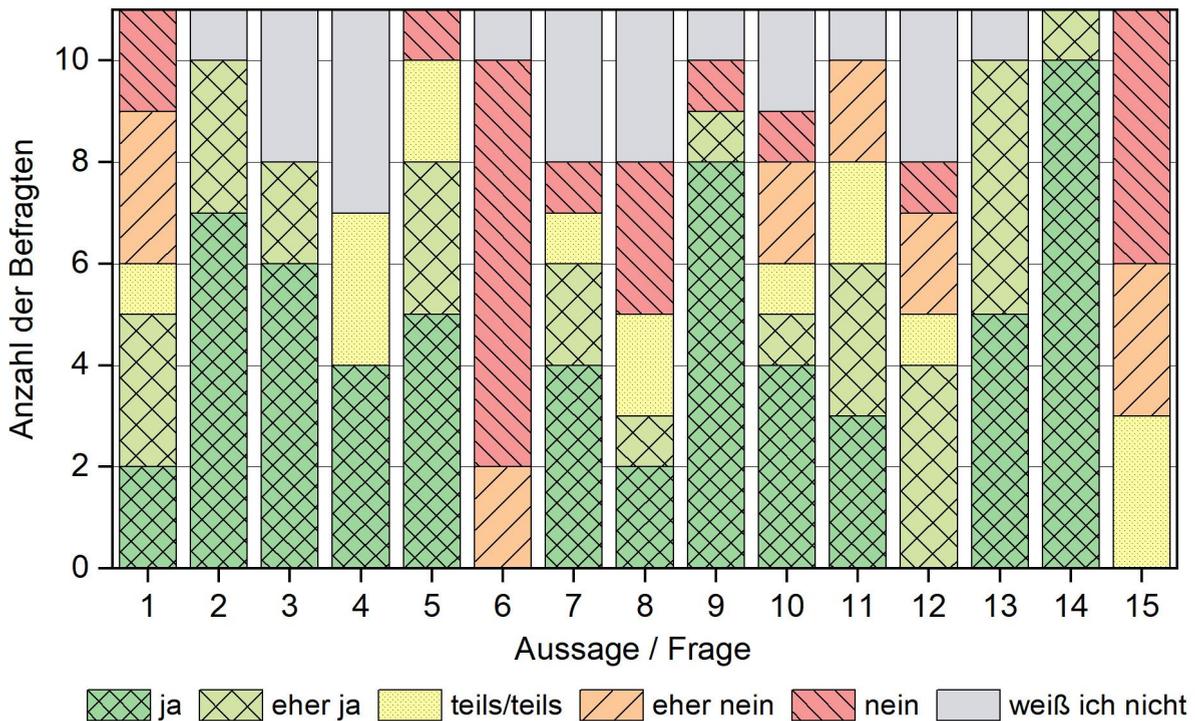
- ja eher ja teils/teils eher nein nein weiß ich nicht

Was ich noch sagen möchte:

Anhang 2: *Einschätzungen von 13 Fachkräften zu 15 Aspekten der Nutzung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen (Wortlaut der Aussagen bzw. Fragen siehe Fragebogen in Anhang 1)*



Anhang 3: *Einschätzungen von 11 Führungskräften zu 15 Aspekten der Nutzung von HVO aus Rest- und Abfallstoffen (Wortlaut der Aussagen bzw. Fragen siehe Fragebogen in Anhang 1)*



Berichte aus dem TFZ

Bisher erschienene Ausgaben der Schriftenreihe des Technologie- und Förderzentrums:

- 1 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Projektphase 1: Erhebung der Ölqualität und Umfrage in der Praxis
- 2 Erprobung der Brennwerttechnik bei häuslichen Holzhackschnitzelheizungen mit Sekundärwärmetauscher
- 3 Daten und Fakten zur dezentralen Ölgewinnung in Deutschland
- 4 Untersuchungen zum Feinstaubausstoß von Holzzentralheizungsanlagen kleiner Leistung
- 5 Qualität von kaltgepresstem Rapsöl als Speiseöl und Festlegung eines Qualitätsstandards
- 6 Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung der Cetanzahl von Rapsölkraftstoff
- 7 Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Rapsöl als Kraftstoff und dem Motorenöl in pflanzenöлтаuglichen Motoren
- 8 Wärmegewinnung aus Biomasse – Begleitmaterialien zur Informationsveranstaltung
- 9 Maize as Energy Crop for Combustion – Agricultural Optimisation of Fuel Supply
- 10 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden
- 11 Rationelle Scheitholzbereitstellungsverfahren
- 12 Qualitätssicherung bei der dezentralen Pflanzenölerzeugung für den Nicht-Nahrungsbereich – Technologische Untersuchungen und Erarbeitung von Qualitätssicherungsmaßnahmen
- 13 Getreidekörner als Brennstoff für Kleinf Feuerungen – Technische Möglichkeiten und Umwelteffekte
- 14 Mutagenität der Partikelemissionen eines mit Rapsöl- und Dieselmotoren betriebenen Traktors
- 15 Befragung von Betreibern dezentraler Ölsaatenverarbeitungsanlagen
- 16 Schnellbestimmung des Wassergehaltes im Holzsplit
- 17 Untersuchungen zum Einsatz rapsölbetriebener Traktoren beim Lehr-, Versuchs- und Fachzentrum für Ökologischen Landbau und Tierhaltung Kringell
- 18 Miscanthus als nachwachsender Rohstoff – Ergebnisse als bayerischen Forschungsarbeiten
- 19 Miscanthus: Anbau und Nutzung – Informationen für die Praxis

- 20 Prüfung der Eignung von Verfahren zur Reduktion ablagerungs- und aschebildender Elemente in Rapsölkraftstoff bei der dezentralen Erzeugung
- 21 Kleine Biomassefeuerungen – Markt Betrachtungen, Betriebsdaten, Kosten und Wirtschaftlichkeit
- 22 Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen
- 23 Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel
- 24 Charakterisierung von Holzbriketts
- 25 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Auswahl der Additive und Überprüfung der Wirksamkeit
- 26 Status quo der dezentralen Ölgewinnung – bundesweite Befragung
- 27 Entwicklung einer Siloabdeckung aus nachwachsenden Rohstoffen
- 28 Sorghumhirse als nachwachsender Rohstoff – Sortenscreening und Anbauszenarien
- 29 Sorghum als Energiepflanze – Optimierung der Produktionstechnik
- 30 Ethanol aus Zuckerhirse – Gesamtkonzept zur nachhaltigen Nutzung von Zuckerhirse als Rohstoff für die Ethanolherstellung
- 31 Langzeiterfahrungen zum Einsatz von Rapsölkraftstoff in Traktoren der Abgasstufen I und II
- 32 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufe IIIA – Prüfstanduntersuchungen und Feldeinsatz auf Betrieben der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft
- 33 Betriebs- und Emissionsverhalten eines pflanzenöлтаuglichen Traktors mit Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl
- 34 Dezentrale Ölsaatenverarbeitung 2012/2013 – eine bundesweite Befragung
- 35 Additivierung von Rapsölkraftstoff – Projektphase 2: Langzeit- und Prüfstanduntersuchungen
- 36 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen
- 37 Screening und Selektion von Amarantsorten und -linien als spurenelementreiches Biogassubstrat
- 38 Untersuchung der Praxistauglichkeit eines Elektrofilters für Kleinfeuerungsanlagen
- 39 Eignung von Buchweizen und Quinoa als späte Zweitfrüchte für die Biogasnutzung
- 40 Optimale Bereitstellungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 41 Qualitätssicherung bei der dezentralen Herstellung von Rapsölkraftstoff nach DIN 51605

- 42 Weiterentwicklung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe
- 43 Brennstoffqualität von Holzpellets
- 44 Herstellung und Demonstration der Praxistauglichkeit von Traktoren mit Motoren der Abgasstufe IV im Betrieb mit Pflanzenöl
- 45 ExpResBio – Methoden
- 46 Qualität von Holzhackschnitzeln in Bayern
- 47 Pflanzenöлтаugliche Traktoren der Abgasstufen I bis IIIB
- 48 Sorghum als Biogassubstrat – Präzisierung der Anbauempfehlungen für bayerische Anbaubedingungen
- 49 Zünd- und Verbrennungsverhalten alternativer Kraftstoffe
- 50 Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern – Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode
- 51 Emissions- und Betriebsverhalten eines Biomethantraktors mit Zündstrahlmotor
- 52 Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln
- 53 Bioenergieträger mit Blühaspekt: Leguminosen-Getreide-Gemenge
- 54 Dauerkulturen – Aufzeigen der bayernweiten Anbaueignung
- 55 Lagerung von Holzhackschnitzeln
- 56 Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb
- 57 Optimierungspotenziale bei Kaminöfen – Emissionen, Wirkungsgrad und Wärmeverluste
- 58 Überführung einer Siloabdeckung auf Basis Nachwachsender Rohstoffe in die Praxisreife
- 59 Regionalspezifische Treibhausgasemissionen der Rapsverarbeitung in Bayern
- 60 Langzeitmonitoring pflanzenöлтаuglicher Traktoren der Abgasstufen I bis IV
- 61 Nutzereinflüsse auf die Emissionen aus Kaminöfen
- 62 Abgasverhalten von Fahrzeugen im realen Betrieb mit alternativen Kraftstoffen – Bestimmung mit einem portablen Emissionsmesssystem (PEMS)
- 63 Rapsölkraftstoff als Energieträger für den Betrieb eines forstwirtschaftlichen Vollernters (Harvester)
- 64 Amaranth als Biogassubstrat – Selektion zur Erarbeitung praxistauglicher Amaranthlinien für bayerische Standorte
- 65 Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinfeuerungsanlagen – Verbrennungstechnische Optimierung durch Additivierung und Mischung
- 66 Einflussfaktoren auf die NO_x-Emissionen in Hackschnitzelheizwerken zwischen 1 und 5 Megawatt

- 67 Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL
- 68 Hanf zur stofflichen Nutzung – Stand und Entwicklungen
- 69 Grundlagenorientierte Untersuchungen zum Zünd- und Verbrennungsverhalten von Pflanzenölkraftstoff und Übertragung auf ein Motorsystem der Abgasstufe V (EVOLUM)
- 70 Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel
- 71 Ertragsstabilität, Etablierung und Umweltparameter mehrjähriger Energiepflanzen – Dauerkulturen II
- 72 Stoffliche Nutzung von Biomasseaschen als Baustein der Bioökonomie
- 73 Agri-Photovoltaik – Stand und offene Fragen
- 74 Erweiterte Holzpelletcharakterisierung – Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln
- 75 Entwicklung von Umbruchstrategien für Dauerkulturflächen und Weiterführung des Gärrestdüngungsversuchs in Durchwachsener Silphie
- 76 Mineralisch verschmutzte Holzbrennstoffe – Teil 1: Auswirkung auf die Verbrennung
- 77 Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern – Thermische Verwertung
- 78 Verwertung und Anbauoptimierung von Hanf als Nachwachsender Rohstoff
- 81 HVO-Diesel für Traktoren – Analyse zum Einsatz des paraffinischen Dieselmotorkraftstoffs HVO auf Staatsbetrieben
- 82 Innovative Verfahrensketten für Holzbrennstoffe mit einem Duplex-Schneckenhacker

