

Das Potenzial klimafreundlicher Kraftstoffe aus natürlichen Ölen



Bildnachweis: <https://www.shentongroup.co.uk>

Dr. Hans Jürgen Wernicke

3. Oktober 2025

1. Einführung

Dieser Beitrag befasst sich mit dem weltweiten Potenzial biogener Treibstoffe auf Basis nicht verzehrbarer pflanzlicher Öle zur Beimischung oder als Ersatz für entsprechende fossile Äquivalente wie Diesel, Benzin und Kerosin.

Pflanzliche Öle werden seit vielen Jahren als so genannter Biodiesel entweder unmittelbar oder bevorzugt nach einer Umesterung als Fettsäuremethylester (FAME, Fatty Acid Methylester) als sogenannter Biodiesel genutzt.

Ein Teil dieser pflanzlichen Öle wird unter ökologisch zweifelhaften Bedingungen erzeugt (z.B. in großem Umfang Palmöl), er konkurriert auch mit der Erzeugung von Lebens- und Futtermitteln (Stichwort „Teller-oder-Tank“). Dieser Teil wird **hier nicht weiter betrachtet**.

Vielmehr geht es um das Potenzial und die technischen sowie wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den großflächigen Anbau bestimmter Ölpflanzen wie z. B. Jatropha, ohne dass es zu Konflikten hinsichtlich der Landnutzung und des Ressourceneinsatzes (z. B. Wasser) kommt.

Vorteile dieser pflanzlichen Öle sind ihre Nachhaltigkeit, ihre biologische Abbaubarkeit und in der Regel ein geringerer CO₂-Fußabdruck im Vergleich zu fossilen Treibstoffen.

Die so hergestellten Treibstoffe sind voll kompatibel mit fossil hergestellten Äquivalenten und unterscheiden sich nur geringfügig in ihren Eigenschaften.

Bereits kommerziell genutzt werden Produkte, die durch hydrierende Spaltung aus Altfetten und Altspeseölen sowie Fettsäureabfällen erzeugt werden. Sie sind unter den Begriffen HVO (Hydroprocessed Vegetable Oil) und HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) bekannt. Eine Übersicht hierzu enthalten u. a. drei frühere GES-Publikationen ^{1 2 3}.

Ein zusätzlicher Aspekt ist die permanente Bindung von CO₂ im Holz der aufgeforsteten Ölpflanzen, sofern diese am Ende ihrer Nutzungsdauer beispielsweise als Baumaterial oder zur Erzeugung von Biokohle als Bodenverbesserer verwendet und nicht verbrannt werden.

Andere, ebenfalls kompatible, nicht-fossile Kraftstoffe beruhen auf anderen Rohstoffen und Herstellungspfaden. E-Fuels werden beispielsweise in einem „Power-to-Liquid“-Verfahren aus regenerativ hergestelltem Wasserstoff und CO₂ mittels der Fischer-Tropsch- oder der Methanol-Synthese gewonnen. Ihre Herstellung ist deutlich aufwändiger.

Dies gilt auch für Produkte aus dem Biomass-to-Liquid“-Verfahren. Dieses basiert auf einer

¹ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/HVO-Papier_final_HJW_17.9.22_update-3.10.22_18.1.24.pdf

² https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2024/07/240620_Die-Rolle-von-Kraftstoffen-auf-dem-Weg-zu-klimaneutraler-Mobilitaet_HJW_18062024_bb_update-June-30k.pdf

³ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2024/04/240410hvo_final.pdf

Biomasse-Vergasung in Kombination mit der Fischer-Tropsch-Synthese, auf einer Biomasse-Pyrolyse oder auch auf fermentativen Verfahrensstufen.

Auf eine optimistische Phase in den 2010er-Jahren, in der vor allem die Jatropha-Pflanze zur Herstellung von Biodiesel genutzt wurde, folgten Ernüchterung und das Aus für viele Projekte. Gründe hierfür waren geringere Erträge als erwartet, eine fehlende Infrastruktur für Anbau und Aufbereitung sowie eine im Vergleich zu den leichter zugänglichen Palm-, Raps- und Sojaölen ausbleibende Nachfrage.

Zu der heutigen Produktionsmenge von nicht verzehrbaren Ölen sowie zum zukünftigen Potenzial, aus diesen Rohstoffen Treibstoffe zu produzieren, gibt es nur wenige und teilweise widersprüchliche Daten. In einer Abschätzung aus dem Jahr 2018⁴ wurde eine erzielbare Jatrophaöl-Produktion von 263 Mio Tonnen für das Jahr 2050 prognostiziert. Dies würde nach Abzug der Weiterverarbeitungsverluste ungefähr die Hälfte des dann erwarteten Kerosinverbrauchs abdecken und verdeutlicht das erhebliche Potenzial. Zudem gibt es Fortschritte bei der Züchtung und dem Anbau von Ölpflanzen, insbesondere der Jatropha-Pflanze.

Unter Vermeidung jeglicher Nutzungskonkurrenz mit der Lebens- und Futtermittelproduktion eröffnen sich dadurch neue Chancen, auf ungenutzten und kargen Flächen nicht verzehrbare („non-edible“) Öle für die Treibstoffproduktion zu gewinnen und sie für den wachsenden Bedarf an nachhaltigem Diesel-, Benzin- und Flugtreibstoff zu nutzen.

Trotz aller Bestrebungen, den Anteil elektrischer Antriebe zu erhöhen, ist in den kommenden Jahrzehnten weiterhin von überwiegend konventionellen – und zudem langlebigen – Verbrennungsantrieben auszugehen. Je nach Region und volkswirtschaftlicher Prosperität wird dieser Anteil jedoch unterschiedlich hoch ausfallen.

Die Industrieländer mit ihrem hohen Treibstoffbedarf könnten entsprechende Anbauprogramme für Ölpflanzen finanzieren und die Pflanzenöle im Gegenzug abnehmen, um sie in der vorhandenen Raffineriestruktur zur Erzeugung von biogenem Diesel, Benzin und Kerosin zu nutzen.

Die Einführung verpflichtender Beimischungsquoten biogener Treibstoffe zu konventionellen (fossilen) Treibstoffen führt unmittelbar zu einer Verbesserung der CO₂-Bilanz und hat den zusätzlichen Effekt einer saubereren Verbrennung im Vergleich zu fossilen Treibstoffen.

Gegen die Nutzung von pflanzlichen Altölen und -fetten sowie von nicht verzehrbaren Ölen gibt es jedoch auch Bedenken. So wird beispielsweise befürchtet, dass die Zertifizierung der Ölherkunft missbraucht wird. Zudem wird unterstellt, dass durch den Einsatz biogene Treibstoffe die Verwendung fossiler Kraftstoffe zementiert wird und ein kompletter Wechsel auf andere

⁴ G.Gruber et al, „Energy Storage and Balancing Power for 100% Renewable Hybrid Systems: The Potential for Jatropha for Rural Electrification in Hot Semi-Arid Areas“, 26th European Biomass Conference, Copenhagen, 14.-17. May 2018

(elektrische) Antriebsformen dadurch verzögert wird ^{5 6}.

Auch die geringeren CO₂-Emissionen von HVO 100 im Vergleich zu fossilem Diesel werden in der Gesamtbilanz angezweifelt. ⁷

Der hier vorgeschlagene großflächige Anbau und die Verwendung dieser Ölpflanzen folgen einem übergeordneten allgemeinen Ansatz, eine wirtschaftliche Kooperation zwischen Industrie- und Entwicklungsländern (vor allem im Globalen Süden) zu fördern. Ziel es ist, durch den Anbau von Energiepflanzen und deren Weiterverarbeitung und Verwendung gemeinsam Treibhausgasemissionen zu verringern und zu beiderseitigem Nutzen teure sowie ineffiziente nationale Programme zu vermeiden. ^{8 9}

Der weltweite Verbrauch von Diesel, Benzin bzw. Kerosin (Jet Fuel) betrug im Jahr 2024 ca. 1,4 Mrd. Tonnen, 1,1 Mrd. Tonnen ¹⁰ bzw. ca. 370 Mio. Tonnen ¹¹. Die Projektionen für den zukünftigen Verbrauch werden von den jeweiligen Szenarien für die Entwicklung der Mobilität und den beteiligten Antriebsformen bestimmt.

Sie liegen z. B. für Dieselkraftstoff nach IEA-Prognosen für das Jahr 2040 in einem Bereich von 460 - 510 Mio. Tonnen ¹², nach Prognosen der OPEC wenig verändert bei ca. 1,2 - 1,4 Mrd. Tonnen ¹³.

Die Zumischung von Biodiesel (FAME) und heute noch geringem, aber stark zunehmendem Anteil von HVO belief sich 2023 auf ca. 72 Mio. Tonnen ¹⁴, also etwa 5 % vom Diesel im weltweiten Durchschnitt.

Für den Luftverkehr und damit Kerosinbedarf wird eine Fortschreibung oder sogar Zunahme des Bedarfs in einem Bereich von 330 Mio. Tonnen bis 490 Mio. Tonnen vorhergesagt ^{9 10 15 16}.

⁵ Süddeutsche Zeitung, „Zweifelhafte Klimabilanz“ 7.8.2025

⁶ FAZ, „Wie nützlich ist Frittendiesel“, 23.8.2025

⁷ H.Fehrenbach et al, „Klimabilanz von Biodiesel und HVO auf Basis von gebrauchtem Pflanzenöl (UCO)“, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg 2025

⁸ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2025/07/250729internationale_klimapartnerschaften.pdf

⁹ Interview, F.J.Radermacher, <https://www.welt.de/wissenschaft/plus256340762/Energiepolitik-Es-muss-Schluss-sein-mit-dem-Klimanationalismus>, 21.7.2025

¹⁰ <https://www.energyinst.org/statistical-review>, „Statistical Review of World Energy 2025, accessed 20.8.2025

¹¹ <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>, accessed 21.8.25

¹² <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-outlook-2024-free-dataset>, accessed 21.8.25

¹³ https://publications.opec.org/woo/chapter/142/2640?utm_source=chatgpt.com, accessed 20.8.2025

¹⁴ https://www.ufop.de/files/3017/1767/4441/24_23_W_Biodiesel.pdf

¹⁵ <https://www.dnv.com/publications/transport-in-transition-242808>, accessed 21.8.25

¹⁶ Chemie-Technik, 2.8.2023, Prognose der Air Transport Action Group (ATAG)

So will die Europäische Union mit der Initiative „Refuel EU Aviation“ erreichen, dass Anbieter an EU-Flughäfen dem Kerosin einen Mindestanteil nachhaltiger Flugkraftstoffe (Sustainable Aviation Fuels (SAF)) beimischen, 2 % bis 2025, bis 2050 70 %.

Im Jahr 2025 basierte SAF zu 88 % auf HEFA, langfristig wird ein größerer Anteil auch durch andere Verfahren (Alcohol-toJet, Fischer-Tropsch) gedeckt werden ¹⁷.

2. Wesentliche Arten und Herkunft natürlicher nicht-essbarer Öle

Unter der Vielfalt der Pflanzen, die natürliche, nicht-essbare Öle für eine Herstellung von Biokraftstoffen erzeugen, sind Pflanzen für den Anbau an Land und für eine marine Kultivierung geeignete Algen zu unterscheiden.

Ölgewinnung aus Pflanzen an Land:

Nachstehend eine Beschreibung der vier wichtigsten Ölpflanzen zur Erzeugung nicht-verzehrbaren Öle:

a) Jatropha

Jatropha curcas gehört als Baum oder Strauch zu den Wolfsmilchgewächsen, die wegen ihrer Genügsamkeit auch auf nährstoffarmen und trockenen Böden angebaut werden können. Die Nüsse („Purgiernuss“) haben einen Ölanteil von 30 - 60 %. Das Öl ist für die Erzeugung insbesondere von Biodiesel gut geeignet.

Jatrophabäume benötigen zirka 3 bis 5 Jahre, um die ersten Früchte zu tragen, abhängig von den klimatischen Bedingungen, der Bodenqualität und dem Anbaumanagement.

b) Pongamia

Gehört als Baum zur Gattung der Millettia (Schmetterlingsblütler) bzw. Hülsenfrüchtler, der in Indien und Südostasien beheimatet ist.

Der Baum ist äußerst resistent gegen Temperaturen von unter 0°C bis zu etwa 50°C und wächst auf fast allen Böden. Die Samen haben einen Ölgehalt von 30 - 40 % (Karanjaöl).

¹⁷ https://www3.weforum.org/docs/WEF_Scaling_Sustainable_Aviation_Fuel_Supply_2024.pdf, accessed 28.8.2025



Abb 1: *Jatropha/Purgiernuss* ¹⁸



Abb. 2 *Pongamiasamen* ¹⁹

c) Rizinus

Gehört ebenfalls zu den Wolfsmilchgewächsen. Der *Rizinus communis* entstammt ursprünglich Nordost-Afrika, ist heute aber in fast allen tropischen und subtropischen Gebieten verbreitet. Der (giftige) Samen enthält 40 - 50 % (ungiftiges) Rizinusöl, auch bezeichnet als Kastoröl.

¹⁸ entnommen aus: <http://www.westafricanplants.senckenberg.de/>

¹⁹ entnommen aus: <https://www.indiamart.com/proddetail/dry-pongamia-oil-seed>



Abb. 3 Rizinussamen ²⁰

d) Neembaum

Der Neembaum (*Azadirachta indica*) gehört zu den Mahagonigewächsen und ist hauptsächlich in tropischen und subtropischen Gebieten verbreitet. Es ist besonders resistent gegen Trockenheit und kommt mit den meisten Bodentypen, bevorzugt sandigen Böden zurecht. Die Samen enthalten 30 - 50 % Öl.



Abb 4 Samen des Neembaums ²¹

Weitere Beispiele sind Öle aus den Samen des Kautschukbaums und der Färberdistel, aus den Nüsse des Seifenbaums und die Früchte des indischen Butterbaums und des besonders genügsamen chinesische Talgbaums.

²⁰ Entnommen aus <https://www.dreamstime.com/seed-ricinus-communis-castor-bean>

²¹ entnommen aus: <https://hortica.de/neemoel>

Algen:

Eine andere, aber derzeit noch nicht kommerziell genutzte Quelle für Öle sind Mikroalgen wie z. B. Chlorella, Nannochloropsis oder Botryococcus braunii. Sie weisen Ölgehalte von teilweise über 50 % ihrer Trockensubstanz auf.

Die flächenbezogenen Jahreserträge sind z. B. bei offenen Teichen mit 10 - 20 m³ Öl pro Hektar deutlich höher als zum Beispiel Raps (1,2 - 2 m³/ha) Soja (0,4-0,6 m³/ha)

Eine großtechnische Produktion algenbasierter Biotreibstoffe ist allerdings aufgrund des hohen Energieaufwands bei der Trocknung und Extraktion des Öls sowie wegen der geringen Erträge im Verhältnis zum Volumen des Kulturmediums noch unwirtschaftlich.

Sie wurde nur in wenigen Pilot- und Demonstrationsanlagen realisiert und häufig wieder aufgegeben.

Die Ölgewinnung aus Algen beschränkt sich daher heute auf besondere Produkte der Lebensmittelindustrie (Nahrungsergänzungsmittel, Omega-3-Fettsäuren), auf Tierfutterzusätze und Anwendungen in der Kosmetikindustrie.

Als Rohstoff für die Gewinnung biogener Treibstoffe kommen Algenöle aus wirtschaftlichen Gründen derzeit nicht zum Einsatz und werden in diesem Beitrag nicht weiter behandelt ^{22 23}.

Erträge der Ölpflanzen:

Für die vorgenannten vier Ölpflanzen ergeben sich je nach Region, Bodenbeschaffenheit und Klimaverhältnissen folgende Erträge mit erheblichem Potenzial für eine zukünftige Steigerung durch bessere Sorten und Optimierung der Anbaumethoden sowie Einsatz von Düngern:

Jatrophaöl: 0,6 – 2,0 to/Jahr und Hektar ²⁴

Pongamia/Karanjaöl: 1,0 – 2,4 to/Jahr und Hektar ²⁵

²² L.M.Casanova et al, "Development of Microalgae Biodiesel: Current Status and Perspectives", Microorganisms 11(1), 34 (2023)

²³ Shinqiu Zhang et al, "A review on biodiesel production from microalgae: Influencing parameters and recent advanced technologies" Front. Microbiol., Vol 13 (2022)

²⁴ Yanbing Liu et al, "Life cycle assessment and life cycle cost analysis of Jatropha biodiesel production in China", Biomass Conversion and Biorefinery 14, p. 28635–28660 (2024)

²⁵ F.Dalemans et al, "Tempering expectations on a novel biofuel tree: Seed and oil yield assessment of pongamia (Milletia pinnata) shows low productivity and high variability", Industrial Crops and Products Vol 178, p.114384 (2022)

Rizinus/Kastoröl: 0,75 – 1,5 to/Jahr und Hektar ²⁶

Neemöl: 0,4 – 1,5 to/Jahr und Hektar ²⁷

Zum Vergleich

Rapsöl 1,1 – 1,8 to/Jahr und Hektar (Deutschland) ²⁸

Die jährlichen Produktionsmengen dieser Öle sind schwer zu erfassen, da größere Projekte, insbesondere mit *Jatropha*, aufgrund unzureichender Erträge und mangelnder Wirtschaftlichkeit wieder aufgegeben wurden.

Neue *Jatropha*-Züchtungen erzielen im Versuchsanbau zwar bis zu viermal höhere Erträge als die ursprünglich verwendeten Wildtypen, dies ist jedoch stark abhängig von Bodenqualität und klimatischen Bedingungen. ^{29 30 31}

*Jatropha*öl ist heute ein Nischenprodukt mit einer Jahresproduktion von schätzungsweise 100 000 to/Jahr.

Auch bei *Karanja*öl und *Neem*öl werden Produktionsmengen in der Größenordnung von 50.000 to/a genannt.

Genauere Daten findet man für *Rizinus*/*Kastor*öl mit seinem breiten, etablierten Anwendungsspektrum. In 2023 wurden 950.000 to produziert ³², hauptsächlich als Basis für Schmierstoffe, Lacke sowie für Kosmetika und pharmazeutische Produkte. Hauptbestandteil des *Rizinus*öls ist der Ester der *Rizinolsäure*, der nach Umwandlung zu 11-Aminoundecansäure zur Herstellung von *Nylon-11* verwendet wird.

²⁶ S. Jindal et al, "Variability and association for seed yield, oil content and tree morphological traits in neem (*Azadiracta indica* A.Juss)", *Journal of Tropical Forest Science*, Vol 11, p. 320 (1999)

²⁷ V.Cafaro et.al., "Castor: A Renewed Oil Crop for the Mediterranean Environment", *Agronomy* 15(6), 1402 (2025)

²⁸ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/liste>, Jan. 2025, accessed Aug 5, 2025

²⁹ Chenxin Xi et al, "A New *Jatropha Curcas* Variety (JO S2) with Improved Seed Productivity", *Sustainability* 2014,6, 4355-4368

³⁰ Xue Bai et al, "Fusion of transgene and interspecies hybridization enhances seed yield and root rot disease resistance in *Jatropha curcas*", *Physiologia Plantarum* Vol 177 (2), 70183 (2025)

³¹ Mbako Jona et al, "Variation of *Jatropha curcas* seed oil content and fatty acid composition with fruit maturity stage", *Heliyon*. 2020, Vol 6(1), 03285 (2020)

³² <https://www.chemanalyst.com/industry-report/castor-oil-market>, accessed Aug 5 2025

3. Gewinnung und Weiterverarbeitung

Die Verfahrenstechnik für die Gewinnung des Öls aus Pflanzenfrüchten und -samen ist in allen Fällen ähnlich und besteht aus den in Abb. 4 gezeigten Schritten ³³.

(Bei der Verwendung des Öls für Lebensmittel- und Futterzwecke kommen weitere Raffinationsschritte wie Entschleimung, Bleichung und Desodorierung hinzu.)

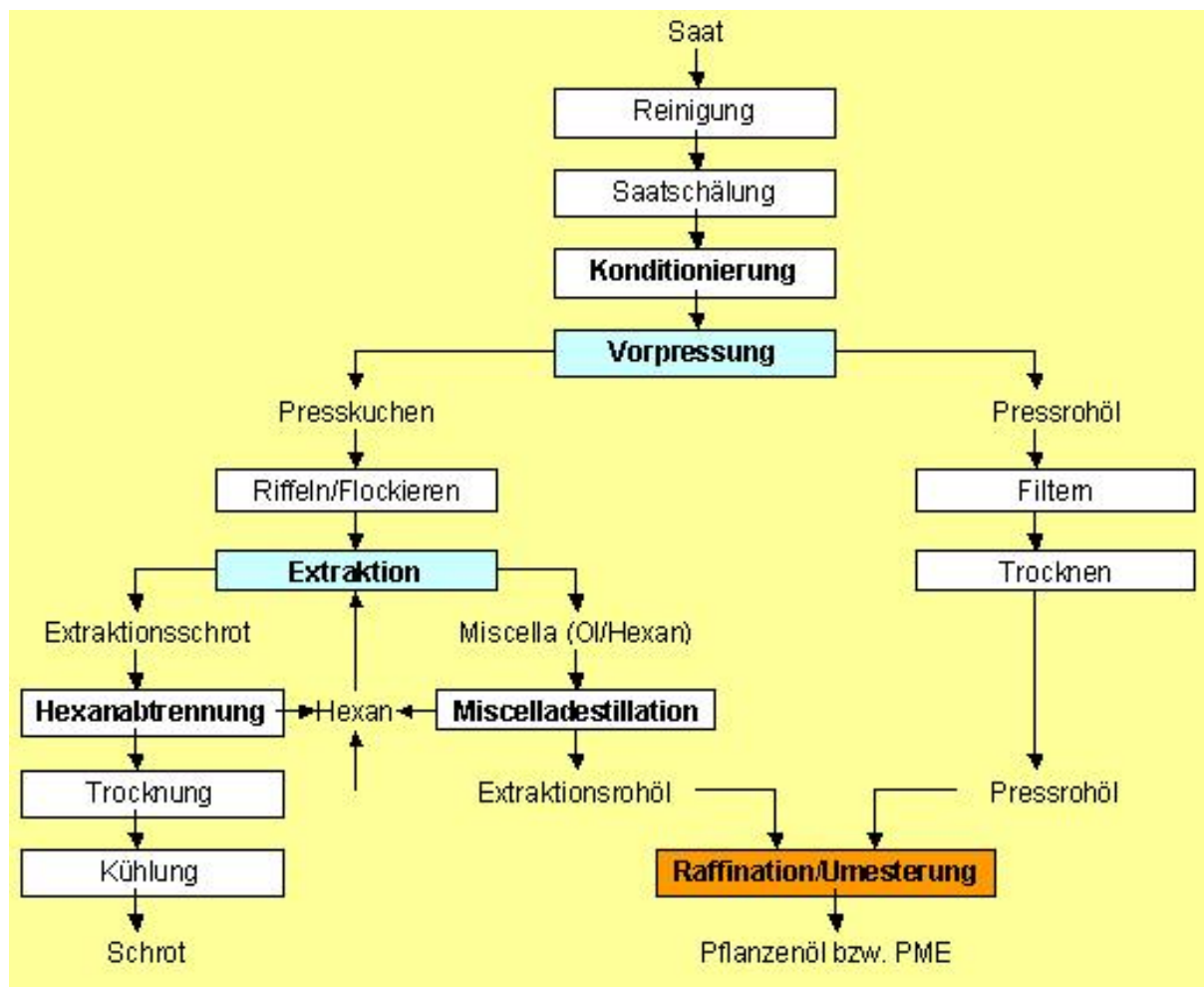


Abb.4 Prinzipielle Schritte bei der Verarbeitung von Ölsaaten zu Pflanzenöl ³³

Für alle so gewonnenen Öle sind zwei prinzipielle Weiterverarbeitungspfade zu unterscheiden:

- zum einen die Umesterung des Triglycerids mit Methanol (Produkt: FAME), gelegentlich auch Ethanol (Produkt: FAEE) zur Erzeugung von Biodiesel

³³ Grafik entnommen aus: <http://www.mobil-ohne-fossil.de>, accessed Aug.5, 2025

- zum anderen die Hydrierung bzw. hydrierende Spaltung und Isomerisierung zu paraffinartigen Kohlenwasserstoffen mit den Zielprodukten HVO (Biodiesel) bzw. HEFA-SPK (Biokerosin)

HEFA-SPK ist eine von mehreren Optionen bei der Erzeugung von klimafreundlichem Flugtreibstoff, der unter dem Sammelbegriff SAF (sustainable aviation fuels) firmiert.

Umesterung:

Das Pflanzenöl wird bei der klassischen Biodiesel/FAME-Route mit (idealerweise erneuerbarem) Methanol umgeestert, unter Bildung von Fettsäuremethylester und Glycerin als Nebenprodukt, Abb. 5 ³⁴

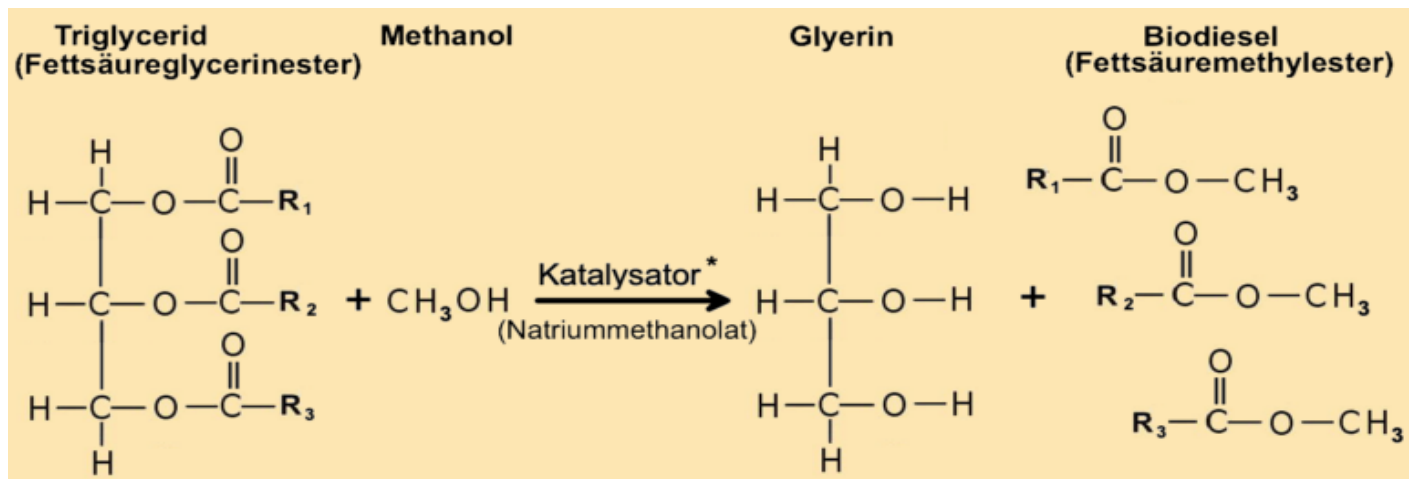


Abb 5 Umesterung von Pflanzenöl mit Methanol zur Gewinnung von Biodiesel (FAME) ³⁴

Die Umesterung ist großtechnisch seit vielen Jahren etabliert und notwendig, um die Viskosität zu reduzieren, das Öl zu stabilisieren, die Zündfähigkeit (Cetanzahl) im Motor zu verbessern und um eine sauberere Verbrennung zu erzielen.

Die typischen Eigenschaften von Methylestern aus nicht-essbaren Ölen werden in Tab. 1 am Beispiel Jatropha, Pongamia, Rizinus und Azadirachta (Neembaum) im Vergleich zu fossilem Diesel und zu den Biodieselnormen ASTM D6751 und EN 14214 gezeigt.

Die Öle können nach Umesterung ohne Einschränkung die bisherigen Ausgangsstoffe für Biodiesel wie z. B. Raps-, Soja- und Palmöl ersetzen und stellen keine Nutzungskonkurrenz zur Lebens- und Futtermittelproduktion dar

³⁴ Grafik entnommen aus <https://grafs-bio-seiten.de/biodiesel-aus-raps>, accessed Aug 5, 2025

Herkunft Biodiesel	Dichte 15°C	Kinemat. Viskosität	Flash Point	Gesamt-Schwefel	Asche	Wassergehalt	Cetanzahl
	kg/m ³	40°, CSt	°C	ppm wt	ppm wt	ppm wt	
Jatropha	880	4,3	135	n.a.	120	250	55,4
Pongamia	890	4,3	174	100	10	50	57,6
Azadirachta	898	5,8	175	300	-	-	56,8
Ricinus	924	14,5	273	340	n.a.	27	50
Konv. Diesel	840	3,0	70,5	14	80	30	49,7
EN 590 Diesel, EU	820-845	2,0-4,5	n.a.	Max 10	Max 100	Max. 200	Min 51 Winter: 49
ASTM D6751 Biodiesel	880	1,9-6,0	Min 130	Max 500	Max 200	Max 500	Min 47
EN 14214 Biodiesel, EU	860-900	3,5-5,0	Min 120	Max 10	Max 200	Max 500	Min 51

Tab 1 Eigenschaften von Biodiesel (FAME) aus nicht-essbaren Ölen im Vergleich zur EU Norm für (konventionellen) Diesel und zur EU- bzw. ASTM-Norm für Biodiesel ³⁵

Hydrierende Spaltung und Isomerisierung:

Um aus pflanzlichen Ölen nicht nur Biodiesel, sondern auch Flugtreibstoff herzustellen muss das Öl einer hydrierenden Spaltung unterzogen werden. Ein Verfahrensfließbild zeigt Abb. 6 ³⁶.

Bei der so genannten HVO- bzw. HEFA-Route (HEFA = Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) werden die Triglyceride des Öls durch katalytische Hydrierung und Isomerisierung in Kohlenwasserstoffe mit einer dem fossilen Kerosin oder Diesel ähnlichen Struktur und Kettenlänge umgewandelt.

³⁵ Extrakt aus Tab. 3 in B.Thangaraj et al, „Scope of Biodiesel from Oils of Woody Plants: a Review“, Clean Energy Vol. 4, p. 89-106 (2020) und EU-Norm EN 590

³⁶ Fließbild HEFA-Verfahren von Anne Rödl, entnommen aus „Verfahrenstechnik für die Bioökonomie, Kap. 9 Biobasierte Flugkraftstoffe“ Hamburg Open Online University, <https://learn.hoou.de/mod/book>, accessed Aug 5, 2025

Hauptprodukte sind je nach Auslegung und Verfahrensführung des Verfahrens HVO (Diesel) und/oder HEFA-Jetfuel-A1 (Kerosin) ³⁷ mit den Nebenprodukten Naphtha (Rohbenzin) und LPG (Liquid Petroleum Gas), welches überwiegend aus Propan als Hydrierprodukt des Glycerinrests besteht.

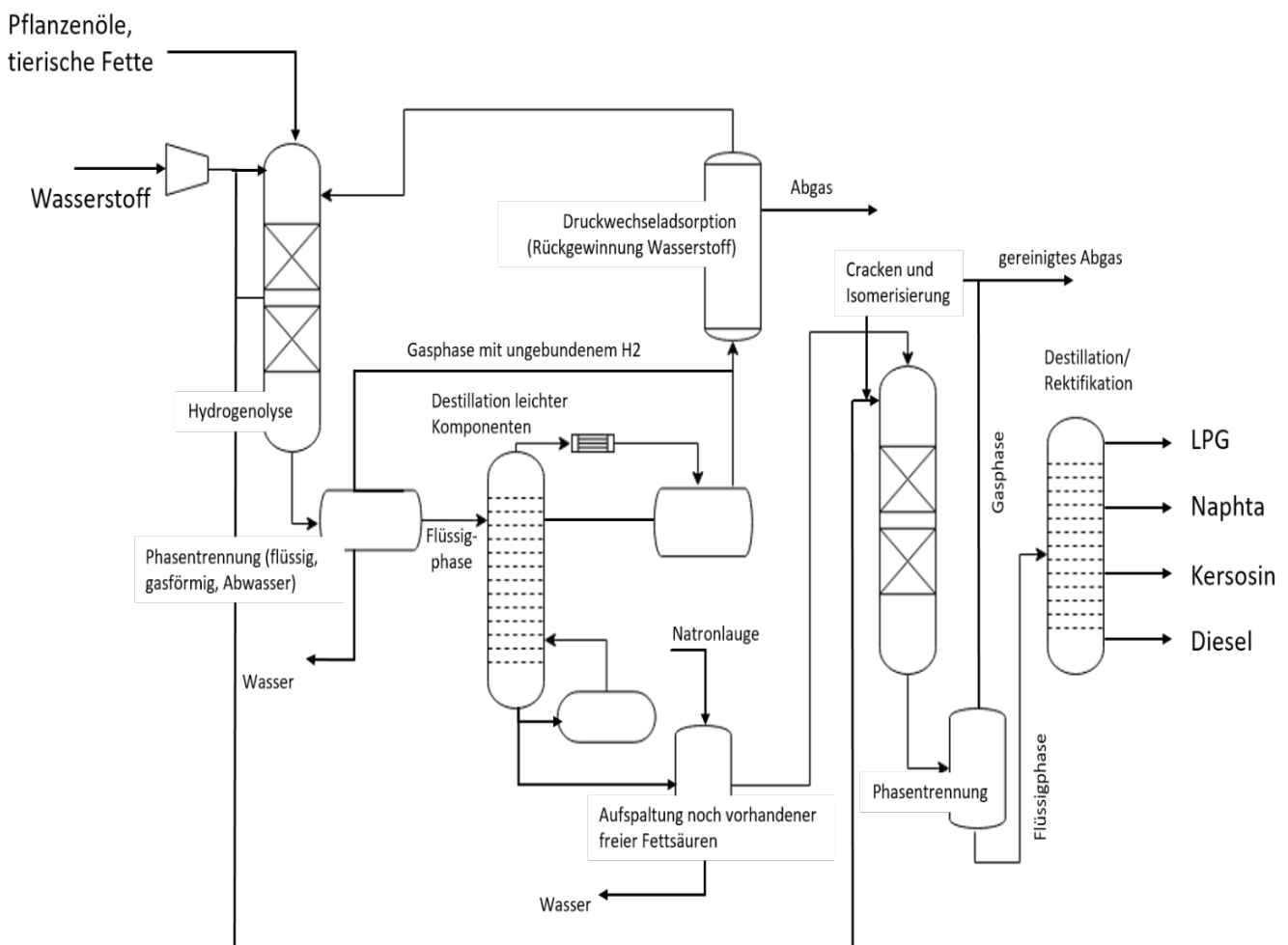


Abb. 6 HVO/HEFA-Verfahrensfließbild für Diesel und Kerosin sowie Naphtha (Rohbenzin) ³⁶

Eine typische Produktverteilung enthält Abb. 7 (Jatropha und im Vergleich Camelina-, Hellerkraut/Pennycress- und Rizinus sowie Altfett) ³⁸.

³⁷ H.J.Wernicke, „Potenzial von hydrierten Pflanzenölen und pflanzlichen Altölen als „grüner“ Treibstoff“, GES-Publikation, 18.1.2024

³⁸ Ling Tao et al, „Techno-Economic and Resource Analysis of Hydroprocessed Renewable Jet Fuel, Biotechnology for Biofuels Vol 10, 261 (2017)

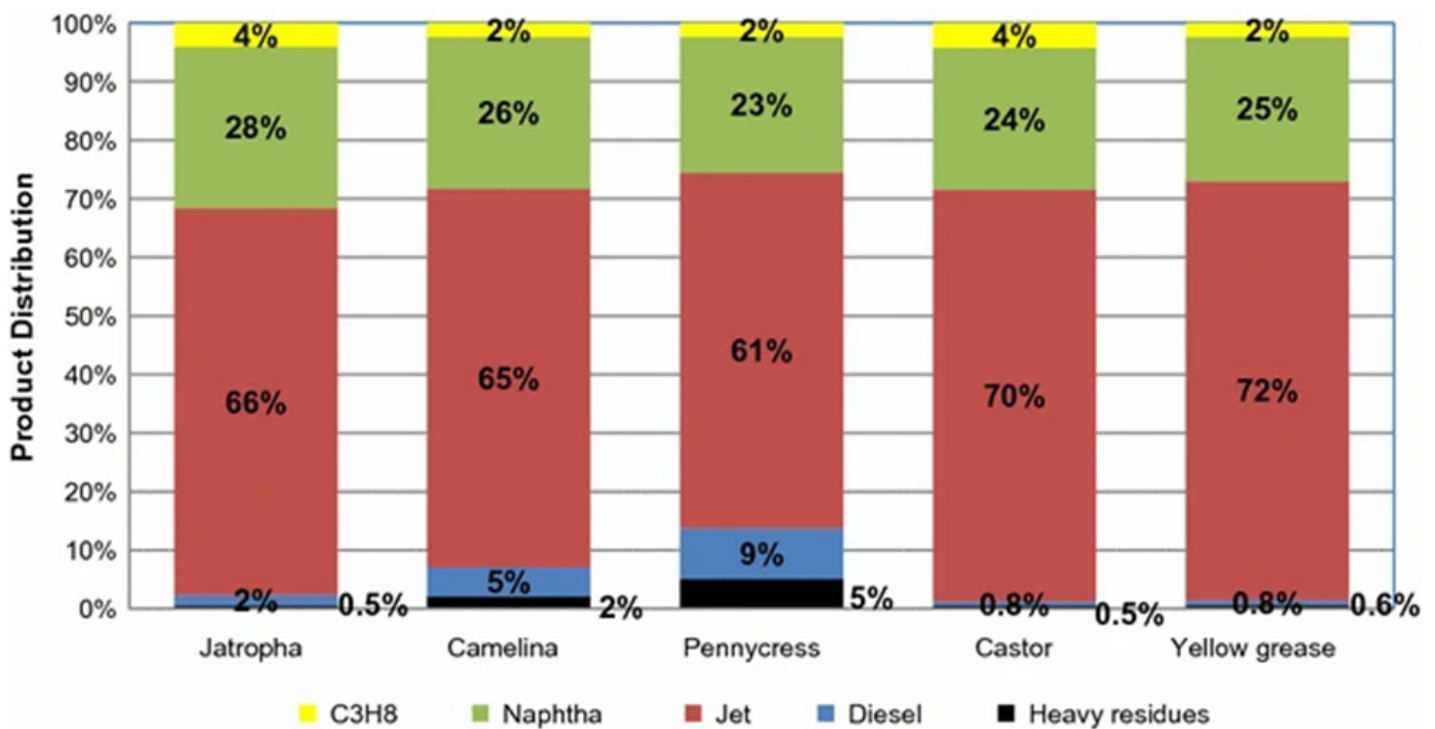


Abb.7 Produktverteilung bei der HEFA-Route zur Verarbeitung verschiedener Öle ³⁸

Die Verfahren sind großtechnisch etabliert und werden von verschiedenen Lizenzgebern wie z. B. Neste (NextBTL[™]), ENI (Ecofining[™]), TotalEnergies und Haldor-Topsoe (HydroFlex[™]) angeboten bzw. eingesetzt. Sie sind bis auf wenige Anpassungen für alle hier beschriebenen pflanzlichen Öle geeignet.

Eine weitere Option ist das sogenannte Coprocessing, also eine gemeinsame Verarbeitung von biogenen Ölen in konventionellen Erdölraffinerien. Dies wird seit Jahren in einer Reihe von EU-Ländern erfolgreich genutzt.

Seit 2017 ist Coprocessing auch in Deutschland für die Herstellung biogener Anteile in Kraftstoffen erlaubt, allerdings mit Einschränkungen. Zu diesem Zweck wurde die Verordnung über die Verwendung von Biokraftstoffen geändert und das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) angepasst.

Wegen des höheren Sauerstoffgehalts der Bioöle sind beim Coprocessing Anpassungen für den Betrieb der Hydroprocessingstufen in der Raffinerie erforderlich ^{39 40}.

³⁹ K.Magrini et al, "Co-Processing Bio-Oils in Refineries", SDI Project Peer Review March 22, 2021, NREL/PR-5100-79348, <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/79348.pdf>, accessed Aug 7, 2025

⁴⁰ A.K.Vuppalladadiyam et al, "Coprocessing of bio-oils and petroleum fuel blends for clean transportation fuels" chapter 12, Advances in Hydrotreating for Integrated Biofuel Production, Elsevier, Pages 327-344 (2024)

HVO-Diesel:

Die Eigenschaften des so gewonnenen HVO-Dieseltreibstoffs sind weitgehend identisch mit denen von konventionellem Diesel, Tab. 2 zeigt einige wichtige Kennzahlen.

		HVO, EN 15940 A ^{41 42}	Diesel EN 590 ⁴³
Cetanzahl		Min 70	Min 51
Dichte 15°	kg/m ³	765-800	820-845
Gesamtschwefel	ppm wt	Max 5	Max 10
Flammpunkt	°C	> 55	> 55
Aschegehalt	ppm wt	Max 100	Max 100
Wassergehalt	ppm wt	Max 200	Max 200
Viskosität 40°C	mm ² /sec	2,0-4,5	2,5-4,5
Gesamtaromaten	Gew %	Max 1,1	Max 8
FAME-Gehalt	Gew%	Max 7	Max 7

Tab. 2 Eigenschaften von HVO 100 – Diesel nach EN 15940 A, Vergleich zu konventionellem Diesel gemäß Norm EN 590

HVO 100 (also reiner HVO-Diesel) ist in Europa seit einigen Jahren und seit 2024 auch in Deutschland zugelassen und an vielen, vor allem freien Tankstellen erhältlich.

Führend bei der Nutzung von HVO 100 sind Schweden (bis zu 35 % Marktanteil bei Diesel) und Norwegen (bis zu 40 % HVO-Beimischung im Standard-Diesel). Die größte Produktionskapazität innerhalb der EU befindet sich in den Niederlanden.

HVO 100 hat hervorragende Verbrennungseigenschaften und bewirkt eine bis zu 90%ige CO₂-Minderung gegenüber fossilem Diesel. Er ist für fast alle jüngeren Diesel-Fahrzeuge von den Herstellern uneingeschränkt freigegeben und kann problemlos auch im Wechsel mit normalem

⁴¹ EN 15940 Klasse A (mit hoher Cetanzahl)

⁴² T. Willner, A.Sievers, "CO₂-Einsparpotenzial für die Bauindustrie bei Umstellung auf HVO 100 in Deutschland, Mai 2024, https://www.bauindustrie-nord.de/fileadmin/bauindustrie-nord.de/Dateien/Stiftung/HVO-Studie_Bauind_HAW_Hamburg_final_rev3.pdf, accessed 15. Sept 2025

⁴³ EN 590

Diesel eingesetzt werden.

Produktion und Verwendung von HVO werden in mehreren GES-Publikationen im Detail beschrieben ^{44 45 46}.

HEFA-Kerosin

Zur Produktion von synthetischen Flugkraftstoffen stehen auf hydrierende Spaltung und Isomerisierung beruhende HEFA-Route (HEFA-SPK) und die auf Zucker und Stärke basierende „Alkohol-to-Jet (AtJ-SPK)“- Route im Vordergrund.

		Norm	Min.-Wert	Max.-Wert	Neste MY HEFA-SPK
Flash Point	°C	IP 170	38		41
Density 15°C	kg/m ³	ASTM D4052	730	772	771
Freezing Point	°C	IP 529		-40	-51
FAME-Content	mg/kg	IP 585		< 5	< 4,5
Thermal Stability: Filter Pressure Drop	mm Hg	ASTM D3241		25	< 1
Thermal Stability Visual Tube Rating				< 3	<1
Thermal Stability Interferometric Tube Rater Deposit thickness over area of 2,5 mm2				85	< 85
Cycloparaffins	wt%	ASTM D2425		15	4
Aromatics	wt %	ASTM D 2425		0,5	0,1
Water	mg/kg	ASTM D6304		75	33
Nitrogen	mg/kg	ASTM D4629		2	< 0,3
Sulfur	mg/kg	ASTM D5453		15	< 1

Tab. 3 Ausgewählte Eigenschaften von HEFA-SPK gemäß ASTM D7566 Annex 2 und aus einem Datenblatt der Neste Corp. ⁴⁸

⁴⁴ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2024/07/240620_Die-Rolle-von-Kraftstoffen-auf-dem-Weg-zu-klimaneutraler-Mobilitaet_HJW_18062024_bb_update-June-30k.pdf

⁴⁵ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2024/04/240410hvo_final.pdf

⁴⁶ https://global-energy-solutions.org/wp-content/uploads/2022/11/HVO-Papier_final_HJW_17.9.22_update-3.10.22_18.1.24.pdf

Die IATA lässt für HEFA-SPK aktuell einen maximalen Beimischungsanteil von 50% dieser Treibstoffe zu. Als Beispiele für Pflanzenöle werden spezifisch Palmöl, aber auch Camelina- und Jatrophaöl, sowie pflanzliche Altöle genannt ⁴⁷.

Die Spezifikation von HEFA-SPK zur Verwendung als Flugkraftstoff ist in der Norm ASTM D7566, Annex 2 festgelegt, ausgewählte Eigenschaften von HEFA-SPK am Beispiel Neste MY enthält Tab. 3 ⁴⁸.

Die Begrenzung des Zusatzes von HEFA-SPK in Flugkerosin auf max. 50 % ist durch das erforderliche Kälteverhalten des Treibstoffs bedingt, der durch den Aromatengehalt des fossilen Anteils und auch durch Additive erreicht wird.

4. Potenzial zur Erzeugung von Diesel- und Flugtreibstoff aus nicht-essbaren Ölen

Grundlage ist die Annahme, dass der Anbau der entsprechenden Ölpflanzen ausschließlich auf degradierten Flächen erfolgt („marginal lands“, siehe Abb. 8). Diese werden nicht oder nicht mehr für die Erzeugung von Nahrungs- und Futtermitteln genutzt, sodass keine Nutzungskonkurrenz besteht.

Die Literaturdaten über die weltweiten degradierten Flächen variieren stark und werden von unterschiedlichen Maßstäben und Methoden in der Beurteilung der jeweiligen Bodenqualität beeinflusst.

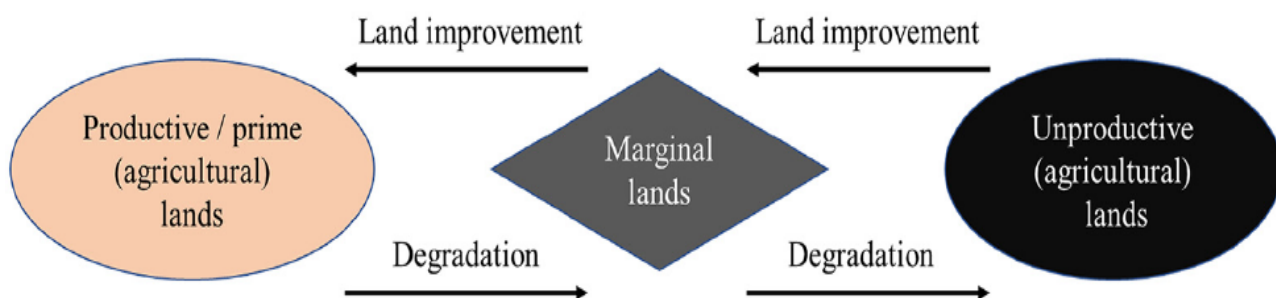


Abb. 8 „Marginal Lands“ ⁴⁹

⁴⁷ <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-technical-certifications.pdf>, accessed Aug 6 2025

⁴⁸ https://www.neste.com/files/pdf/02b1d78d1996136630fa8bc31c3de5ea-productdatasheet_neste_my_saf.pdf, accessed Aug 6 2025

⁴⁹ Grafik entnommen aus: N. Csikos et al, „Concepts of Agricultural Marginal Lands and their Utilization: a Review“, Agricultural Systems 204, 103560 (2023)

So finden sich in unterschiedlichen Flächenangaben von 1 Mrd. Hektar (= 10 Mio. km²) bis zu 6 Mrd. Hektar (= 60 Mio. km²) ⁵⁰.

Eine gewisse Übereinstimmung zeigen eine Studie der Heinrich Böll Stiftung ⁵¹ (18,1 Mio km²) und der UNCCD ⁵² (15 Mio. km² mit einer Zunahme von 1 Mio. km² pro Jahr).

Die erstgenannte Studie unterscheidet zwischen 62% geschädigter Böden infolge nicht nachhaltiger Nutzung und 38% geschädigter Anbauflächen durch Überweidung.

Eine weitere Studie mit Fokus auf den Anbau von Jatropha-Pflanzen ⁵³ nennt eine Fläche von zirka 15,9 Mio km², darunter zirka 7,8 Mio km² in Afrika, 4,6 Mio km² in Südamerika und 2,4 Mio km² in Asien.

Die Kriterien für die Nutzbarkeit solcher Flächen z. B. zur Aufforstung (und Bildung einer CO₂-Senke) oder – wie hier – für den Anbau geeigneter und entsprechend genügsamer Ölpflanzen (zur Verminderung von CO₂-Emissionen gegenüber der Verwendung fossiler Energieträger) sind natürlich fließend. Sie werden stark beeinflusst durch die wirtschaftlichen und infrastrukturellen Randbedingungen ⁵⁴.

Ausführliche Life-Cycle-Analysen für den Anbau und die Nutzung von Pflanzen zur Erzeugung von Biodiesel auf Basis nicht-essbarer Öle finden sich u. a. bei Yanbing Liu ⁶¹, Ruatpuia et al ⁵⁵, K.Patel et al ⁵⁶ und G.Perez ⁵⁷. LCA's für die Erzeugung von HEFA-Kerosin aus gleichartigen Ölen werden u.a. bei P. Kurzwaska ⁵⁸ und K. Oehmichen et al ⁵⁹ beschrieben.

⁵⁰ H.k.Gibbs et al, "Mapping the World's Degraded Lands", Appl. Geography Vol 57, 12-21, Feb., 2015

⁵¹ H. Varui, Soil Atlas 2024, „Soil Degradation: the Silent Global Crisis“, Heinrich Böll Stiftung, Brüssel, Nov. 2024

⁵² A. Selsick, "Stepping back from the precipice: Transforming land management to stay within planetary boundaries", Special report on land for the 16th meeting of the Conference of the Parties to the United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD), Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) 2024

⁵³ M.Hao et al, "Global Marginal Land Availability of Jatropha Curcas Based Biodiesel Development", Journal of Cleaner Production Vol 364, 132655, Sept. 2022

⁵⁴ N. Csikos et al, „Concepts of Agricultural Marginal Lands and their Utilization: a Review“, Agricultural Systems 204, 103560 (2023)

⁵⁵ J. Ruatpuia et al, "Jatropha Curcas Oil, a Potential Feedstock for Biodiesel Production: A Critical review", Fuel 370, p. 131829 (2024)

⁵⁶ K.Patel, „Assessing the Sustainability of Jatropha and Rapeseed Biodiesel, an LCA Approach“, Recent Developments in Energy and Environmental Engineering, Lecture Notes in Civil Engineering, vol 333. Springer, Singapore (2023)

⁵⁷ G. Perez, "Sustainability Evaluation of Non-Toxic Jatropha curcas in Rural Marginal Soil for Obtaining Biodiesel Using Life-Cycle Assessment", Energies 14(10), 2746 (2021)

⁵⁸ P.Kurzwaska-Pietrowicz, „Life Cycle Emission of Selected Sustainable Aviation Fuels – a Review“, Transportation Research Procedia 75, 77-85 (2023)

⁵⁹ K.Oehmichen et al, „Comprehensive LCA of Biobased Sustainable Aviation Fuels and Jet A1 Multiblend, Appl. Sci. 12, 3372 (2022)

Mengenpotenzial (Schätzung am Beispiel Jatropha):

Unter einer (willkürlichen) Annahme werden 20 % einer potentiell geeigneten Gesamtfläche von 15 Mio. km² (300 Mio. Hektar) für den Anbau von Jatropha genutzt.

Weitere Annahmen sind ein jährlicher Ertrag von 1,5 Tonnen Öl pro Hektar, eine Ölausbeute von 90% auf Basis einer Lösungsmittelextraktion, 5 % Verlust bei der Umesterung zu Biodiesel bzw. 15% Verlust bei der Totalhydrierung zu HVO bzw. Kerosin.

Rechnerisch könnten so jährlich zirka 420 - 440 Mio Tonnen Biodiesel bzw. 360 - 380 Mio Tonnen HVO oder HEFA erzeugt werden.

Bezogen auf den Bedarf im Jahr 2024 wäre dies bei HVO ein Beitrag von ca. 25 % (als Dieselerersatz) bzw. eine 100%ige Bedarfsdeckung durch HEFA (als Kerosinersatz). Je nach Prognose für den Verbrauch im Jahr 2040 könnte HVO 25 % bis über 80 % des Diesel-Bedarfs abdecken. Bei HEFA wären es 75% - 100 % des Kerosinbedarfs.

Verringerung der CO₂-Emissionen (am Beispiel Jatropha):

Bei der Nutzung von fossilem Diesel entstehen ca. 3,2 Tonnen CO₂ pro Tonne Treibstoff. Ein Ersatz durch Jatropha-HVO würde eine Verbesserung der CO₂-Bilanz um mehr als 1 Gigatonne pro Jahr bewirken. Bezogen auf die aktuellen globalen anthropogenen CO₂ Emissionen von ca. 40 Gigatonnen p. a.⁶⁰ bzw. ca. 4,5 Gigatonnen aus der Nutzung von derzeit 1,4 Mrd. Tonnen fossilem Diesel⁹ wäre dies ein signifikanter und vergleichsweise schnell zu realisierender Beitrag zur Emissionsminderung.

Auch die Emission von fossilem Kerosin beträgt zirka 3,2 Tonnen CO₂ pro Tonne Kerosin. Ein vollständiger Ersatz durch HEFA-SPK würde zu einer Verminderung der CO₂-Emissionen von ca. 980 Mio. Tonnen führen, wobei produktionsbedingt eine CO₂-Emission von ca. 0,5 Tonnen CO₂ pro Tonne HEFA-SPK eingerechnet ist.

Allerdings ist derzeit nur eine Zumischung von 50% zugelassen⁴⁷, so dass die darüber hinausgehende Menge zunächst Anwendung als HVO fände.

In Bezug auf die CO₂-Gesamtbilanz ist hierbei noch nicht berücksichtigt, dass eine Aufforstung mit Jatropha- oder anderen „non-edible“ Ölpflanzen eine erhebliche CO₂-Fixierung bedeutet. (siehe Kap. 5).

Kostenschätzungen (am Beispiel Jatropha):

Da Jatropha-Öl derzeit nur in geringen Mengen produziert wird, sind Folgeprodukte wie HVO-Diesel oder HEFA-Kerosin derzeit nicht konkurrenzfähig. Für eine kommerzielle Nutzung sind günstige lokale Faktoren und vor allem Skaleneffekte

⁶⁰ <https://ourworldindata.org/co2-emissions>: „Anthropogene CO₂-Emissionen durch fossile Energie und Landnutzungsänderungen“, accessed 22.8.2025

durch einen großflächigen Anbau erforderlich. Hierzu gibt es Schätzungen im Rahmen von Studien und Projektentwicklungen für verschiedene geografische Gebiete, vor allem für China und das subsaharische Afrika. Die Produktionskosten für Jatrophaöl in diesen Studien liegen in einer Größenordnung von 0,52 – 0,68 US-\$ pro Liter ^{61 62}.

FAME-Biodiesel aus Jatropha:

Typische Produktionskosten für FAME-Biodiesel auf Basis Jatropha werden mit 0,78 – 1,05 US-\$ pro Liter angegeben ^{56 63 64}.

Trotz der sehr unsicheren Datenbasis erscheint Biodiesel aus Jatropha derzeit teurer als die klassischen Produkte aus Palmöl (0,57 – 0,82 US-\$ /l) oder Sojaöl (0,70-0,95 US-\$/l).

Dies liegt an den noch ausstehenden Skaleneffekten bei Jatropha sowie den höheren Ernteerträgen bei etablierten Ölpflanzen (Palmöl: ca. 4 Tonnen pro Hektar) und deren teilmechanisierter Bewirtschaftung.

Der Anbau und die Bewirtschaftung von Jatropha erfolgen dagegen weitgehend manuell. Selbst bei einem großflächigem Anbau würde Jatropha im Vergleich zu Palmöl fünfmal mehr Personal erfordern ⁵⁹, ein wichtiges Argument in Entwicklungsländern.

Ein Export von Afrika nach Europa („frei Rotterdam“) von Jatropha-Diesel würden die Kosten um 0,10-0,19 US-\$ auf 0,88 – 1,19 US-\$/l erhöhen.

Bei einem Rohöl-Preis (Brent) von 75-85 US-\$/bbl kostet fossiler Diesel im Vergleich „nur“ 0,52 - 0,72 US-\$/l.

Insgesamt ist biogener Diesel in allen Fällen teurer als fossiler Diesel.

(Auch Palmöl-Diesel frei Rotterdam wäre mit 0,68 – 0,99 US-\$/l deutlich günstiger als Jatropha-Diesel, allerdings wird Palmöl-Diesel nicht mehr auf die Treibhausgas-Quote angerechnet.)

Der Kostennachteil von FAME-Biodiesel könnte jedoch durch eine CO₂-basierte Besteuerung des fossilen Diesels ausgeglichen werden, um Preisgleichheit bei den Anwendern herzustellen.

In Deutschland ist der Kostennachteil durch das THG-Quotengesetz für den Hersteller bzw. Lieferanten von Diesel nicht entscheidend, da er aufgrund der Beimischungsquote gar keine andere Wahl hat, als „Advanced Biofuels“ zu nutzen.

⁶¹ Yanbing Liu et al, „Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis of Jatropha Biodiesel Production in China, Biomass Conversion and Biorefinery 14, 28635-28660 (2024)

⁶² D. Mitchell, „Biofuels in Africa, Opportunities, Prospects, and Challenges“, The World Bank (2021)

⁶³ N.N. Yusuf et al, „Techno-economic Analysis of Biodiesel Production from Jatropha Curcas via a Supercritical Methanol Process“, Energy Conversion and Management 75, 710-717 (2013)

⁶⁴ T.F. Ilanda et al., „Optimizing the Cooperated Multi-Countries Biodiesel Production and Consumption in Sub-Saharan Africa“, Energies 13 (18), p. 4717 (2020)

Allerdings ergibt sich daraus ein Mehrpreis an der Tankstelle, sodass letztlich die Autofahrer bzw. LKW-Fahrer die Mehrkosten tragen.

HEFA-SPK-Kerosin aus Jatropha:

Die Kosten für HEFA-SPK auf Basis Jatropha sind auf Grund des aufwändigeren Hydroprocessing höher als für FAME. Die Produktionskosten für Jatropha-basiertes HEFA-SPK liegen schätzungsweise bei 1,25- 1,50 US-\$/l ^{65 66 67 *}).

Der Referenzpreis für fossiles Kerosin (vor Steuern und Abgaben) liegt mit ca. 0,60 US-\$/l auch hier deutlich darunter ⁶⁸.

(Auch Palmöl-Diesel frei Rotterdam wäre mit 0,68 – 0,99 US-\$/l deutlich günstiger als Jatropha-Diesel, allerdings wird Palmöl-Diesel nicht mehr auf die Treibhausgas-Quote angerechnet)

Eine Studie für eine Produktion in China ³⁸ auf Basis einer jährlichen Kapazität von 150.000 Tonnen HEFA-SPK aus Jatropha (und weiteren Ölpflanzen) zeigt in Tab. 4 und Abb. 8 die Ausbeutestruktur und eine Abschätzung der HEFA-Kosten.

	Jatropha	Camelina	Pennycress	Castor	Yellow grease
Oil price (\$/kg)	\$0.40	\$1.75	\$0.81	\$1.70	\$0.61
Jet fuel production (MMgal/year)	44.0	57.7	40.3	50.8	50.4
Propane fuel yield (gal/dry ton oil)	18.3	1.0	2.1	1.8	1.6
Gasoline fuel yield (gal/dry ton oil)	94.2	100.0	74.3	94.9	93.7
Jet fuel yield (gal/dry ton oil)	170.0	184.3	155.5	196.2	194.7
Diesel yield (gal/dry ton oil)	3.1	4.7	36.9	0.5	0.8

Tab 4 Produktverteilung für eine 150 000 t/a HEFA-SPK Kostenstudie ³⁷

⁶⁵ Jagtap, S. S.; Childs, P. R. N.; Stettler, M. E. Data in Brief: Comparative Life Cycle Evaluation of Alternative Fuels for a Futuristic Subsonic Long-Range Aircraft. Preprints 2025, <https://doi.org/10.20944/preprints202504.1222.v1>, accessed 2.9.2025

⁶⁶ J.Aburto et al, "Is Sustainable Aviation Fuel Production Through Hydroprocessing of Esters and Fatty Acids (HEFA) and Alcohol-to-Jet (ATJ) Technologies Feasible" Sustainability 17(4), 1584 (2025)

⁶⁷ F.Müller-Langer et al, „PTG-HEFA Hybrid Refinery as Example of a SynBioPTx Concept—Results of a Feasibility Analysis", Appl. Sci. 9(19), 4047 (2019)

⁶⁸ "Jet Fuel and Diesel Prices as of July 2025", https://www.linkedin.com/posts/global-oil-and-gas-trading_global-oil-and-gas-trading-activity, accessed 2.9.2025

Der hierbei angenommene Einstandspreis für das Jatrophaöl mit 0,40 US-\$/kg ist allerdings extrem niedrig. Dementsprechend günstig ergibt sich ein „Minimalpreis“ von 3,82 US-\$/gal = 1,02 US-\$/l.

Auch diese Schätzung liegt trotz des niedrigen Einstandspreises deutlich über dem Referenzpreis von fossilem Kerosin.

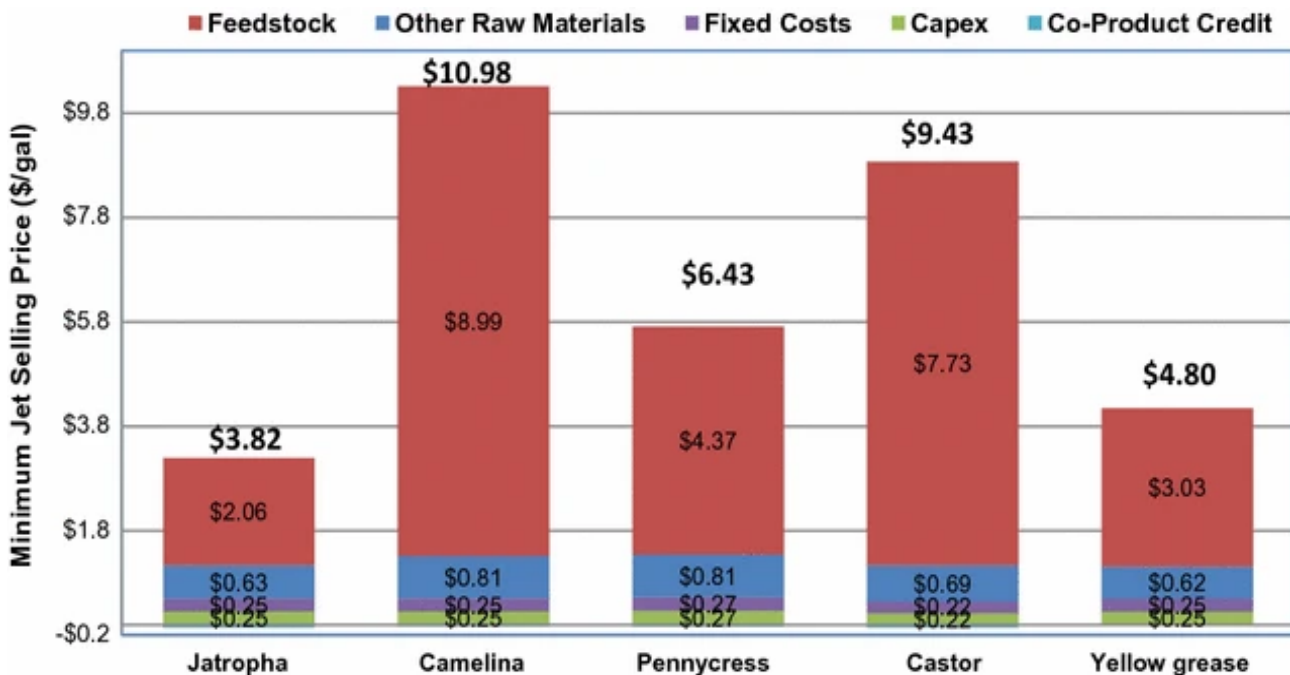


Abb 8 „Minimum Selling Price“ für HEFA-SPK aus Jatropha- und anderen Ölen auf Basis eines Einstandspreises von 0,40 US-\$/kg für Jatrophaöl und einer Jahreskapazität von 150 000 Tonnen HEFA-SPK (sh. Tab 4) ³⁸

Die Vorgabe von Beimischquoten alternativer Flugtreibstoffe erzeugt deutliche Mehrkosten gegenüber der Verwendung von ausschließlich fossilem Kerosin.

Innerhalb der EU gelten steigende Beimischungsquoten für biogene Anteile im Kerosin, z. B. 6 % in 2030. Außerhalb der EU gelten diese Beimischquoten nicht, sodass es zu Wettbewerbs- und Kostenbenachteiligungen bzw. Ausweichbetankungen führt.

Dies ist möglicherweise auch ein Grund für die bisher nur begrenzten Herstellungskapazitäten von biogenem SAF (auf Basis von HEFA oder anderen Alternativen).

Derzeit ist Neste mit europäischen Standorten in Rotterdam und Porvoo der größte Anbieter. Die Verarbeitungskapazitäten scheinen mit den steigenden innereuropäischen Quotenverpflichtungen Schritt zu halten, gehen aber nicht darüber hinaus.

5. Beitrag zur Bildung von CO₂ – Senken

Auch wenn die Herstellung der hier beschriebenen Treibstoffe derzeit nicht wirtschaftlich darstellbar ist und nur durch Regulierung bzw. durch Subventionen initiiert werden kann, ist ein

zusätzliches wichtiges Argument für den Anbau dieser Pflanzen die Aufforstung auf kargen, ungenutzten Flächen und die damit verbundene Bildung von CO₂-Senken.

Dabei gibt es keine Nutzungskonkurrenz mit der Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln und es werden keine existierenden Naturflächen durch Rodung und Umwandlung in Plantagen zerstört.

Über die verträgliche Nutzung solcher Landflächen auch in der Funktion als nachhaltige CO₂-Senke gibt es umfangreiche Studien und Projektvorschläge ^{69 70 71 72 73 74 75 76 77 78}.

Voraussetzung für den Erhalt der Senke ist eine dauerhafte spätere Nutzung des Holzes beispielsweise für Gebäude oder Möbel oder auch die Verwendung in Form von Biokohle (zur Bodenverbesserung).

Eine Verbrennung oder Kompostierung würde dagegen das gebundene CO₂ wieder freisetzen. Solange die abgeholzten Altpflanzen wieder durch neu angebaute ersetzt werden, bleibt die einmalige Kohlenstoff-Bindung auch im Falle der Verbrennung des Altholzes bestehen.

Wie bei der Abschätzung der erzielbaren Ölerträge kommt es auch hier auf die Pflanzensorten, Bodenbeschaffenheit, die klimatischen Verhältnisse, die Anbaudichte und die Nutzungsdauer bis zur Rodung an.

Die daraus abgeleiteten Größenordnungen für die aus dem Holzertrag gebundenen CO₂-Mengen bezogen auf die jeweiligen Anbauflächen und nach am Ende der Nutzung als Ölpflanze

Literaturhinweise (Auswahl):

⁶⁹ R. Gandhe et al, „Evaluation Trials and Carbon Sequestration Potential of *Jatropha curcas* and *Pongamia pinnata*: Technologies and Way Forward”, in *Advanced Biodiesel - Technological Advances, Challenges, and Sustainability Considerations*, IntechOpen; 2024

⁷⁰ P.Bohre et al, „Biomass Production and Carbon Sequestration by *Pongamia pinnata* in Tropical Environment”, *Int. J. of Bio-Science and Bio-Technology* 6(2), 129-140 (2014)

⁷¹ S. P. Wani et al, “Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* plantation in degraded lands Agriculture, Ecosystems and Environment 161, 112 (2012)

⁷² L. Pari et al, “*Jatropha curcas*, L.Oruning Residues for Energy: Characteristics of an Untapped Byproduct”, *Energies* 11, 1622 (2018)

⁷³ <https://www.eco-business.com/research/a-bean-called-castor-can-cut-carbon-fuel-the-future> 27.5.2013, accessed 21.8.2025

⁷⁴ N. Pulpayil et al, „Estimation of carbon sequestration potential of *Azadirachta indica* from different provenances in South Eastern Rajasthan”, *Int. J. of Research in Agronomy*, SP-7(1): 196-200 (2024)

⁷⁵ A.Ajanai et al, “Comparative Status of Sequestered Carbon Stock of *Azadirachta indica* and *Conocarpus erectus*”, *International Journal of Environment* 5(2), 89 (2016)#

⁷⁶ C.Moreira et al, “Biomass and carbon stock in *Jatropha curcas*”, *Cerne* 17(3):353-359 (2011)

⁷⁷ N.B.Noor Mohamed et al, “Biomass production and carbon sequestration potential of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) under dryland environment”, *Range Mgmt. & Agroforestry* 41 (2), 381-385 (2020)

⁷⁸ Rohit Soni et al, “Carbon Sequestration Potential of Different Provenance of *Pongamia pinnata* in Central India, *International Journal of Environment and Climate Change* 13 (11), 3057–3064 (2023)

sind signifikant, können aber nur näherungsweise beziffert werden.

Jatropha

Das Holz von Jatropha ist für Bauzwecke minderwertig, ist aber für Biokohle geeignet.

Im Vergleich zu klassischen Energieholzarten wie Eukalyptus ist der Holzertrag pro Hektar mit zirka 1 - 3 Tonnen pro Jahr (Schnittholz) und ca. 25 - 50 Tonnen Holzertrag über 7 - 10 Jahre Nutzungsdauer (als luftgetrocknetes Holz) relativ gering. Mit einem Kohlenstoffanteil von 45 - 50 % im Holz entspricht dies einer CO₂-Bindung von zirka 45-90 Tonnen CO₂ pro Hektar.

Pongamia

Pongamia ist besonders effektiv in der CO₂-Sequestrierung durch rasches Wachstum, tiefes Wurzelsystem und Befähigung zur Stickstoff-Fixierung.

Der Holzertrag hängt von der Pflanzdichte (200 - 500 Bäume pro Hektar) ab. Eine stoffliche Nutzung als Bau/Möbelholz oder zur Erzeugung von Biokohle ist möglich.

Der Holzertrag über eine Nutzungsdauer von 15 - 20 Jahren beträgt zirka 200 - 400 Tonnen pro Hektar. Das entspricht einer CO₂-Bindung von 370 - 730 Tonnen CO₂ pro Hektar.

Rizinus

Rizinus ist kein Baum, sondern ein schnell wachsender Strauch.

Eine dauerhafte CO₂-Bindung ist daher gering und beschränkt sich auf eine Bodenverbesserung durch Einarbeitung und Humusbildung. Rizinus produziert zirka 5 - 20 t Trockenmasse pro Hektar und Jahr mit einer CO₂-Bindung von zirka 1,8 Tonnen pro Tonne Biomasse bzw. 9 - 36 Tonnen pro Hektar und Jahr.

Neembaum

Neembäume sind mittelgroße Bäume und wachsen gut in trockenen Regionen.

Ihre CO₂-Bindung ist vergleichbar mit anderen tropischen Harthölzern, sie wachsen jedoch langsamer als z. B. Eukalyptus oder Teak. Das Holz eignet sich für Bau- und Möbelholz bzw. für Biokohle.

Bei einer Pflanzdichte von 400 - 1000 Bäumen pro Hektar ist der Holzertrag über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren 250 - 275 Tonnen pro Hektar, was einer CO₂-Bindung von zirka 450-700 Tonnen pro Hektar entspricht.

Zum Vergleich Buche:

Ein durchschnittlicher Buchenwald mit 350 m³ Holz pro Hektar und einer Holzdichte (trocken) von 0,68 Tonnen pro m³ und einem Kohlenstoff-Gehalt von 50% bindet ca. 430 Tonnen pro Hektar.

Der Zusatzeffekt der Bildung einer natürlichen CO₂-Senke durch den großflächigen Anbau von „non-edible“ Ölpflanzen ist erheblich, vor allem bei den Beispielen Pongomia und Neembaum mit einem Potenzial von zirka 0,4 - 0,7 Gigatonnen CO₂ pro 1 Million Hektar, bezogen auf die jeweilige Nutzungs- bzw. Lebensdauer.

Bei dem beispielhaft angenommenen Potenzial nutzbarer Anbauflächen von 300 Mio. Hektar (Kap. 5) entspräche dies – unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten der Datenbasis und Annahmen – einer Senke von 120 - 210 Gigatonnen CO₂ (vergleichbar mit 3 - 5 Jahren der derzeitigen jährlichen anthropogenen CO₂-Emissionen).

Allgemeine Gesichtspunkte

Wesentliche Argumente für den Anbau von Pflanzen zur Produktion von nicht essbaren Ölen, die als Ersatz für fossile Treibstoffe genutzt werden, sind unter anderem:

- Klassische“ Ölpflanzen wie Palm, Raps oder Soja können auf den beschriebenen Böden und in den beschriebenen Klimazonen nicht angebaut werden. Es handelt sich hier also
- um ein bisher ungenutztes oder vernachlässigtes Potenzial.
- Neben der Erzeugung klimafreundlicher Energie verhindert die großflächige Aufforstung nicht genutzter, semi-arider Flächen, Bodenerosion, Austrocknung und Desertifikation.
- Vorteilhaft ist die schnelle Umsetzbarkeit: Jatropha-Bäume produzieren beispielsweise bereits nach drei bis vier Jahren Ölsaaten bei einer Nutzungsdauer von bis zu 50 Jahren.
- Durch die Nutzung der auf diese Weise erzeugten Kraftstoffe können die CO₂-Emissionen unmittelbar und ohne Wechsel der Antriebstechnik sowie der Raffinerie- und der Betankungsstruktur gesenkt werden.
- HEFA/SAF ermöglicht eine hohe Bedarfsdeckung im Bereich Flugtreibstoffe – bei steigendem Bedarf für den wachsenden Flugverkehr und angesichts dessen, dass Antriebsalternativen noch lange fehlen werden.
- Im Rahmen internationaler Kooperationen und Anrechnungsmechanismen entsteht zudem eine signifikante CO₂-Senke.
- Der weitgehend manuelle Anbau der Ölpflanzen in den potenziellen Anbaugebieten schafft Arbeitsplätze in Ländern mit stark wachsender Bevölkerung (z. B. Subsahara-Afrika).
- Wachstum, Einkommen aus Exporten und internationale Lieferbeziehungen ermöglichen die Einhaltung ethischer Grundstandards und der Sustainable Development Goals der UN.
- Globale (Nord-Süd) Kooperation durch Partnerschaften bei Finanzierung, Anbau und Verarbeitung der Ölpflanzen führt zu Win-Win-Situationen sowohl für die Produzenten in Entwicklungsländern als auch für die Hauptabnehmer in den Industrieländern.
-

Europäische Union, Deutschland:

Das THG-Quotengesetz begrenzt derzeit die Beimischung von Bioethanol und FAME (Fettsäuremethylester), den sogenannten Biokraftstoffen der ersten Generation.

Gefordert sind hingegen steigende Mengen an „Advanced Biofuels“.

Dazu zählen 2G-Bioethanol auf Zellulosebasis, HVO aus Restölen und -fetten sowie Treibstoffe auf Basis von Biomassevergasung und Fischer-Tropsch-Synthese.

Der regulatorische Rahmen der EU durch die RED II/III und deren nationale Umsetzung eröffnet somit Anreize für den Aufbau von Kapazitäten und die Nutzung von „Advanced Biofuels“, einschließlich von HVO bzw. HEFA.

Außerdem werden steigende Anteile an RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biogen Origin) verlangt, also synthetische Kraftstoffe auf Basis von CO₂ und erneuerbarem Wasserstoff.

Das nationale THG-Quotengesetz für Deutschland bis 2030 bereits eine CO₂-Reduktionsverpflichtung im Verkehrssektor von 25 % vor. Das bedeutet, dass der CO₂-Ausstoß im Verkehr bis 2030 um 25 % im Vergleich zu 2019 gesenkt werden muss.

Eine im Juli 2025 vorgelegte Anpassung des THG-Quotengesetzes verstetigt die steigende THG-Minderungsquote bis 2040 auf 53 %, um die Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr deutlich zu reduzieren.⁷⁹

Eine Verminderung der THG-Emissionen im Bereich Mobilität (Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge) lässt sich daher nur durch einen kompletten Technologiewechsel erreichen oder durch eine Steigerung des Anteils biogener und synthetischer Kraftstoffe (wie beispielsweise Methanol in der Schifffahrt).

„Advanced Biofuels“ wie HVO bzw. HEFA spielen hierbei eine wichtige Rolle.

Offen bleibt jedoch, ob im Rahmen internationaler Kooperationen auch in den Anbau von Ölpflanzen investiert werden würde.

China:

China hat strenge Abgasnormen eingeführt, die mit der Euro 6 in Europa vergleichbar sind.

Hinsichtlich der Antriebstechnologien verfolgt China einen pragmatischen und zweigleisigen Ansatz: Einerseits wird die Elektrifizierung konsequent ausgebaut, andererseits werden die Verbrennertechnologien weiterentwickelt, um vor allem in ländlichen Gebieten Versorgungssicherheit und Reichweiten zu gewährleisten.

Neben der Beimischung von Ethanol und Methanol zu Benzin kommen auch HVO, CNG und verschiedene Hybridsysteme zur Anwendung.

Beim Flugverkehr testet man SAF auf Basis von Abfällen, Altölen und Algenlipiden.

Eine zunehmende Zahl neuerer Publikationen weist auf vermehrte Aktivitäten hin, für FAME-Biodiesel und HEFA-Kerosin Pflanzen für nicht verzehrbare Öle anzubauen, wie hier beschrieben.

⁷⁹ RED III-Umsetzung im Verkehr, GES Impulspapier, geplant 10/2025

USA:

Der Markt in den USA bleibt hinsichtlich der Antriebsformen und Treibstoffe offen, einschließlich der zukünftigen Entwicklung bei Verbrennungsmotoren.

Ein Ausstieg aus dem Verbrennungsmotor ist nur regional geplant. Einige Bundesstaaten, wie beispielsweise Kalifornien, haben beschlossen, Neuzulassungen von Pkw mit Verbrennungsmotor ab 2035 zu verbieten. Ein nationales Verbot ist nicht in Sicht.

Regulierungen wie der „Corporate Average Fuel Economy“ (CAFE) und die Abgasstandards der EPA zielen auf Effizienzverbesserungen ab. Bei biogenen Kraftstoffen steht die Beimischung von Ethanol (10 %, regional auch 15 %) im Vordergrund.

Biodiesel und Biogas werden stark gefördert: So produzierten die USA im Jahr 2023 12,6 Millionen Tonnen HVO, was einem Anteil von rund 63 % an der gesamten Biodieselproduktion entspricht (siehe Abb. 9) ⁸⁰. Hierfür wird zunehmend biogenes Öl auch aus China importiert.

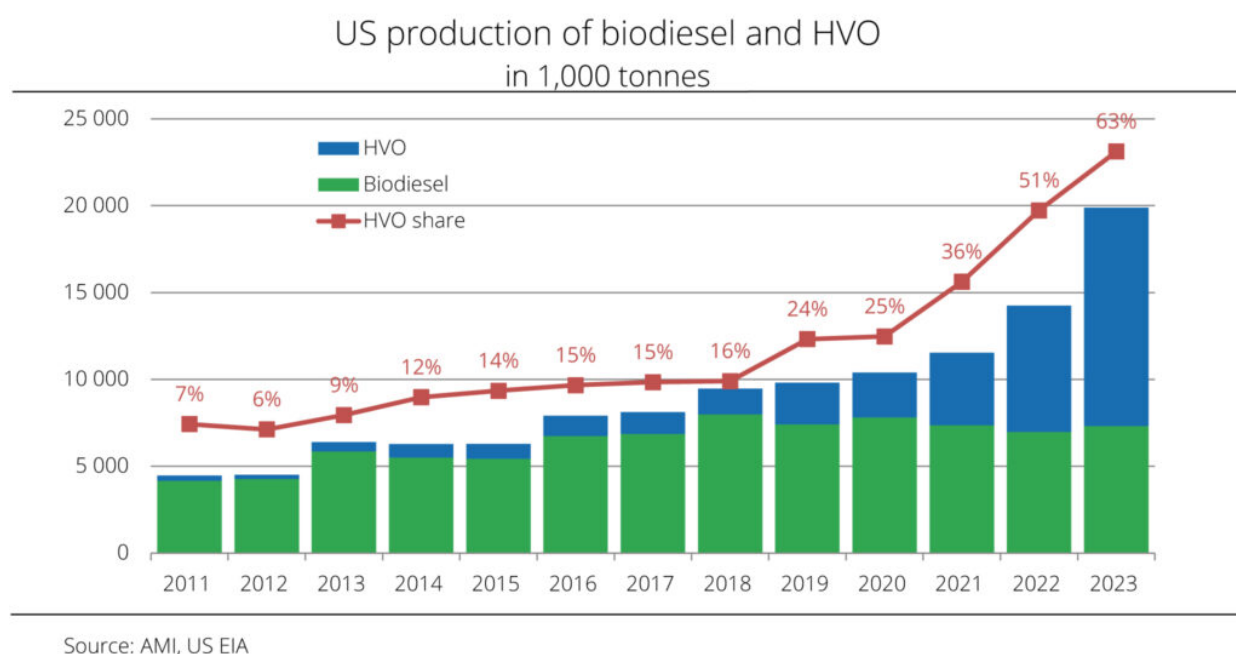


Abb. 9 Biodiesel- und HVO-Produktion in den USA ⁷⁷

Große Förderprogramme in den USA unterstützen die Entwicklung von SAF.

Ziel ist es, bis 2030 11 Mio m³ und bis 2050 133 Mio m³ SAF zu produzieren („SAF Grand Challenge“-Programm des DOE und DOT ⁸¹).

⁸⁰ Renewable Carbon News, „Bio-based HVO gains in importance in the US“, 24 June 2024
<https://renewable-carbon.eu/news/hvo-gains-in-importance-in-the-usa>, accessed 2.9.2025

⁸¹ <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/sustainable-aviation-fuel-grand-challenge>, accessed 2.9.2025

Ferner gibt es Steuervergünstigungen („Sustainable Aviation Fuel Credit“) bei Verwendung von SAF mit mindestens 50 % Reduktion der Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus.

Auch die Elektromobilität erfährt über Steuervergünstigungen im Rahmen des „Inflation Reduction Act“ eine Förderung.

FAZIT/ Zusammenfassung:

Da eine weitgehende Elektrifizierung der Mobilität global betrachtet nur bedingt möglich ist und sich in vielen Ländern auch auf lange Sicht wirtschaftlich kaum realisieren lässt, werden Verbrennungsmotoren noch lange weiter genutzt werden.

Um die CO₂-Emissionen von Fahrzeugen, Flugzeugen und Schiffen zu verringern, sind daher in erheblichem Umfang regenerativ erzeugte, klimafreundliche Kraftstoffe erforderlich.

Insbesondere bei Flugzeugen wird die heutige Antriebsform noch lange fortbestehen, da es keine tragfähigen Alternativen gibt bzw. diese noch Jahrzehnte an Entwicklungsarbeit erfordern. Daher sind hier nicht-fossile, biogene oder synthetische Treibstoffe besonders gefragt.

Für Verbrennungsantriebe eignen sich neben regenerativ erzeugtem Wasserstoff auch E-Fuels (Kohlenwasserstoffe aus der Fischer-Tropsch-Synthese bzw. Methanol und Methanol-Derivate), eventuell regenerativ erzeugter Ammoniak (bei Schiffen) sowie biogene Treibstoffe wie Bioethanol, Biomethan, Biodiesel (FAME), biogener synthetischer Diesel (HVO), Biobenzin und Biokerosin (HEFA)

Hauptkritikpunkt bei der Verwendung von Biodiesel ist die Verwendung von Rohstoffen, die direkt mit der Produktion von Nahrungsmitteln konkurrieren oder für deren Anbau Plantagen durch großflächige Rodung angelegt werden müssen.

Im Fokus der Kritik stehen dabei die Palmölplantagen in Südostasien. (In der EU besteht inzwischen ein Verbot, Palmöl zur Herstellung biogener Treibstoffe zu nutzen).

Ein Ausweg wäre die Nutzung der weltweit geschätzt 15 Millionen Quadratkilometer großen Fläche, die landwirtschaftlich nicht oder nicht mehr geeignet ist, für den Anbau genügsamer Ölpflanzen, deren Ölsaaten sich nicht für Nahrungs- und Futtermittel, aber für die Produktion von biogenen Treibstoffen eignen.

Würde man nur 20 % dieser Fläche, also 300 Millionen Hektar, nutzen, könnte der zukünftige Bedarf an Flugkerosin vollständig und der Bedarf an biogenem Diesel zu einem großen Teil gedeckt werden.

Verbesserungen bei der Pflanzenzüchtung und bei den Anbaumethoden würden dieses Potenzial noch erhöhen.

Die im Vergleich zu fossilen Produkten höheren Einstandspreise könnten durch Skaleneffekte und Subventionen im Rahmen eines CO₂-Zertifikatehandels ausgeglichen werden.

Eine wichtige Voraussetzung dafür sind international eingeführte und handelbare CO₂-Zertifikate, die in ein Cap-&-Trade-System wie das EU-ETS integriert sind und einen attraktiven wirtschaftlichen Wert erhalten.

Zudem wäre das Gesamtkonzept ein Baustein für eine vorteilhafte Kooperation zwischen den Industrieländern und dem Globalen Süden:

- Der Anbau von Ölpflanzen und die Gewinnung von Bioölen in Entwicklungs- und Schwellenländern würden deren wirtschaftliche Weiterentwicklung ermöglichen und gleichzeitig einer weiteren Landdegradierung entgegenwirken.
- Die Weiterverarbeitung und Nutzung der Öle durch die Industrieländer würde den Einsatz fossiler Energieträger reduzieren und die damit verbundenen CO₂-Emissionen verringern, ohne einen radikalen Technologiewechsel („All-Electric“) erzwingen zu müssen. (Dieser führt zu anderen ungewollten Rohstoffabhängigkeiten und einem höheren Ressourcenverbrauch, der mit erhöhten CO₂-Emissionen („CO₂-Rucksack“) verbunden wäre). Die bestehende Raffinerie- und Versorgungsstruktur könnte weiterhin genutzt werden, was auch unter geopolitischen und sicherheitspolitischen Aspekten sowie hinsichtlich der Versorgungssicherheit geboten erscheint.

Darüber hinaus ermöglicht Aufforstung derzeit ungenutzter Flächen die permanente Bindung erheblicher Mengen CO₂ aus der Atmosphäre unter Bildung einer CO₂-Senke (sofern das Holz am Ende seiner Nutzungsdauer nicht verbrannt, sondern als Baustoff oder in Form von Biokohle zur Bodenverbesserung genutzt wird). Die Senke bleibt auch erhalten, wenn nach der Rodung der Altpflanzen eine Neuaufforstung stattfindet.

Eine Aufforstung auf einer Gesamtfläche von 300 Millionen Hektar würde eine Senke von 120 bis 210 Gigatonnen CO₂ bilden. Das entspricht der Aufnahme aller derzeitigen anthropogenen CO₂-Emissionen über einen Zeitraum von drei bis fünf Jahren.