



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Ökologische Auswirkungen von Agrokraftstoffen

Horst Fehrenbach, Silvana Bürck, Theresa Schlamp, Nabil Abdalla, Viviann Bolte, Susanne Köppen

Heidelberg, 2024



Erstellt im Auftrag der Deutschen Umwelthilfe (DUH).

IMPRESSUM

Autoren: Horst Fehrenbach, Silvana Bürck, Dr. Theresa Schlamp, Nabil Abdalla,
Viviann Bolte, Susanne Köppen

Herausgeber: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstraße 3 - D-69120 Heidelberg

Erscheinungsjahr: 2024

Bildquellen: Fehrenbach

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	5
Abkürzungen	6
Executive summary	8
1 Hintergrund und Zielsetzung	10
2 Vorgehensweise	12
2.1 Fragestellung	12
2.2 Datengrundlagen	14
2.2.1 Übersicht	14
2.2.2 In Deutschland konsumierte Biokraftstoffmengen	14
2.2.3 Ernteerträge	16
2.2.4 Einsatz von Dünger, Pestiziden und Energie	17
2.3 Methode	19
2.3.1 Bewertung von Stickstoff- und Phosphoreinträgen/-überschüssen	19
2.3.2 Bewertung von Pestizideinsätzen	20
2.3.3 Bewertung von Auswirkungen auf die Biodiversität	21
2.3.4 Bewertung des Verbrauchs an fossilen Rohstoffen	22
2.3.5 Allokation von Koppelprodukten	23
3 Ergebnisse und Diskussion	24
3.1 Flächenbelegung durch den Anbau für Agrokraftstoffe	24
3.2 Eintrag von Stickstoff und Phosphor	25
3.3 Eintrag von Pestiziden	26
3.3.1 Grundsätzliche Bewertung der eingesetzten Pestizide	26
3.3.2 Beurteilung anhand des Montreal-Ziels	27
3.3.3 Das „kritische Wasservolumen“	27
3.4 Bewertung der Auswirkungen auf die Biodiversität	29
3.5 Einsatz fossiler Energien	31
4 Zusammenfassung	36
Literaturverzeichnis	38

Inhalt

Anhang

40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	In Deutschland im Jahr 2022 konsumierte Mengen an Anbau-Biokraftstoffen nach Feldfrucht und Herkunft (Quelle: (BLE 2024), Darstellung ifeu)	15
Abbildung 2:	Absatz an Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen in Deutschland von 2007 bis 2022; Quelle: (BVL 2024), Darstellung ifeu	17
Abbildung 3:	Flächenbelegung der in Deutschland in 2022 eingesetzten Anbau-Biokraftstoffe; durch Allokation sind die Flächenanteile für die Koppelprodukte hier abgezogen (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))	24
Abbildung 4	„Kritisches Wasservolumen“, das benötigt wird, um eine Pestizidkonzentration von 0,5 µg/L zu unterschreiten, jeweils für einen Liter Agrokraftstoff - alloziert (Quelle: Berechnungen ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))	28
Abbildung 5:	Relative Biodiversitätsauswirkung der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe bezogen auf den Pfad mit der höchsten spezifischen Auswirkung (= 1). AU: Australien, BR: Brasilien, CL: Chile, CN: China, DE: Deutschland, HO: Honduras, ID: Indonesien, PE: Peru, PL: Polen, UA: Ukraine, US: USA	30
Abbildung 6	Auswirkung des Anbaus von Energiepflanzen für in Deutschland konsumierte Biokraftstoffe auf die Biodiversität.	30
Abbildung 7:	Spezifischer Verbrauch an fossiler Primärenergie für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe; ohne Allokation von Nebenprodukten	34
Abbildung 8:	Gesamtverbrauch an fossiler Primärenergie für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe	34
Abbildung 9	„Kritisches Wasservolumen“, das benötigt wird, um eine Pestizidkonzentration von 0,5 µg/L zu unterschreiten, jeweils für einen Liter Agrokraftstoff – ohne Allokation (Quelle: Berechnungen ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung zentraler Datengrundlagen	14
Tabelle 2:	Übersicht über die verwendeten Daten zu Ernteerträgen der Rohstoffe für Agrokraftstoffe	16
Tabelle 3:	Übersicht über die verwendeten Daten zum Einsatz von Dünger und Pestiziden	18
Tabelle 4:	Übersicht über die verwendeten Daten zum Einsatz von Endenergieträgern und die Faktoren für den jeweiligen Primärenergieverbrauch (letzte Zeile)	19
Tabelle 5:	Übersicht über die Allokationsfaktoren der zu analysierenden Feldfrüchte	23
Tabelle 6:	Eingesetzte Mengen an Stickstoff (N) und Phosphor (P) durch die Produktion von Agrokraftstoffen im Vergleich zu den Budgets nach den planetaren Grenzen	25
Tabelle 7:	Eingesetzte Mengen an Pestizidwirkstoffen durch die Produktion von Agrokraftstoffen im Vergleich zu den Budgets nach dem Montreal-Ziel	27
Tabelle 8:	Zusammenstellung der Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch von Agrokraftstoffen in den Einheiten MJ pro MJ, ohne Allokation und mit Allokation	32
Tabelle 9:	Zuweisung der Anbauflächen zu Herkunftsländern.	40
Tabelle 10:	Umrechnung der Biodiversitätswirkung auf andere Größen	41
Tabelle 11:	In Deutschland eingesetzte Fungizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ https://gestis.dguv.de/)	42
Tabelle 12:	In Deutschland eingesetzte Insektizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ https://gestis.dguv.de/)	42
Tabelle 13:	In Deutschland eingesetzte Herbizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ https://gestis.dguv.de/)	43

Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
BGBI	Bundesgesetzblatt
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMJ	Bundesministerium für Justiz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit und Verbraucherschutz
CBD	Convention on biological diversity
CH₄	Methan
CO₂	Kohlendioxid
CO₂Äq	Kohlendioxid Äquivalente
DüV	Düngeverordnung
EU	Europäische Union
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden Federal Statistical Office of Germany
GJ	Gigajoule
GWP100	Global warming potential – über einen Zeitraum von 100 Jahren
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JKI	Julius Kühn-Institut
JEC	Konsortium aus JRC, Eucar und Concawe
JRC	Joint Research Center
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
MJ	Megajoule
N	Stickstoff
N₂O	Lachgas

Abkürzung	Erklärung
NIR	Nationaler Inventar Bericht
NP	Stickstoff und Phosphor
P	Phosphor
PDF	Potentially disappeared Fraction
PJ	Petajoule
PSM	Pflanzenschutzmittel
RED	Renewable Energy Directive – erneuerbare Energien Richtlinie - RED I: Directive 2009/28/EC; - RED II: Directive (EU) 2018/2001; - RED III: Directive (EU) 2023/2413
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
THG	Treibhausgas
TI	Johann Heinrich von Thünen-Institut
TJ	Terajoule
UAN	Harnstoff-Ammoniumnitrat-Lösung
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UNEP	United Nations Environmental Programme

Executive summary

This short study discusses and evaluates various aspects of the environmental impact of the production and use of agrofuels consumed within the German fuel market. The selected indicators for potential impacts (environmental impact potentials) of the respective chosen fuels reflect typical, significant and contextually relevant environmental impacts associated with these fuels. The study focuses:

1. Nitrogen and phosphorus input,
2. Use of pesticides,
3. Impacts on biodiversity, and
4. Consumption of fossil or non-renewable raw materials (primary energy consumption).

The **assessment of nitrogen and phosphorus inputs to the environment** is based on the concept of planetary boundaries and answers the question, what proportion of the overall German budget is taken up by the cultivation of agrofuels. The production of the agrofuels consumed in Germany in 2022 takes up about a quarter of Germany's budget in both cases: 27.5 % in the case of nitrogen fertilizer and 24.3 % in the case of phosphorus.

The **amount of pesticides used** is assessed in two ways: On the one hand, the use of pesticides is assessed on the basis of the objectives of the Montreal Protocol. This provides for a halving of pesticide use in Germany. In this way, the extent to which a phase-out of the selected agrofuels could contribute to achieving the Montreal target is worked out. Assuming a globally uniform per capita budget for the use of pesticides, this results in a total budget of 41,900 tons of pesticides for Germany. The use of pesticides for the purpose of the cultivation of energy crops for the production of agrofuels burdens this budget with a sum of 9,990 t, or 23.8 %.

A phase-out of agrofuels could therefore constitute a significant contribution to meeting the Montreal targets for pesticide use (47.6 %). In a second step, it is also calculated how large a "critical water volume" must be so that this total amount of pesticide remains at a concentration that is harmless to health. The applicable groundwater quality standard in accordance with Directive 2006/118/EC is used as the limit value for this (maximum concentration of pesticides and their metabolites 0.1 µg/l each and a maximum total of 0.5 µg/l). This water volume amounts to 3.13 trillion cubic meters, corresponding to 14.5 % of the volume of the Baltic Sea.

The "Potential disappeared fraction of species" indicator (PDF) according to Chaudhary and Brooks (2018) is used to evaluate the **impact** of the cultivation and production of the selected agrofuels **on biodiversity**. This quantifies potential aggregated global species losses caused by land use in the countries of cultivation. The selected agrofuels differ significantly in terms of their respective potential species losses and are not uniform. In total, they result in a PDF value of 0.24. This figure provides an orientation for the potential loss of species for each year of cultivation. The actual loss of species is higher, as the model for the PDF does not consider the large group of insects, among others.

Finally, the **primary energy consumption** of the agrofuel selection is analyzed. For this purpose, the individual primary energy consumption of the selected agrofuels is quantified and compared with fossil diesel fuel. The primary energy consumption of the individual agrofuels ranges from 0.45 MJ/MJ (palm oil, biodiesel) to 1.17 MJ/MJ (cereals, bioethanol). With 1.18 MJ/MJ, fossil diesel fuel is in the same order of magnitude as cereals-based bioethanol. The total primary energy consumption of selected agrofuels in 2022 is 60.9 PJ.

In summary, it can be stated that the consumption of agrofuels in Germany is associated with considerable global impacts on the environment and ecosystems. For example, the selected agrofuels cause considerable nitrogen and phosphorus consumption, which leads to a substantially reduced budget for compliance with planetary boundaries. A phase-out of these fuels would accelerate the achievement of the German Montreal target. The cultivation of crops for the selected agrofuels leads to potential species declines compared to the development of natural vegetation. With regard to the use of primary energy resources, agrofuels can achieve savings of up to around 50 % compared to fossil fuels in some cases, but still require a substantial amount of fossil primary energy sources overall.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Der Kampf gegen den menschengemachten Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen dieses Jahrhunderts und wird unter den zahlreichen Bedrohungen der Umwelt durch menschliche Aktivitäten vielfach als die größte verstanden. Angesichts dessen hat sich die Bundesrepublik Deutschland dazu verpflichtet, bis zum Jahr 2045 vollständig klimaneutral zu sein und dies im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)¹ als Ziel festgeschrieben. Während einige Sektoren, insbesondere der Stromsektor, bereits substanzielle Fortschritte erzielen konnten, gestaltet sich die Erreichung sektoraler Ziele vor allem im Verkehrssektor als schwierig. So ist der im Straßenverkehr bisher erzielte Emissionsrückgang gegenüber dem Referenzjahr 1990 mit 7,2 % gering, insbesondere, weil im Vergleich dazu im selben Zeitraum alle energieintensiven Sektoren einen Rückgang um rund 40 % verzeichneten (eigene Berechnung auf Basis (BMDV 2024)).

Unter den Maßnahmen zur Emissionsminderung im Verkehr werden insbesondere aus Kreisen der beteiligten Wirtschaft² die Biokraftstoffe als die am besten verfügbare und bewährte Option in die Diskussion gebracht. Diese Diskussion währt schon zwei Jahrzehnte. Jedoch ist der Beitrag, den Biokraftstoffe zur effektiven Emissionsminderung leisten können, wissenschaftlich umstritten. Dies gilt im besonderen Maße für Biokraftstoffe erster Generation, also auf Basis von Anbaubiomasse, wie etwa Getreide (Bioethanol) oder Raps (Biodiesel). Diese oftmals auch als Agrokraftstoffe oder konventionellen Biokraftstoffe bezeichneten Kraftstoffe stehen in direkter Nutzungskonkurrenz zur Produktion von Lebensmitteln und können zu direkten (und indirekten) Landnutzungsänderungen führen, was mit erheblichen Emissionen einhergehen kann. Bereits Mitte der 2010er-Jahre hat vor diesem Hintergrund ein Paradigmenwechsel in der Bewertung dieser Kraftstoffe stattgefunden, welchem u.a. durch die Deckelung der Mengenziele nach Erneuerbarer Energien-Richtlinie (renewable energies directive, kurz RED) Rechnung getragen wird.

Zu einer umfassenden Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines Kraftstoffes aber reicht eine alleinige Fokussierung auf Treibhausgasemissionen nicht aus. Ständen und stehen diese angesichts des voranschreitenden Klimawandels zurecht im Mittelpunkt, so werden weitere ökologische Auswirkungen, etwa auf das Schutzgut Biodiversität, weniger stark diskutiert. Die RED schließt zwar aus, dass Biomasse für Agrokraftstoffe von Flächen kommen darf, auf welchen vor dem Jahr 2008 Primärwald, kohlenstoffreiche Flächen, artenreiches Grünland oder Torfland bestanden hatte. Doch weitere ökologische Anforderungen bezüglich der Schutzgüter Biodiversität, Luft, Boden und Wasser stellt die Richtlinie nicht. Ein in der ersten Fassung von 2008 noch enthaltener Nachweis der Einhaltung einer guten

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

² „Biokraftstoffe sind die einzige Alternative zu fossilen Kraftstoffen, die es derzeit in relevanten Mengen gibt. Sie ermöglichen erneuerbare Mobilität – auch bei Dunkelflauten“. Elmar Baumann Geschäftsführer VBD; <https://biokraftstoffverband.de/>

„Würden alle für Super E10 geeigneten Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor in Deutschland E10 tanken, könnten die Emissionen im Verkehr jährlich um rund 3,6 Mio. t CO₂eq sinken.“ BDBE,

<https://www.bdbe.de/klimaschutz/umweltschutz>

landwirtschaftlichen Praxis (Cross Compliance) bei Anbau innerhalb der EU wurde mit den Neufassungen gestrichen.

Dabei zeigt sich in allen UN-Berichten zu Biodiversität, Wasser- und Bodenkrisen, dass die Landwirtschaft zumeist an der Spitze der Treiber für negative Entwicklungen steht (IPBES 2019). Dies lässt sich auch mittels des Konzepts der planetaren Grenzen erkennen, die gerade bei diesen Schutzgütern im kritischen Bereich liegen, wenn nicht überschritten sind.

Die vorliegende Kurzstudie untersucht daher anhand einer Auswahl relevanter Wirkungsindekatoren die ökologische Wirkung der relevantesten Agrokraftstoffe jenseits von Treibhausgasemissionen, welche im Jahr 2022 in Deutschland im Verkehrssektor zum Einsatz kamen.

Der Aufbau dieser Studie gestaltet sich folgendermaßen: Zu Beginn wird die Methodik, einschließlich der Forschungsfragen, der verwendeten Datengrundlagen und der Vorgehensweise (Kapitel 2) erläutert. Anschließend werden in Kapitel 3 die Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Die Studie endet mit einer Zusammenfassung, welche die zentralen Kernpunkte der Studie aufführt (Kapitel 4).

2 Vorgehensweise

2.1 Fragestellung

Im Zentrum dieser Studie steht die Frage, welches Umweltwirkungspotenzial jenseits der Emission von Treibhausgasemissionen der Produktion und Nutzung von Agrokraftstoffen zuzurechnen ist. Hierfür ist eine schrittweise Analyse erforderlich, die sich in mehrere Unterfragen aufteilt.

Folgende Unterfragen werden im weiteren Verlauf untersucht:

5. Wo werden die in Deutschlands Tanks eingesetzten Rohstoffe angebaut?
6. Wie hoch sind die Erträge bzw. Flächenbelegungen?
7. Wie hoch sind Einsätze von Düngemitteln und Pestiziden, und welche werden genutzt?
8. Wie viel Energie wird zur Herstellung von Agrokraftstoffen benötigt?

Für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe aus folgenden **Anbaufrüchten** werden die Umweltfaktoren zusammengestellt:

- a. Ölpflanzen (Raps, Soja, Sonnenblume und Palmöl¹),
- b. Getreide (Weizen, Mais, Roggen, Gerste, Triticale), sowie
- c. Zuckerpflanzen (Zuckerrübe, Zuckerrohr).

Ausgehend von flächenbezogenen Daten wird das Umweltwirkungspotenzial auf die erzeugten Agrokraftstoffe (pro MJ, aber auch pro Liter) sowie die Gesamtwirkung umgerechnet. Hierbei werden folgende Ebenen unterschieden:

1. Unterteilung nach Rohstoffen,
2. gewichtetes Mittel der Rohstoffe unterteilt nach Diesel und Ethanol, sowie
3. in Bezug auf die Gesamtmenge der in Deutschland 2022 verbrauchten Agrokraftstoffe.

Auf diesen drei Ebenen erfolgt eine Einschätzung der **ökologischen Auswirkungen des Anbaus der Rohstoffe für Agrokraftstoffe**, die etwa mit der Nutzung der Pestizide und dem Einsatz der Düngemittel (N und P) einhergehen. Bei quantifizierenden Aussagen werden im Übrigen auch Koppelprodukte, also Produkte, die neben den gewünschten Rohstoffen für Agrokraftstoffen entstehen, berücksichtigt.

¹ Palmöl war im Jahr 2022 noch anrechnungsfähig und wird hier der Vollständigkeit halber mit betrachtet; es sei bemerkt, dass dieses als Rohstoff mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderung gemäß THG-MinderungsquotenVO § 13b ab dem Jahr 2023 entfällt.

Die ökologischen Auswirkungen werden anhand folgender Größen quantifiziert:

- Stickstoff- und Phosphoreinträge/-überschüsse werden anhand des Konzepts der planetaren Grenzen (Richardson et al. 2023) bewertet: Wie weit schöpfen die Nährstoffeinträge durch die Agrokraftstoffproduktion die verbleibenden Budgets aus?¹
- Pestizide anhand zweier Größen:
 - „Kritisches Volumen“: wie viel Wasser braucht es theoretisch, damit der Pestizideintrag unkritische Belastungen unterschreitet?
 - Montréal-Abkommen: vereinbartes Ziel ist die Halbierung des Pestizideinsatzes; die Frage hier ist, in welchem Umfang der ermittelte Pestizideintrag diesem Ziel entgegensteht.
- Biodiversitätsverlust anhand des in Ökobilanzen vielfach angewendeten Indikators, der sogenannten *Potentially Disappearing Fraction of Species* (PDF), der für verschiedene Landnutzungsarten und Intensitäten den potenziellen Verlust von Arten einschätzt.
- Der Verbrauch an fossilen Primärenergieträgern für die Produktion der Biokraftstoffe.

¹ Quantifizierende Ansätze hierzu wurden von ifeu im Rahmen eines UBA-Vorhabens entwickelt.

<https://www.ifeu.de/publikation/vorstudie-zu-ansaetzen-und-konzepten-zur-verknuepfung-des-planetaren-grenzen-konzepts-mit-der-inanspruchnahme-von-abiotischen-rohstoffenmaterialien/>

2.2 Datengrundlagen

2.2.1 Übersicht

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Datenquellen. Diese werden im Anschluss genauer erläutert.

Tabelle 1: Zusammenstellung zentraler Datengrundlagen

Herausgeber	Bericht/ Veröffentlichung	Art der Daten	Jahr des Datensatzes	Quellenbezeichnung
BLE	Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022	Ausgangsstoffe nach Herkunft und Art	2022	(BLE 2024)
BMEL	Erntestatistiken	Erträge von Agrarprodukten	2021/22	(BMEL 2022)
BMJ	Düngeverordnung (DüV)	Düngebedarf	2020	https://www.gesetze-im-internet.de/
UBA	BioEm - Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade	Daten zur THG-Lebenswegbilanzberechnung (Energieverbräuche, Ertragsdaten, Allokations- und Umwandlungsfaktoren)	2015	(Fehrenbach et al. 2016)
KTBL	Dieselbedarfsrechner, Leistung-Kosten-Rechner			KTBL Website ¹
JEC	Well-to-Wheel Studien (Version 5)		2010	(Prussi et al. 2020)
ifeu	BioGrace		2009	(ifeu 2015)

2.2.2 In Deutschland konsumierte Biokraftstoffmengen

Die wesentliche Datengrundlage für die Bestimmung der **konsumierten Mengen** an Agrokraftstoffen in Deutschland liefern die **Evaluations- und Erfahrungsberichte** der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Für das hier betrachtete Referenzjahr 2022 liegt der aktuellste Bericht vor (BLE 2024). Frühere Berichte können zur Einschätzung von Trendentwicklungen dienen.

Danach wurden im Jahr 2022 knapp 4 Mio. Tonnen Biokraftstoffe zur Anrechnung auf die deutsche Treibhausgasminderungsquote angemeldet. In der Energieeinheit Petajoule (PJ) entspricht das rund 140 PJ, was in etwa auch der Menge des Vorjahrs entspricht. Eine Anrechnung auf die THG-Quote kann als gleichbedeutend mit dem Einsatz der in Deutschland getankten Kraftstoffe verstanden werden.

Von diesen 140 PJ stammen 53,9 % aus Anbaubiomasse und 46,1 % aus Abfällen und Reststoffen. Erstere sind Gegenstand dieser Studie. Vom Trend her zeigt der Evaluations- und Erfahrungsbericht der BLE einen Rückgang der Agrokraftstoffe gegenüber den reststoff- und

¹ <https://www.ktbl.de/webanwendungen/dieselbedarfsrechner>
<https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau>

abfallbasierten Biokraftstoffen. Hier ist ein Einfluss des ab 2023 geltenden Ausschlusses von Palmöl von der Anrechenbarkeit zu vermuten, da dieser Rohstoff gegenüber den Vorjahren bereits massiv zurückgegangen ist (von 58 PJ noch in 2020 auf 13,3 PJ in 2022).

Dass dafür der Anteil an reststoff- und abfallbasierten Biokraftstoffen erheblich angestiegen ist (von 46,4 PJ auf 64,0 PJ) ist nicht ausschließlich positiv im Sinne der tatsächlichen THG-Minderung bzw. der Nachhaltigkeit insgesamt zu interpretieren. Ein großer Anteil dieser Rohstoffe wird aus China eingeführt und hinsichtlich Ursprungs und Nachhaltigkeitsnachweis bestehen hier massive Zweifel (siehe dazu auch die entsprechende Pressemitteilung der BLE).¹ Diese Frage soll jedoch nicht weiter Gegenstand dieser Studie sein, die sich mit den konsumierten Agrokraftstoffen befasst, die offiziell als auf Anbaubiomasse basierend ausgewiesen sind. In Abbildung 1 werden diese nach Herkunft und Feldfrucht differenziert dargestellt.

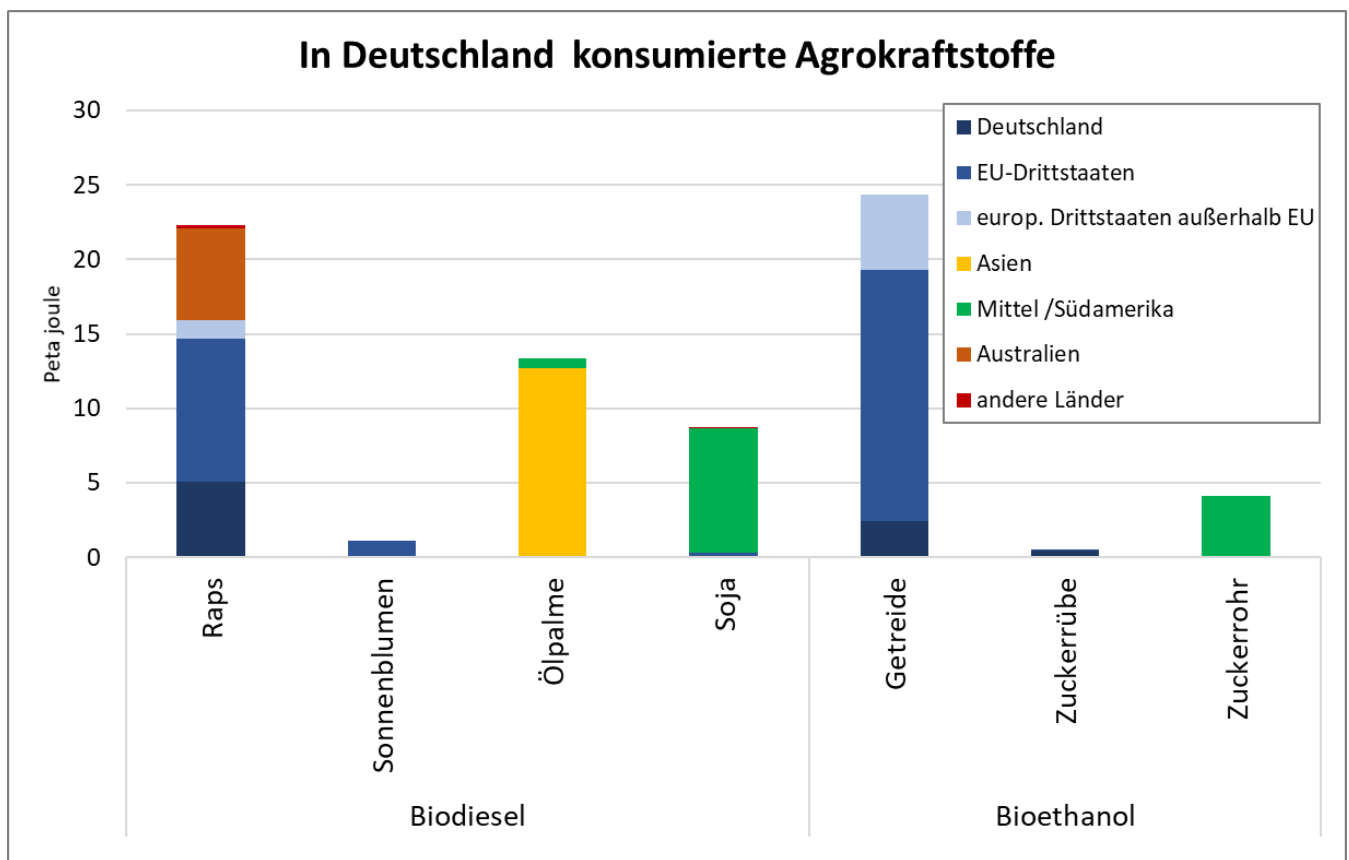


Abbildung 1: In Deutschland im Jahr 2022 konsumierte Mengen an Anbau-Biokraftstoffen nach Feldfrucht und Herkunft (Quelle: (BLE 2024), Darstellung ifeu)

¹ https://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Hinweis_Import-Kraftstoffe.html

2.2.3 Ernteerträge

Daten zu **Erträgen** können den **Ernteberichten** des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) entnommen werden (BMEL 2023) (BMEL 2022). Ergänzend werden Daten vom Statistischen Bundesamt (Destatis) herangezogen (Destatis 2023). Da große Anteile an Agrarrohstoffen für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe außerhalb Deutschlands produziert werden, werden die deutschlandtypischen Ertragsdaten anhand weiterer Quellen plausibilisiert. Hierzu zählen u.a. die Basisdaten, die das Joint Research Center (JRC) zur Ermittlung der Standardwerte der Erneuerbaren Energie Richtlinie (RED II)¹ verwendet hat, und die sich auch in Daten zu den JEC Well-to-Wheels-Studien wiederfinden (Prussi et al. 2020).

Diese Daten werden im Rahmen dieser Studie außerdem anhand von Angaben aus den Erzeugerverbänden überprüft, wie insbesondere der Union zur Förderung von Oel- und Proteinpflanzen e.V. (UFOP), dem Verband der Deutschen Biokraftstoffindustrie (VDB), dem Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. (BDBe), sowie dem Verband der ölsaatenverarbeitenden Industrie in Deutschland e. V. (OVID).

Anhand der Ertragsdaten kann auf die **Flächenbelegung** durch den Anbau der Feldfrüchte geschlossen werden, die u.a. für Bewertung der Wirkung auf die Biodiversität relevant ist.

In Tabelle 2 sind die verwendeten Daten zu Ernteerträgen, Flächenbelegungen für Biokraftstoffe auf deutschen Agrarflächen, Biokraftstoffausbeuten und Allokationsfaktoren gemäß der in Tabelle 1 dargestellten Datenquellen zusammengestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die verwendeten Daten zu Ernteerträgen der Rohstoffe für Agrokraftstoffe

	Spezifischer Ernteertrag t/(ha*a)		
	Deutschland ^{a)}	Europa ^{b)}	Daten aus BioEm ^{c)}
Biodiesel			
Raps	3,56		3,11
Sonnenblume		2,14	
Ölpalmfruchtstände	-	-	19
Soja	-	-	2,8
Bioethanol			
Körnermais	9,49	7,92	8,95
Roggen	5,33	4,06	-
Weizen	7,76	5,91	5,2
sonst. Getreide	6,77	5,65	-
Zuckerrübe	73,72	73,7	68,9
Zuckerrohr	-		72,6

¹ Richtlinie (EU) 2018/2001, Anhang V; (European Commission 2018)

Quellen: a) (BMEL 2022), b) EU Kommission: https://circabc.europa.eu/sd/a/2f20cdb4-6113-48d8-9990-b1ac7edd2e2a/Cereals_bs_EUROPA_EU.xlsx c) (Fehrenbach et al. 2016);

2.2.4 Einsatz von Dünger, Pestiziden und Energie

Bezüglich der eingesetzten **Mengen an Stickstoffdünger** kann auf Düngebedarfsangaben in der Düngeverordnung (DüV)¹ von 2020 zurückgegriffen werden. In Anlage 4 und 5 der DüV finden sich Daten zur Ermittlung des Stickstoffdüngedarfs. Diese Daten werden für den Anbau in Europa angesetzt. Für den Anbau außerhalb Europas sowie für **Phosphordünger** wird auf die gleichen Literaturquellen Bezug genommen, die bereits für Ertragsdaten erwähnt wurden (Prussi et al. 2020), BioGrace, (Fehrenbach et al. 2016). Die Daten für den Düngeinsatz sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Für den Einsatz an **Pestiziden** können für die in Deutschland angebauten Agrarrohstoffe Daten zum Absatz von Pflanzenschutzmitteln² seitens des Bundesamts für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL 2024) sowie Daten vom Statistischen Bundesamt (Destatis)³ genutzt werden. Nach BVL sind in Deutschland insgesamt knapp 600 Wirkstoffe auf dem Markt. Im Jahr 2022 wurden 48.250 t Wirkstoff in Deutschland abgesetzt. Abbildung 2 zeigt, dass der Absatz an Pestiziden seit 2007 leicht ansteigend ist, obwohl es politische Ziele zur Pestizidreduktion gibt.

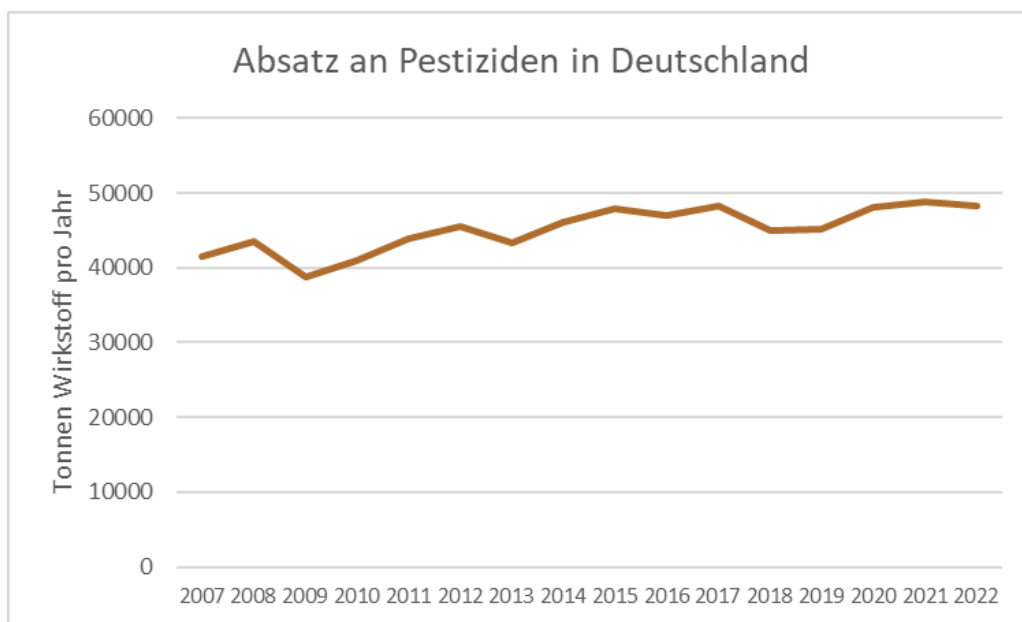


Abbildung 2: Absatz an Pflanzenschutzmittel-Wirkstoffen in Deutschland von 2007 bis 2022; Quelle: (BVL 2024), Darstellung ifeu

Für Europa werden angesichts ähnlicher Rechtsgrundlagen vergleichbare Einsatzmengen und Wirkstoffarten angenommen. Für Anbausysteme außerhalb Europas kann dies nicht vorausgesetzt werden, da vielfach Präparate, die in Europa nicht zugelassen sind, in anderen Regionen der Welt noch eingesetzt werden. Die Beurteilung der potenziellen Wirkung besonders relevanter Pestizide erfolgt exemplarisch in Kapitel 3.3.1 (Beispiele: Metazachlor

¹ https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/D%C3%BCV.pdf

² https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_Zulassung-PSM/03_PSMInlandsabsatzAusfuhr/psm_PSMInlandsabsatzAusfuhr_node.html

³ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Nachhaltigkeitsindikatoren/Generationengerechtigkeit/4-pflanzenschutzmittel.html>

und Paraquat). Die Daten zum Pestizideinsatz sind der UBA-Studie BioEm (Fehrenbach et al. 2016) entnommen und mit den Daten der Well-to-Wheel-Studien (Prussi et al. 2020) abgeglichen. Sie sind ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführt.

Die Berechnung des **Energieverbrauchs** bei der Herstellung von Agrokraftstoffen bezieht die Produktion des Düngers, der Pestizide, den für den Anbau benötigten Diesel, Strom und Dampf für die Verarbeitung zu Biokraftstoffen und die Transporte des fertigen Kraftstoffes ein. Bezüglich der Daten kann auf die Rechen-Tools und Studien für die Berechnung von Treibhausgas-Emissionen zurückgegriffen werden, da diese Berechnungen den Bedarf an Energie als Grundlage voraussetzen. Hierzu sind als Datenquellen auch die Well-to-Wheels-Studien (Prussi et al. 2020) geeignet, aber auch die BioEm-Studie für das Umweltbundesamt (Fehrenbach et al. 2016) sowie das Tool BioGrace. Konkrete Daten für den Energieverbrauch des Anbaus können auch anhand der Rechentools des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) abgeschätzt werden^{1, 2}. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die verwendeten Daten zum Einsatz der Endenergieträger Strom, Dampf und Diesel. Diese werden für die Herstellung der Agrokraftstoffe und deren Transport benötigt.

Tabelle 3: Übersicht über die verwendeten Daten zum Einsatz von Dünger und Pestiziden

	Einsatz N-Dünger kg N/(ha*a) ^{a) b)}	Einsatz P-Dünger kg P ₂ O ₅ /(ha*a) ^{b)}	Einsatz Pestizide kg Wirkstoff/(ha*a) ^{b)}
Für Biodiesel			
Raps	200	33,7	6,6
Sonnenblume	120	30	2,0
Ölpalmfruchtstände	79,6	29,6	54
Soja	4,0	25,5	2,3
Für Bioethanol			
Körnermais	200	48,4	1,8
Roggen	170	41,0	2,7
Weizen	210	21,6	5,3
sonst. Getreide	180	22,0	2,7)
Zuckerrübe	170	59,7	21,7
Zuckerrohr	70,7	36,2	2,0

Quellen: a) DüV Anlage 4, Tabelle 2.; b) BioEm;

Anmerkung: P₂O₅ ist die Standardverbindung, auf die der Phosphorgehalt von Düngemittel berechnet und angegeben wird.

¹ <https://www.ktbl.de/webanwendungen/dieselbedarfsrechner>

² <https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau>

Tabelle 4: Übersicht über die verwendeten Daten zum Einsatz von Endenergieträgern und die Faktoren für den jeweiligen Primärenergieverbrauch (letzte Zeile)

	Einsatz Diesel beim Rohstoffanbau Liter / t ^{a)}	Einsatz Strom bei der Kraftstoffherstellung kWh / t ^{a)}	Einsatz Dampf bei der Kraftstoffherstellung MJ/ t ^{a)}	Einsatz Diesel beim Kraftstofftransport Liter / t ^{a)}
Für Biodiesel				
Raps	21,2	153	2.979	25
Sonnenblume	21,2	153	2.979	25
Ölpalmfruchtstände	0,2	153	1.379	69
Soja	15,7	421	6.765	117
Für Bioethanol				
Getreide	9,8	464	9.720	21
Zuckerrübe	3,3	258	7.420	23
Zuckerrohr	1,29	205	7.390	81
Faktoren für den Primärenergieverbrauch der Endenergieträger ^{b)}	42,5 MJ/l	9,65 MJ/kWh	1,98 MJ/MJ	42,5 MJ/l

Quelle: a) wtw-Studien, BioEm, BioGrace, b) Ecoinvent, ifeu-Daten, Well-to-wheel-Studien

2.3 Methode

2.3.1 Bewertung von Stickstoff- und Phosphoreinträgen/-überschüssen

Der Einsatz von Düngemitteln zur Produktion der ausgewählten Agrokraftstoffe wird im Rahmen der vorliegenden Studie anhand dessen bewertet, welchen Beitrag sie zur Überschreitung von planetaren Grenzen leisten. Auf globaler Ebene sind gegenwärtig bereits neben der genetischen Vielfalt als Teil der Intaktheit der Biosphäre die planetaren Grenzen für die biogeochemischen Phosphor- und Stickstoffflüsse überschritten (Richardson et al. 2023). Ein Ansatz, wie man Produkte oder Produktgruppen nach diesem Konzept beurteilen kann, wurde in einem Vorhaben des UBA entwickelt (Dittrich et al. 2021). Daraus lassen sich „Budgets“ ableiten, die maximal pro Person und Jahr an Stickstoff und an Phosphor ausgebracht werden dürfen.

Die genaue Bestimmung solcher Budgets setzt allerdings auch eine Entscheidung über die Frage, wie dabei die globale Gerechtigkeit berücksichtigt wird, voraus. Industrialisierte Länder wie Deutschland habe hier bereits historisch weit mehr zum Ausschöpfen der Grenzen beigetragen als die Mehrzahl der Länder des globalen Südens. Der Einfachheit halber wird hier ein Budget angesetzt, das auf dem „Gleichheitsprinzip“ beruht und alle derzeit leben-

den Menschen der Welt mit dem gleichen Budget versieht. Berücksichtigt man die historische Verantwortung Deutschlands, wäre das verfügbare Budget deutlich kleiner. Das ist zur Interpretation der Studienergebnisse wichtig im Kopf zu behalten.

Diese Budgets liegen für

- Stickstoff zwischen 8,92 und 11,82 kg N pro Person und Jahr (als Rechenwert wird 10 kg N pro Person und Jahr angesetzt)
- Phosphor zwischen 0,9 und 1,62 kg P pro Person und Jahr (als Rechenwert wird 1,2 kg P pro Person und Jahr angesetzt)

Territorial, d.h. für Deutschland insgesamt, liegen die planetaren Grenzen für N und P dementsprechend bei

- 2 Mio. t N pro Jahr
- 0,11 Mio. t P pro Jahr

Für die Bewertung hier werden zunächst die Düngemiteleinsetze für die Gesamtheit für den deutschen Konsum eingesetzten Agrokraftstoffe ermittelt. Im Anschluss wird der Beitrag dieser Mengen zum Budget errechnet und diskutiert.

2.3.2 Bewertung von Pestizideinsätzen

Der Einsatz der Pestizidmenge für den Anbau der Rohstoffe für die Agrokraftstoffe wird auf zweierlei Weise bewertet.

In einem ersten Schritt wird das sogenannte „kritische Wasservolumen“ ermittelt: Angenommen, die ausgebrachte Pestizidmenge gelangt ins Grund- oder Oberflächenwasser: wie groß muss die betroffene Wassermenge sein, damit Grenzen einer unkritischen Belastung nicht überschritten werden? Als „unkritisch“ gilt eine Unterschreitung der Grenzwerte der Grundwasserqualitätsnorm.¹ Danach darf die Konzentration von Pflanzenschutzmittel und deren Metaboliten (sowie anderer relevanter Reaktions- und Abbauprodukte mit biozider Wirkung) jeweils 0,1 µg/l und in Summe maximal 0,5 µg/l betragen. Diese Betrachtung dient allein der Einschätzung der Dimension der ausgebrachten Menge. Wo, wann und wie viel der Pestizide tatsächlich in Gewässer gelangen und ob sie dann Grenzwerte einhalten oder überschreiten, kann nicht beurteilt werden.

In einem zweiten Schritt wird betrachtet, welche Bedeutung die verwendete Pestizidmenge beim Anbau der Rohstoffe für Agrokraftstoffe hat mit Blick auf die deutsche Zielerfüllung nach der Vereinbarung der 15. Weltnaturkonferenz aus dem Jahr 2022 in Montreal (CBD 2023). Diese sieht eine Halbierung des Risikos durch Pestizideinsatz vor (im Weiteren vereinfacht als Montreal-Ziel beschrieben). Dafür wird die weltweit eingesetzte Menge an Pestiziden zunächst pro Erdbewohner*in berechnet, um daraus ein Budget für Deutschland abzuleiten. Anschließend wird die Menge an weltweit eingesetzten Pestiziden, die beim Anbau von Energiepflanzen zur Herstellung von Agrokraftstoffen für Deutschland verwendet werden, dazu ins Verhältnis gesetzt, um den Anteil zur Erreichung des Montreal-Ziels zu bestimmen.

¹ EU Richtlinie 2006/118/EG zum Schutz des Grundwassers vor Verschmutzung und Verschlechterung.
<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:372:0019:0031:DE:PDF>

2.3.3 Bewertung von Auswirkungen auf die Biodiversität

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes werden die Auswirkungen der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe auf die Biodiversität dargestellt. Dabei werden die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Erzeugung der Rohstoffe nach Art und Intensität der damit einhergehenden Landnutzung bewertet.

Die Grundlage für diese Bewertung bilden daher die in Kapitel 3.1 berechneten Flächenbelegungen für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe. In Abhängigkeit von der Intensität der Bewirtschaftung werden diesen Flächen Faktoren zugewiesen, die das Risiko für die Biodiversität beschreiben. Diese Faktoren (auch als Charakterisierungsfaktoren bezeichnet) entstammen der Methode von (Chaudhary und Brooks 2018). Im Rahmen von Ökobilanzen hat diese Methode weltweit verbreitete Anwendung gefunden für die Bewertung von Biodiversitätsrisiken durch Produkte. Sie wurde u.a. im Rahmen der UNEP-SETAC¹ empfohlen. Diese Faktoren drücken den Bruchteil der Arten² aus, der durch die jeweilige menschliche Aktivität (Landnutzung) auf einem Quadratmeter potenziell verloren geht. (Chaudhary und Brooks 2018) stellen globale Charakterisierungsfaktoren bereit, die ein Maß für das potenzielle globale Aussterben pro Quadratmeter Landnutzung geben. Es werden somit potenzielle globale Artenverluste abgebildet, die auf regionale Landnutzungen zurückgehen.³

Durch Multiplikation der Flächenbelegungen der in Deutschland konsumierten Biokraftstoffe mit den Charakterisierungsfaktoren kann somit der potenzielle globale Artenverlust aggregiert über die zugrunde gelegten taxonomischen Gruppen (Säugetiere, Vögel, Gefäßpflanzen etc.) in Bezug auf die Anbauflächen (z.B.: Maisanbaufläche) ermittelt werden.

Beispiel Rapsanbau in Deutschland:

Die Flächenbelegung der Rapsanbaufläche beträgt 0,0606 Mio. ha, d.h. 606 Mio. m².

Der Charakterisierungsfaktor⁴ für „cropland light use Germany“ aus (Chaudhary und Brooks 2018) beträgt $8,0 \cdot 10^{-12}$ PDF/m².

Beide Zahlen multipliziert ergeben als ein Resultat 0,00485 PDF (*Potential disappeared fraction of species*) für die Rapsanbaufläche in Deutschland. Das heißt, der Rapsanbau in Deutschland für die Biokraftstoffe verursacht einen potenziellen globalen Artenverlust im Umfang von 0,00485 PDF und zwar für jedes Jahr, in dem angebaut wird.

Das Ergebnis dieser Berechnung ist der PDF und wird in Einheiten von "Arten" angegeben. Dieser ist aber nicht als Schätzung eines realen Artenverlusts bestimmter Arten infolge einer Umweltbelastung zu verstehen, sondern beschreibt potenzielle Artenverluste. Um den realen Artenverlust zu ermitteln, müssten vor Ort Messungen vorgenommen werden. Außerdem beschränkt sich diese Zahl auf die zugrunde gelegten taxonomischen Gruppen, nicht auf alle Arten. Nicht enthalten sind dabei Insekten und andere Gliederfüßler, sowie Einzeller, Pilze u.v.a.

¹ United Nations Environment Programme/Society of Environmental Toxicology and Chemistry (UNEP-SETAC) Life Cycle Initiative

² Aggregiert über die zugrunde gelegten Taxa Säugetiere, Vögel, Amphibien, Reptilien, Gefäßpflanzen pro Ökoregion oder Land.

³ Für eine Berechnung im Rahmen dieses Arbeitsschrittes werden die Charakterisierungsfaktoren „Mean values_Taxa aggregated“ in der Einheit *Potential Disappeared Fraction* (PDF)/m²“ aus den von (Chaudhary und Brooks 2018) zur Verfügung gestellten Daten entnommen.

⁴ Für die CF: siehe supplementary materials von (Chaudhary und Brooks 2018), Mean values_Taxa aggregated [Unit - Potential Disappeared Fraction (PDF)/m²]

Für die Anwendung der Charakterisierungsfaktoren auf die in Kapitel 3.1 identifizierten Flächenbelegungen ist eine differenzierte Betrachtung der Flächenbelegungen nach Herkunftsland erforderlich. Im BLE-Bericht (2024) wird die Herkunft der Biokraftstoffe jedoch größtenteils nur über die Herkunftsregion, z.B.: Drittstaaten, Mittel- und Südamerika etc., abgebildet. Für die Biodiversitätsbewertung gilt es in einem ersten Schritt die Anbauflächen konkreten Herkunftsländern zuzuordnen. Dafür wurde ein mehrstufiges Verfahren entwickelt. Dieses sieht vor, je nachdem, ob textliche Ergänzungen im aktuellen oder vorherigen BLE-Bericht vorhanden sind, eine sichere oder geschätzte Zuweisung der Anbauflächen zu Ländern vorzunehmen. Die Zuweisung erfolgt in tabellarischer Form (siehe im Anhang, Tabelle 9). Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

1. Gibt es Länderinformationen in BLE (2024)?
2. Wenn ja, dann Angabe des Hauptproduzenten (Land) und Verweis in Spalte certainty auf „high“; gibt es mehrere große Produzenten (Länder), dann Angabe des größten Produzenten (Land) und Verweis in Spalte certainty auf „medium“.
3. Wenn nein, dann Angabe des Hauptproduzenten (Land) aus BLE (2021) und Verweis in Spalte certainty auf „low“.
4. Wenn mit Hilfe von BLE (2021) nicht möglich, dann eigene Schätzung und Verweis in Spalte certainty auf „estimate“.

Anschließend daran folgt die Darstellung der berechneten relationalen Biodiversitätsauswirkungen auf Ebene der Energiepflanzen in unterschiedlichen Anbauländern und der berechneten Biodiversitätswirkung in Bezug auf die in Deutschland konsumierten Biokraftstoffmengen.

Darüber hinaus ist dem Anhang die Darstellung der Biodiversitätsauswirkung bezogen auf 1 PJ Biokraftstoff und 1 l Biokraftstoff differenziert nach Rohstoff bzw. Energiepflanze und im Mittel zu entnehmen. Für die Umrechnung auf 1 PJ werden die Allokationsfaktoren (siehe 2.3.5) und Gesamtmengen in PJ (siehe 2.2.2) verwendet. Die Umrechnung von PJ auf Liter erfolgt durch die Umrechnungsfaktoren aus der RED III: 34 MJ/l für Biodiesel und 21 MJ/l für Bioethanol.

2.3.4 Bewertung des Verbrauchs an fossilen Rohstoffen

Der Verbrauch an fossilen Rohstoffen für die Produktion der gewählten Kraftstoffpfade umfasst die gesamte Produktionskette und erfordert die Verrechnung von Hintergrunddaten zu jedem einzelnen Schritt. Auf dieser Basis und anhand der Mengen werden die Primärenergieverbräuche für die gewählten Agrokraftstoffe berechnet.

Die Bewertung erfolgt folgendermaßen:

1. Für jeden einzelnen Agrokraftstoff werden die spezifischen Primärenergieverbräuche bilanziert in der Einheit Megajoule pro Megajoule (MJ/MJ), sodass deutlich gemacht werden kann, wieviel Energie aufgewendet werden muss, um eine Energieeinheit an Agrokraftstoff zu erzeugen.
2. Für die Gesamtmenge an Agrokraftstoffen wird der Primärenergieverbrauch bilanziert (in Petajoule pro Jahr), dieser wird mit verschiedenen Größen (Energieverbrauch von Städten oder Anzahl benötigter Windenergieanlagen) verglichen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass im Bereich der Verarbeitung für die Hersteller die Option besteht, anstelle von fossilen Energieträgern auch erneuerbare, z.B. für Prozessenergie, einzusetzen. Darauf wird auch bei der Bewertung hingewiesen. Es sei jedoch betont, dass mit der Nutzung z.B. von biogenen Koppelprodukten oder Prozessreststoffen

deren Nutzung zu anderen Zwecken (z.B. Strom für die Allgemeinheit) nicht mehr zur Verfügung steht. Daher ist es gerechtfertigt, den Energieverbrauch der Produktionskette als fossil zu werten.

2.3.5 Allokation von Koppelprodukten

Da aus der agrarisch produzierten Biomasse entlang der Herstellungskette zu Biokraftstoffen hin auch Koppelprodukte (z.B. Rapsextraktionsschrot, Destillationsrückstände) entstehen, wird die Flächenbelegung auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt. Dieser Schritt der Berücksichtigung von Koppelprodukten in der Rechnung wird als Allokation bezeichnet. Die ermittelten Flächenbelegungsdaten für die Feldfrüchte werden folglich je nach Ausbeuten von Agrokraftstoffen und Nebenprodukten mit einem Allokationswert aufgeteilt. Dies erfolgt nach der gleichen Maßgabe, wie sie die Gesetzgebung (RED) vorschreibt: auf Basis des unteren Heizwerts, d.h. des Energieinhalts.

Für die Errechnung der Allokationsfaktoren werden die Heizwerte gemäß RED (Anhang III, Angaben in Megajoule pro Liter, MJ/l) sowie die Ausbeuten von Haupt- und Nebenprodukten nach BioGrace zu Grunde gelegt (siehe Tabelle 5). Diese Allokationsfaktoren weisen dem jeweiligen Biokraftstoff seinen Anteil an der Flächenbelegung zu – die sogenannte allozierte Flächenbelegung. Beispielsweise umfasst die Flächenbelegung für Raps in Deutschland nach Angaben der BLE 0,266 Mio. ha. Unter Anrechnung der Koppelprodukte (Rapsschrot und Glycerin) reduziert sich der Wert um 42 % auf 0,156 Mio. ha. Folglich werden 58 % der ökologischen Auswirkungen, etwa durch Flächennutzung des Rapsackers, des Düngemiteleinsetzes oder der Energieverbräuche, dem Raps-Biokraftstoff zugerechnet.

Die Allokation der Koppelprodukte ist ein rein rechnerisches Konstrukt. In der Realität wird selbstverständlich die gesamte Fläche benötigt, um beispielsweise sowohl Rapsöl als auch Rapsschrot zu erzeugen. Die Ergebnisse dieser Studie werden sowohl mit als auch ohne Allokation ausgewiesen.

Tabelle 5: Übersicht über die Allokationsfaktoren der zu analysierenden Feldfrüchte

	Allokationsfaktor 1. Prozessschritt	Allokationsfaktor 2. Prozessschritt	Allokationsfaktor Für Transport
Für Biodiesel			
Raps	58,6%	95,7%	92,1%
Sonnenblume	62,9%	95,7%	92,1%
Ölpalmfruchtstände	91,0%	95,7%	96,0%
Soja	33,4%	95,7%	35,0%
Für Bioethanol			
Getreide	59,5%	59,5%	79,5%
Zuckerrübe	71,3%	71,3%	88,0%
Zuckerrohr	100,0%	100,0%	100,0%

Quelle: BioGrace

1. Prozessschritt bei Biodiesel = Ölmühle, 2. Prozessschritt bei Biodiesel = Umesterung; Transport wurde gemittelt über alle Zwischentransporte

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Flächenbelegung durch den Anbau für Agrokraftstoffe

Für eine differenzierte Bewertung der ökologischen Auswirkungen der gewählten Agrokraftstoffpfade ist eine Abschätzung der durch den Anbau der Biomasse belegten Fläche grundlegend. Diese beträgt für die in Deutschland in 2022 eingesetzten Biokraftstoffe insgesamt 968.000 ha, unter Abzug der den Koppelprodukten anzurechnenden Fläche (siehe Kapitel 2.3.5) verbleiben 551.000 ha. Die allozierte Fläche entspricht gut dem Doppelten des Saarlandes. Hohe Anteile der Flächenbelegungen sind dem Getreideanbau, dem Rapsanbau und zu gleichen Teilen Soja (in Süd- und Mittelamerika) und Ölpalme (in Südostasien) zuzurechnen, wie aus Abbildung 3 hervorgeht.

Nur 11 % der Fläche befinden sich in Deutschland. Mit 46 % liegt der größte Anteil in anderen EU-Mitgliedsstaaten. 10 % der Fläche liegen in Europa außerhalb der EU (v.a. die Ukraine), 9 % in Asien, 13 % in Süd- oder Mittelamerika und 10 % in Australien.

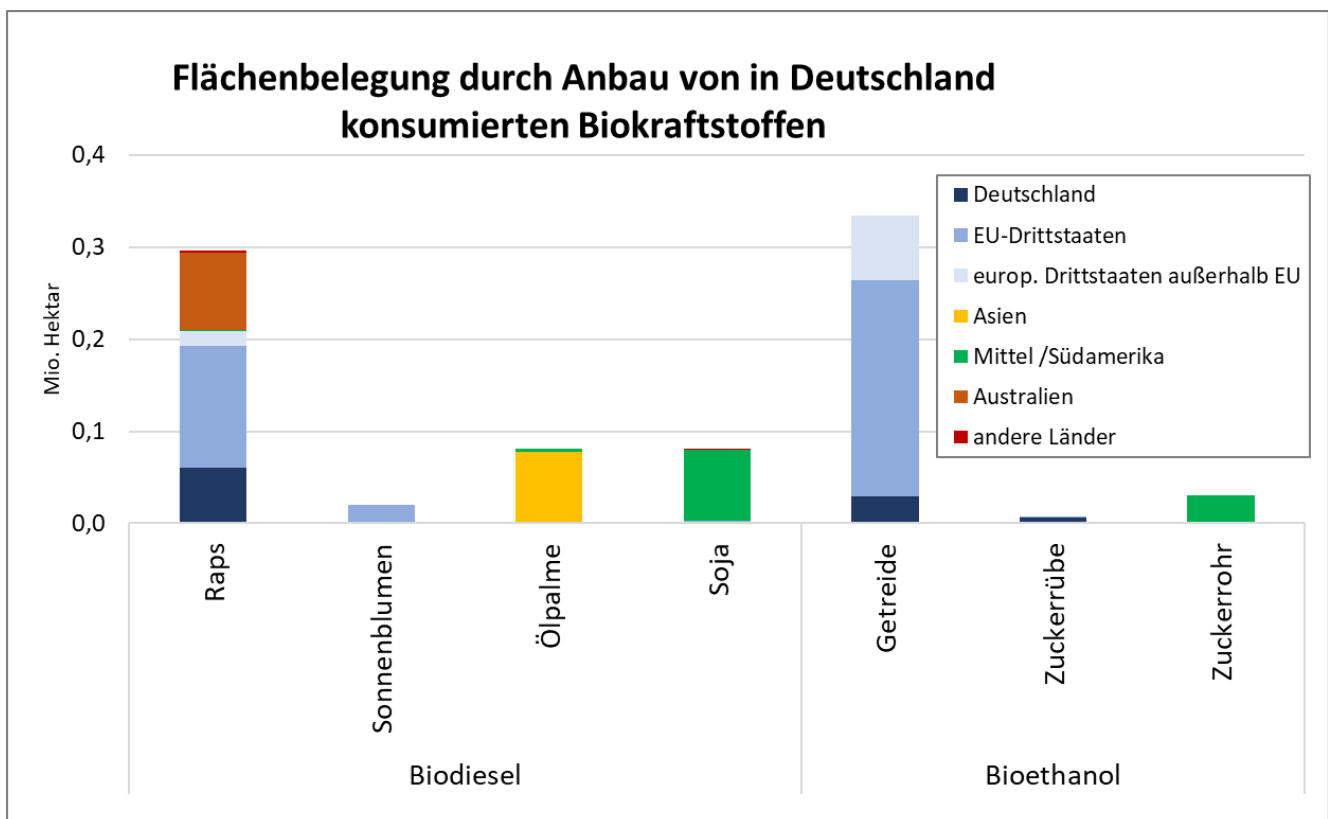


Abbildung 3: Flächenbelegung der in Deutschland in 2022 eingesetzten Anbau-Biokraftstoffe; durch Allokation sind die Flächenanteile für die Koppelprodukte hier abgezogen (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))

3.2 Eintrag von Stickstoff und Phosphor

Die Bewertung des Einsatzes von Düngemitteln zur Produktion von Agrokraftstoffen erfolgt mittels Budgets, die anhand des Konzepts der planetaren Grenzen abgeleitet werden. Die pro-Kopf-Budgets werden wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben mit 10 kg Stickstoff und 1,2 kg Phosphor pro Einwohner und Kopf angesetzt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Danach schöpfen die Düngemittel, die für die Produktion der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe eingesetzt werden, jeweils zu etwa einem Viertel die Budgets aus. Setzt man die Allokation an und zieht Anteile für die Koppelprodukte ab, verbleiben noch immer um die 15 % Ausschöpfung dieser planetaren Grenzen allein durch die Agrokraftstoffe.

Tabelle 6: Eingesetzte Mengen an Stickstoff (N) und Phosphor (P) durch die Produktion von Agrokraftstoffen im Vergleich zu den Budgets nach den planetaren Grenzen

	Einsatz N-Dünger (t N pro Jahr)		Einsatz P-Dünger (t P pro Jahr)	
	Ohne Allokation	Mit Allokation	Ohne Allokation	Mit Allokation
Für Biodiesel				
Raps	101.230	59.310	7.448	4.363
Sonnenblume	3.791	2.386	414	260
Ölpalmfruchtstände	7.122	6.484	1.156	1.053
Soja	964	322	2.682	896
Für Bioethanol				
Getreide	112.353	66.863	11.871	7.065
Zuckerrübe	1.460	1.041	513	160
Zuckerrohr	2.187	2.187	489	489
Summe	229.107	138.593	54.671	14.286
Budget nach planetaren Grenzen für DE mit 83,3 Mio. Einwohnern	833.000		100.000	
Prozentanteil am Budget	27,5%	16,6%	24,3%	14,3%

Fazit

Der gezielte Einsatz von Stickstoff und Phosphor als Düngemittel ist wichtiger Bestandteil der Produktion von ausreichend Nahrung sowie anderen Biomasseprodukten zur stofflichen Nutzung. Rund ein Viertel des planetar verträglichen Budgets Deutschlands für die Produktion von Agrokraftstoffen zu verwenden, ist ein gravierender Beitrag zum Überschreiten dieser planetaren Grenzen.

Die planetaren Grenzen für die biogeochemischen Phosphor- und Stickstoff-Flüsse sind global bereits bei weitem überschritten. Umso dringlicher ist es, hier eine massive Reduktion zu erwirken. Ein Stopp der Nutzung von Agrokraftstoffen kann somit einen erheblichen Beitrag auf dem Weg zur Einhaltung dieser planetaren Grenze bewirken.

3.3 Eintrag von Pestiziden

3.3.1 Grundsätzliche Bewertung der eingesetzten Pestizide

Pestizide können nach ihrem Anwendungsgebiet in Pflanzenschutzmittel und Biozide unterteilt werden. Des Weiteren können sie jeweils nach ihren Zielorganismen in Insektizide, Herbizide, Bakterizide, Molluskizide, Rodentizide und Fungizide u.a. unterschieden werden.

Im Anhang ist eine Liste an Fungiziden (Tabelle 11), Insektiziden (Tabelle 12) und Herbiziden (Tabelle 13) zu finden, die schwerpunktmäßig für die in Deutschland angebauten Energiepflanzen (Raps, Mais, Weizen, Roggen und Zuckerrüben) verwendet werden. Diese ist aufgrund des Einsatzes von vielen unterschiedlichen Wirkstoffen in diversen Präparaten (teilweise in Kombinationen) nicht vollständig und kann nicht zur Quantifizierung herangezogen werden. In den oben genannten Tabellen sind Angaben zu Wirkmechanismen und Gefahrenhinweise nach GESTIS-Stoffdatenbank zu finden. Im Falle einer nachweislichen und anerkannten Karzinogenität finden sich Anmerkungen dazu.

Da annähernd 50 % des in Deutschland getankten Biodiesels (Energie) aus Raps gewonnen wird, wird im Folgenden exemplarisch auf Pflanzenschutzmittel für Raps, deren Toxizität, Halbwertszeit und Mobilität¹ eingegangen.

Winterraps zählt allgemein zu den wichtigsten Feldkulturen in Deutschland und belegt etwa 10 % der Ackerfläche. Da sich eine mechanische Unkrautbekämpfung (z.B. Striegeln und Hacken) in der konventionellen Landwirtschaft nicht durchsetzen konnte, wird Unkraut mit angestrebtem Wirkungsgrad von > 95 % mit dem Einsatz von Herbiziden bekämpft. Der Wirkstoff Metazachlor zählt dabei zu den am häufigsten verwendeten (auf 90 % der Rapsanbaufläche in Deutschland) und wird oft in Wirkstoffkombination (mit Dimethenamid oder/und Quinmerac) benutzt. Metazachlor zählt zu den α -Chloracetamiden und wird als sogenanntes Vorlaufherbizid zur Unkrautbekämpfung eingesetzt. Metazachlor hat ungünstige Eigenschaften hinsichtlich potenzieller Gewässerbelastung (Wasserlöslichkeit liegt bei 430 mg/l (bei 20 °C), gebildete Metaboliten können ebenfalls zu Gewässerbelastung führen).²

Ein großer Anteil des Agrodiesels, der 2022 in Deutschland getankt wurde, stammte aus Ölpalmen, die hauptsächlich in Asien und zu einem kleineren Teil auch in Süd-/Mittelamerika zu diesem Zweck angebaut werden. Beim Anbau von Ölpalmen werden hauptsächlich Paraquat und zunehmend auch Glyphosat als Pestizid verwendet. In vielen Ländern ruht die Zulassung von Paraquat aufgrund seiner hohen Humantoxizität (so auch in Deutschland).³ In 100 Ländern ist es allerdings zugelassen, darunter in vielen Entwicklungsländern, aber auch in Industrienationen wie USA, Japan und Kanada.

¹ Das bedeutet, wie leicht die Wirkstoffe in Grund- oder Oberflächengewässer gelangen; Fachbegriff: Wassergängigkeit.

² Nach den Gefahrenhinweisen (Hazard statements) des Globally Harmonized Systems (GHS) gilt **Metazachlor** als *gesundheitsschädlich bei Verschlucken* (H302) *kann allergische Hautreaktionen verursachen* (H317), *kann vermutlich Krebs erzeugen* (H351) und ist sehr *giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung* (H410)); <https://unece.org/ghs-rev8-2019>

Siehe auch GESTIS-Stoffdatenbank <https://gestis.dguv.de/data?name=491691>

³ Nach den Gefahrenhinweisen (Hazard statements) des Globally Harmonized Systems (GHS) gilt **Paraquat** als *giftig bei Verschlucken* (H301), *giftig bei Hautkontakt* (H311), *Lebensgefahr bei Einatmen* (H330), *verursacht Hautreizungen* (H315), *verursacht Augenreizungen* (H319), *kann die Atemwege reizen* (H335), *schädigt die Organe bei längerer oder wiederholter Exposition* (H372), *sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung* (H410)); <https://unece.org/ghs-rev8-2019>

Siehe auch GESTIS-Stoffdatenbank <https://gestis.dguv.de/data?name=491691>

3.3.2 Beurteilung anhand des Montreal-Ziels

Zunächst wird der Pestizideintrag durch Produktion der Agrokraftstoffe anhand des Montreal-Ziels eingeordnet. Dieses sieht eine Halbierung der Risiken durch verwendete Pestizide durch die Unterzeichnerstaaten vor, was beispielsweise durch die Halbierung der Menge an Pestiziden realisiert werden könnte (CBD 2023).

Die weltweit ausgebrachte Pestizidmenge beläuft sich auf etwa 4 Mio. t jährlich (Chemnitz et al. 2022). Dies entspricht etwa 0,5 kg Pestizid pro Erdbewohner*in und einem dementsprechenden Budget in Deutschland von 41.900 t. Um das Ziel des Montreal Abkommens zu erreichen würde die Menge um 50 % auf 20.950 t reduziert werden müssen.

Die Menge an Pestiziden, die weltweit für den Anbau von Energiepflanzen zur Herstellung von in Deutschland getankten Agrosprits verwendet wird, errechnet sich wie in Tabelle 7 aufgeführt auf 9.990 t ohne Allokation der Koppelprodukte und 7.360 t mit Allokation. Dies entspricht 23,8 % bzw. 17,6 % der Deutschland zugerechneten Pestizidmenge von 41.900 t. Der Verzicht auf Agrosprit in Deutschland kann daher ein erheblicher Schritt zur Erreichung der Ziele von Montreal sein.

Tabelle 7: Eingesetzte Mengen an Pestizidwirkstoffen durch die Produktion von Agrokraftstoffen im Vergleich zu den Budgets nach dem Montreal-Ziel

	Einsatz Pestizide (t Wirkstoff pro Jahr)	
	Ohne Allokation	Mit Allokation
Für Biodiesel		
Raps	3.341	1.957
Sonnenblume	63	40
Ölpalmfruchtstände	4.831	4.399
Soja	554	185
Für Bioethanol		
Getreide	1.011	602
Zuckerrübe	23	17
Zuckerohr	164	164
Summe	9.987	7.363
Budget, das es nach Montreal-Ziel zu halbieren gilt	41.900 t	
Prozentanteil am Budget	23,8%	17,6%

3.3.3 Das „kritische Wasservolumen“

Zur weiteren Bewertung wird das mit den jährlich eingesetzten Pestizidwirkstoffen verbundene „kritische Wasservolumen“ ermittelt. Darunter ist die Menge Wasser zu verstehen, die es theoretisch braucht, um bei einem Eintrag der eingesetzten Pestizide unterhalb des Grenzwerts für eine Unbedenklichkeit (0,5 µg Wirkstoff pro Liter) zu bleiben.

Diese Art der Toxizitätsbetrachtung dient dazu, das toxische Potenzial der ausgebrachten Pestizidmenge zu veranschaulichen und die zusätzliche Belastung der Umwelt darzustellen.

Es soll keinesfalls suggeriert werden, dass eine solche „Verdünnung“ tatsächlich möglich wäre und das Problem der toxischen Belastung lösen würde.

Das kritische Wasservolumen der einzelnen Agrokraftstoffe wird in Abbildung 4 in Liter Wasser pro Liter Agrokraftstoff dargestellt. Es beläuft sich für einen Liter Biodiesel aus Rapsöl auf 6,1 Mio. Liter Wasser. Für einen Liter Palmöl beträgt das kritische Wasservolumen sogar 22,4 Mio. Liter. Dabei handelt es sich um die allozierten Mengen. Ohne Allokation liegen die kritischen Wasservolumina nochmals höher (eine grafische Darstellung (Abbildung 9) ist im Anhang enthalten).

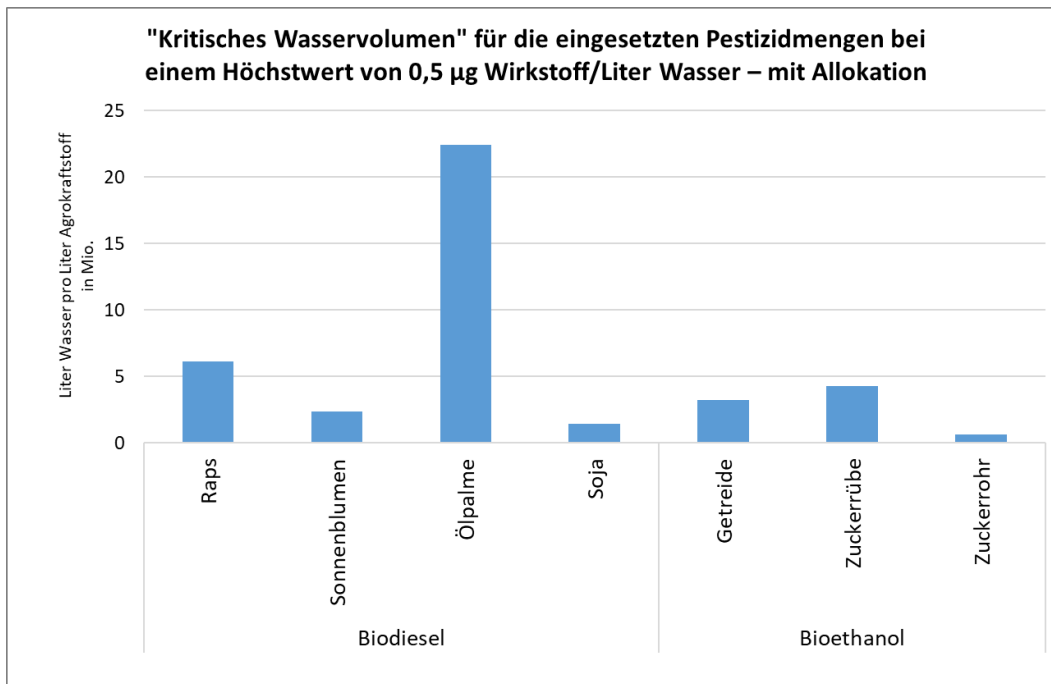


Abbildung 4 „Kritisches Wasservolumen“, das benötigt wird, um eine Pestizidkonzentration von 0,5 µg/L zu unterschreiten, jeweils für einen Liter Agrokraftstoff - alloziert (Quelle: Berechnungen ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))

Abbildung 4 macht zudem deutlich, dass besonders der zur Biodieselproduktion angebaute Raps durch die schiere Menge (etwa ein Drittel der belegten Anbaufläche/ Abbildung 3) und die Ölpalme durch den hohen Einsatz von Pestiziden (54 kg Wirkstoff/(ha*a) /Tabelle 3) zu einer hohen zusätzlichen Belastung führen. Dabei werden Metazachlor (Raps) und Paraquat (Ölpalme) aus Umweltperspektive als besonders problematische einzuschätzende Pestizide (siehe oben) behandelt.

Das kritische Wasservolumen, das mit der ausgebrachten gesamten Pestizidmenge (weltweit etwa 7.400 t Wirkstoff) für die in Deutschland eingesetzten Agrokraftstoffe verbunden ist, errechnet sich auf 3.130 km³ – mit Allokation der Koppelprodukte. Das entspricht 14,5 % des Volumens der Ostsee oder dem 65-Fachen des Bodensees. Ohne Allokation erhält man rechnerisch ein kritisches Gesamtvolumen von 4.660 km³.

Fazit

Mit Blick auf das Montreal-Ziel (Halbierung der Risiken durch eingesetzte Pestizide) würde ein Unterlassen des Anbaus für in Deutschland angerechnete Agrokraftstoffe zu einer Reduktion von etwa 18 % des Budgets für Deutschland führen und somit erheblich zur Erreichung der Ziele von Montreal beitragen.

Es zeigt sich, dass die größte zusätzliche Belastung durch Pestizide beim Anbau von Palmöl und Raps entstehen: Beide Feldfrüchte werden mit toxikologisch problematisch einzuschätzenden Pestiziden geschützt. Da Palmöl weiterhin hauptsächlich mit dem in der EU verbotenen Pestizid Paraquat geschützt wird, werden direkte Umwelteinwirkungen, -belastungen und -risiken in andere Teile der Welt (hauptsächlich Asien) ausgelagert. Wird das Palmöl im Tank zukünftig durch Kraftstoffe aus anderen Pflanzenölen ersetzt, wird das Problem lediglich verlagert, nicht aber gelöst.

3.4 Bewertung der Auswirkungen auf die Biodiversität

Für die Bewertung der Auswirkungen der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe auf die Biodiversität wurde der Indikator PDF (*potentially disappearing fraction of species*) berechnet. Die Basis hierfür bilden die Flächenbelegungen differenziert nach Anbauland und die Charakterisierungsfaktoren nach (Chaudhary und Brooks 2018).

Durch das in Kapitel 2.3.3 beschriebene mehrstufige Verfahren wurden Herkunftsländer der Biokraftstoffe identifiziert und festgelegt. Diese Differenzierung ist dem Anhang (Tabelle 9) zu entnehmen. In Abbildung 5 ist dargestellt, wie stark die Faktoren der Auswirkung auf Biodiversität nach Art der Feldfrucht und Anbauland spreizen. Dabei wird deutlich, dass die globalen Auswirkungen sich zwischen den Ausgangsrohstoffen der Agrokraftstoffe, d.h. den Energiepflanzen und zwischen den Anbauländern unterscheiden. Der höchste Faktor ergibt sich hier für Raps aus Chile, was für den deutschen Kraftstoffmarkt jedoch nur eine minimale Rolle spielt. Hoch sind jedoch auch die spezifischen Faktoren für andere Feldfrüchte tropischer oder subtropischer Herkunft. Geringer sind die Faktoren für die europäische Produktion.

Für Abbildung 6 werden die spezifischen Faktoren mit den in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffmengen verrechnet. Darin ist der PDF, welcher den potenziellen globalen Artenverlust (aggregiert über die zugrunde gelegten Taxa) in Bezug auf die Anbauflächen abbildet, differenziert nach Energiepflanze und Herkunftsland dargestellt. Diese Abbildung zeigt somit die potenziellen globalen Auswirkungen der Gesamtmenge der in Deutschland 2022 verbrauchten Agrokraftstoffe auf die Biodiversität.

Zum einen ist erkennbar, dass insbesondere der Ölpalmenanbau für die Bereitstellung von Biodiesel zu großen globalen Artenverlusten führt. Die größten globalen Artenverluste liegen somit in Indonesien. Doch auch in Peru werden durch den Zuckerrohranbau, in Osteuropa durch den Getreideanbau, in Brasilien durch den Sojaanbau sowie in Australien durch den Rapsanbau große globale Auswirkungen auf die Biodiversität ausgelöst. Die in PDF ausgedrückten Ergebnisse bestimmen sich durch die Flächengröße und den Charakterisierungsfaktor. Der hohe PDF für Osteuropa (Polen, Ukraine) ist dabei auf die großen Anbauflächen zurückzuführen, während in Indonesien und Mittelamerika (v.a. Honduras) der hohe PDF auf den hohen Charakterisierungsfaktor zurückgeht.

Insgesamt liegt das Ergebnis für die in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe bei einem PDF von 0,17 pro Jahr. Dies könnte interpretiert werden, als würde potenziell nach fünf bis sechs Jahren Produktion eine Art verloren gehen. Diese Quantität ist jedoch nicht ausreichend aussagekräftig, da sich das PDF-Modell nur auf wenige taxonomische Gruppen beschränkt.

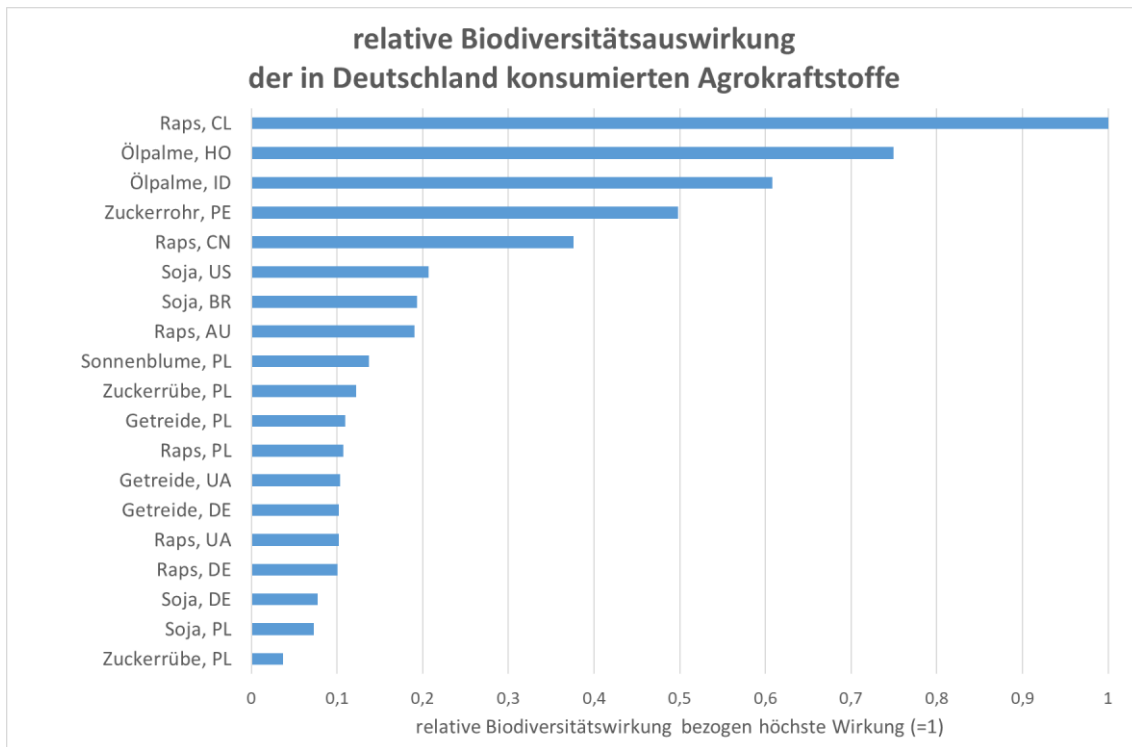


Abbildung 5: Relative Biodiversitätsauswirkung der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe bezogen auf den Pfad mit der höchsten spezifischen Auswirkung (= 1).
 AU: Australien, BR: Brasilien, CL: Chile, CN: China, DE: Deutschland, HO: Honduras, ID: Indonesien, PE: Peru, PL: Polen, UA: Ukraine, US: USA

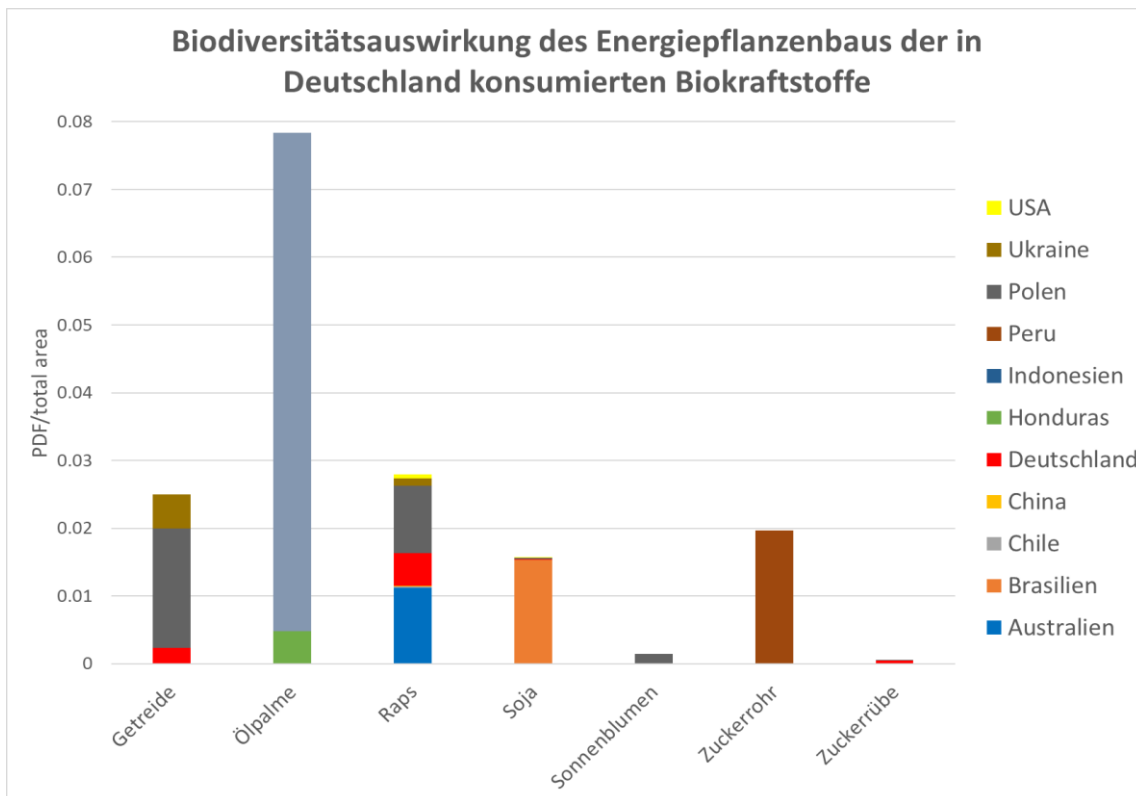


Abbildung 6 Auswirkung des Anbaus von Energiepflanzen für in Deutschland konsumierte Biokraftstoffe auf die Biodiversität.

Die dargestellten Werte beinhalten bereits die Allokation der Nebenprodukte. Ohne diesen Abzug würde der Gesamt-PDF der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe bei 0,24 pro Jahr liegen.

Weitere Umrechnungen der Biodiversitätswirkung i) differenziert nach Rohstoff bezogen auf 1 l und ii) als Mittel der Rohstoffe unterteilt nach Diesel und Ethanol bezogen auf 1 PJ und iii) als Mittel der Rohstoffe unterteilt nach Diesel und Ethanol bezogen auf 1 l sind dem Anhang zu entnehmen.

Fazit

Die Auswirkung von Biokraftstoffen auf die Biodiversität wurde anhand des Indikators PDF (potentially disappearing fraction of species) dargestellt. Dieser Indikator bildet den globalen Artenverlust ab, der durch eine regionale Landnutzung, in diesem Fall Energiepflanzenanbau, in unterschiedlichen Herkunftsländern, verursacht wird. Der Indikator entspricht nicht realen Artenzahlen, sondern sogenannten Artenäquivalenten und dient dem Vergleich von Biodiversitätsauswirkungen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass große globale Auswirkungen auf die Biodiversität auf die Produktion vor allem durch Palmöl, aber auch auf Raps, Getreide, Zuckerrohr und Soja in unterschiedlichen Regionen zurückzuführen sind. Das bedeutet, der Konsum von Agrokraftstoffen in Deutschland geht nicht nur mit einer hohen Flächenbelegung in Deutschland und zahlreichen anderen Ländern einher, sondern führt zu globalen Artenverlusten aufgrund des Energiepflanzenbaus in mehreren Ländern.

Die globalen Artenverluste steigen mit zunehmender Flächenbelegung und durch den Anbau in besonders artenreichen Ökoregionen. Folglich bestimmen die beiden Faktoren Flächengröße und spezifischer Charakterisierungsfaktor das Endergebnis.

Unsicherheiten in den Ergebnissen gründen vor allem in der Zuweisung zu konkreten Anbauländern. Aufgrund der Tatsache, dass eine derart detaillierte Differenzierung nach Anbauländern dem jüngsten BLE-Bericht nicht entnommen werden konnte, mussten Annahmen getroffen werden. Um eine möglichst hohe Genauigkeit gewährleisten zu können, wurde für die Zuweisung zu Herkunftsländern ein eigenes Zuweisungsverfahren entwickelt, welches die bestmögliche Genauigkeit bei höchster Transparenz ermöglichen soll.

3.5 Einsatz fossiler Energien

Zunächst werden für jeden einzelnen Agrokraftstoff die spezifischen Primärenergieverbräuche ermittelt. In Tabelle 8 werden die Summen in den Einheiten MJ fossiler Rohstoff pro MJ Agrokraftstoff und MJ fossiler Rohstoff pro Liter Agrokraftstoff, ohne Allokation und mit Allokation abgebildet. Abbildung 7 schlüsselt auf, wie viel Energie in den einzelnen Prozessschritten zur Erzeugung von Agrokraftstoff benötigt wird. Mit der Einheit MJ pro MJ lässt sich die Energieeffizienz der einzelnen Produktionspfade gut erkennen. Es zeigt sich, dass zwischen 0,45 MJ/MJ (Biodiesel auf Basis Ölpalme) und 1,17 MJ/MJ (Bioethanol auf Basis Getreide) aufgewendet werden müssen. Dabei ist die Einheit in MJ/MJ so zu verstehen, dass man zur Bereitstellung pro im Kraftstoff gespeicherter Menge Energie (MJ) eine Menge x MJ an verschiedenen Primärenergiequellen¹ benötigt. Ist dieser Wert größer als 1, so nimmt die Produktion dieses Kraftstoffs eine größere Menge Primärenergie in Anspruch, als letztlich in ihm selbst gespeichert ist.

¹ Beispielsweise in der Form von Erdgas, Rohöl, Kohle, Uran, aber auch erneuerbarer Quellen

Zum Vergleich: Fossile Kraftstoffe beanspruchen Primärenergieressourcen in Höhe von 1,18 MJ/MJ, und liegen somit in derselben Größenordnung wie Bioethanol aus Getreide und rund 2,5-fach so hoch wie Palmöl-Biodiesel. Auch die relativen Anteile der Primärenergieverbräuche unterscheiden sich deutlich.

Durch Allokation der Nebenprodukte reduzieren sich die Aufwendungen: die Bandbreite liegt dann zwischen 0,4 MJ/MJ (Biodiesel auf Basis von Soja) und 0,78 MJ/MJ (Bioethanol auf Basis von Zuckerrohr).

Tabelle 8: Zusammenstellung der Ergebnisse zum Primärenergieverbrauch von Agrokraftstoffen in den Einheiten MJ pro MJ, ohne Allokation und mit Allokation

Kraftstoffart	Anbaufrucht	Ohne Allokation MJ/MJ	Mit Allokation MJ/MJ
Biodiesel/HVO	Mittelwert	0,630	0,448
	Raps	0,673	0,481
	Sonnenblumen	0,598	0,453
	Ölpalme	0,448	0,421
	Soja	0,801	0,402
Ethanol	Mittelwert	1,108	0,709
	Getreide	1,168	0,701
	Zuckerrübe	0,773	0,556
	Zuckerrohr	0,777	0,777

Wie Abbildung 7 zeigt, wird der Primärenergieverbrauch der Bioethanolfade dominiert von der Dampferzeugung. Diese dient im Wesentlichen zur Versorgung der energieintensiven Destillationsvorgänge. Auch hinsichtlich des Beitrages von Strom unterscheiden sich Diesel und Ethanol, mit höheren Beiträgen bei der Herstellung von Agroethanol und vergleichsweise niedrigeren Aufwendungen im Falle der ausgewählten Agrodieselvarianten. Letztere werden wiederum stärker geprägt vom Einsatz der Betriebsmittel, im vorliegenden Fall v.a. N-Dünger und Methanol (MetOH), welches zur Umesterung der Pflanzenöle benötigt wird.

Eine maßgebliche Rolle spielen im Weiteren die verschiedenen Allokationsschritte der Prozessketten. Die in Tabelle 8 aufgeführten Werte beinhalten Zurechnungswerte, wie sie für THG-Bilanz nach RED durchzuführen sind.¹ Diese sind in gleicher Weise auf die Primärenergieverbräuche anzuwenden. In Abbildung 7 sind die dargestellten Ergebnisse der Agrokraftstoffpfade ohne Allokation dargestellt.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Frage, aus welchen Quellen die Primärenergie stammt. Grundsätzlich interessiert hier der Anteil an fossilen bzw. nicht erneuerbaren Rohstoffquellen. Verschiedene Produktionswege bzw. Teile der Produktionskette ermöglichen jedoch den Einsatz von erneuerbaren Quellen, insbesondere Nebenprodukte aus der eigenen Verarbeitung. Dies ist z.B. bei Zuckerrohrethanol aus den hochentwickelten Produktionsgebieten im brasilianischen Staat Sao Paulo der Fall.² Nach Deutschland importiertes Zuckerrohrethanol stammt jedoch überwiegend aus Peru. Über die Energieversorgung der Anlagen dort ist wenig bekannt. Ein anderes Beispiel sind die Palmölmühlen in Indonesien und Ma-

¹ Allokationsfaktoren entnommen aus BioGrace

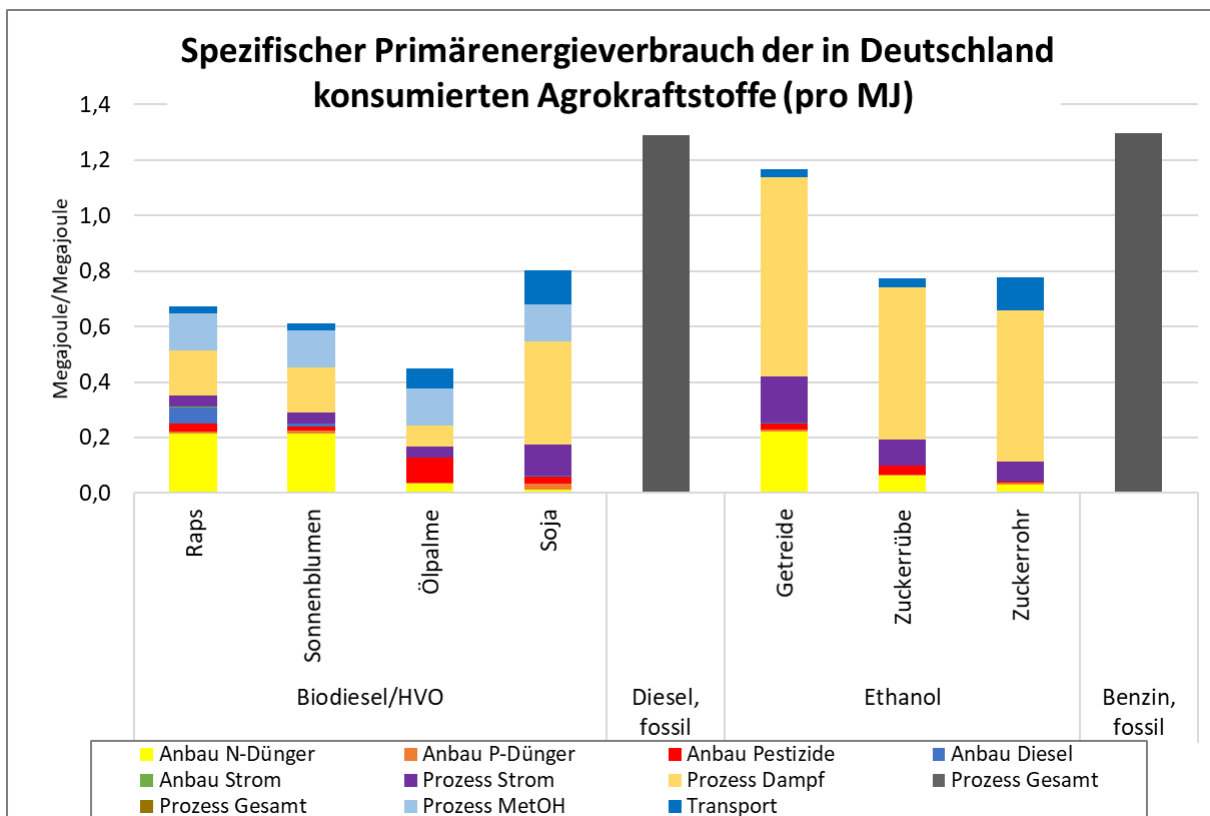
² Hier wird der Produktionsreststoff Bagasse als Energieträger der Zuckerfabriken und Ethanolanlagen verwendet.

laysia, die ebenfalls Ernterückstände (die entrappten holzigen Fruchtstände) als Energiequelle einsetzen. Außerdem besteht auch für Anlagen, die über keine Biomasse aus eigener Produktionskette verfügen, die Möglichkeit für die Energieversorgung, Biomasse oder andere erneuerbare Energiequellen einzukaufen. Es wäre daher korrekt, für diese Fälle keinen Verbrauch an nicht-erneuerbaren Energieträgern anzurechnen. Auf der anderen Seite kann das Energiepotenzial dieser (Rest-)Biomassen auch zu anderen Zwecken genutzt werden: Werden sie nicht für den Strom- oder Dampfbedarf einer Biokraftstoffanlage verwendet, könnten sie für den allgemeinen Bedarf oder anderweitig in der Industrie genutzt werden. Daher wird es als korrekt angesehen, den Primärenergieverbrauch entlang der Produktionspfade als vollständig fossil anzunehmen.

Was die Transporte betrifft, so sei angemerkt, dass hier die Standardwerte aus der RED verwendet werden, die für Raps und Getreide kurze regionale Lieferstrecken unterstellen. Die Verbräuche hier sind somit teilweise unterschätzt, da die langen Distanzen für Raps aus Australien und Getreide aus der EU sowie aus der Ukraine nicht in dem Maße berücksichtigt sind.

In Abbildung 7 wird der Energiebedarf zur Herstellung von Agrokraftstoffen zunächst unterteilt nach Energie, die verbraucht wird beim Anbau der Rohstoffe, beim Prozess der Kraftstoffherzeugung sowie beim Transport des Rohstoffs bis hin zum fertigen Kraftstoff zur Tankstelle. Strom wird sowohl im Bereich „Anbau“ (für Trocknung und Reinigung des Ernteguts) und „Prozess“ (Möhlen und viele Prozesse bei der Verarbeitung) eingesetzt. „Dampf“ wird ebenfalls bei der Verarbeitung benötigt, v.a. bei der Destillation von Ethanol auf absoluten Alkohol, wie auch bei der Raffination von Pflanzenöl.

Unter „Transport“ sind alle Vorgänge von der Lieferung der Feldfrüchte zur Verarbeitung ggf. zwischen verschiedenen Verarbeitungsschritten sowie am Ende bis zur Tankstelle enthalten.



In der für die Berechnung verwendeten Datengrundlage der Standardwerte der RED III sind für einige Agrokraftstoffe die Transportdistanzen unterschätzt. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, kommen große Anteile von Raps aus Übersee und Getreide aus der Ukraine. Mit einer standardmäßigen Transportdistanz von 50 km vom Acker bis zur Verarbeitung stellen diese Standardwerte für diese Herkünfte eine erhebliche Überschätzung dar.

4 Zusammenfassung

Die vorliegende Kurzstudie diskutiert und bewertet verschiedene Aspekte ökologischer Auswirkungen durch den Einsatz von Agrokraftstoffen auf dem deutschen Kraftstoffmarkt. Die ausgewählten Indikatoren für eine Wirkung (Umweltwirkungspotenziale) der jeweiligen Kraftstoffe spiegeln typische, wesentliche und im Kontext relevante Umweltwirkungen wider, welche mit diesen Kraftstoffen einhergehen. Im Fokus dabei stehen:

1. Stickstoff- und Phosphoreintrag,
2. Pestizideinsatz,
3. Biodiversitätsauswirkungen,
4. Verbrauch fossiler bzw. nicht-erneuerbarer Rohstoffe (Primärenergieverbrauch).

Die Bewertung von **Stickstoff- und Phosphorstromeinträgen** erfolgt anhand des Konzepts der planetaren Grenzen, und beantwortet die Frage, welcher Anteil des gesamtdeutschen Budgets durch den Anbau der Agrokraftstoffe in Anspruch genommen wird. Die Produktion der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe im Jahr 2022 beansprucht das Budget Deutschlands zu jeweils etwa einem Viertel: 27,5 % im Fall von Stickstoffdünger und 24,3 % im Fall von Phosphor.

Die eingesetzte **Pestizidmenge** wird auf zweierlei Arten bewertet: Einerseits wird der Pestizideinsatz anhand der Ziele des Montreal-Protokolls bewertet. Diese sieht für Deutschland eine Halbierung des Pestizideinsatzes vor. Auf diese Weise wird herausgearbeitet, in welchem Maße ein Phase-Out der gewählten Agrokraftstoffe zur Erreichung des Montreal-Ziels leisten könnte. Unter Annahme eines global einheitlichen pro-Kopf Budgets für den Einsatz von Pestiziden ergibt sich für die Bundesrepublik Deutschland ein Gesamtbudget von 41.900 t Pestiziden. Dieses wird durch den Anbau von Energiepflanzen zur Herstellung von Agrokraftstoffen mit einem Pestizideinsatz von 9.990 t zu 23,8 % belastet. Ein Phase-out der Agrokraftstoffe könnte somit erheblich zum Einhalten der Ziele von Montreal hinsichtlich der Pestizideinsätze beitragen (47,6 %). Außerdem wird berechnet, wie groß ein „kritisches Wasservolumen“ sein muss, damit diese Pestizidmenge in einer gesundheitlich unbedenklichen Konzentration bleibt. Als Grenzwert dafür wird die geltende Grundwasserqualitätsnorm gemäß Richtlinie 2006/118/EG herangezogen (max. Konzentration von Pestiziden und deren Metaboliten jeweils 0,1 µg/l und in Summe maximal 0,5 µg/l). Dieses Wasservolumen beträgt 3,13 Billionen Kubikmeter. Das entspricht 14,5 % des Volumens der Ostsee.

Zur Evaluation der Auswirkungen von Anbau und Produktion der gewählten Agrokraftstoffe auf die **Biodiversität** wird der Indikator „*Potential disappeared fraction of species*“ (PDF) nach Chaudhary und Brooks (2018) angewandt. Dieser quantifiziert potenzielle aggregierte globale Artenverluste, verursacht durch die Flächeninanspruchnahme in den Anbauländern. Die ausgewählten Agrokraftstoffe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer potenziellen Artenverluste teils deutlich und sind nicht einheitlich. In der Summe erreichen sie einen PDF-Wert von 0,24. Diese Zahl gibt eine Orientierung für den potenziellen Verlust von Arten für jedes Jahr des Anbaus. Der tatsächliche Artenverlust ist höher, da in dem Modell für den PDF u.a. die große Gruppe der Insekten gar nicht berücksichtigt ist.

Abschließend wird der **Primärenergieverbrauch** der Agrokraftstoffauswahl analysiert. Hierzu werden die individuellen Primärenergieaufwände der gewählten Agrokraftstoffe

quantifiziert und fossilem Dieselkraftstoff gegenübergestellt. Hinsichtlich des Primärenergieverbrauchs der einzelnen Agrokraftstoffe zeigt sich eine Spannbreite von 0,45 MJ/MJ (Ölpalme, Biodiesel) bis 1,17 MJ/MJ (Getreide, Bioethanol). Dabei liegt fossiler Dieselkraftstoff mit 1,18 MJ/MJ in derselben Größenordnung wie Bioethanol auf Getreidebasis. Der gesamte Primärenergieverbrauch der ausgewählten Agrokraftstoffe im Jahr 2022 beträgt 60,9 PJ.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Konsum von Agrokraftstoffen in Deutschland mit erheblichen globalen Auswirkungen auf Umwelt und Ökosysteme einhergeht. So verursachen die ausgewählten Agrokraftstoffe erhebliche Stickstoff- und Phosphorverbräuche, welche zu einem substantiell reduzierten Restbudget zur Einhaltung planetarer Grenzen führt. Ein Phase-Out dieser Kraftstoffe würde das Erreichen des deutschen Montreal-Ziels beschleunigen. Der Anbau der Feldfrüchte für die ausgewählten Agrokraftstoffe führt zu potenziellen Artenrückgängen, verglichen mit der Entwicklung einer natürlichen Vegetation. Hinsichtlich der Inanspruchnahme von Primärenergieressourcen können Agrokraftstoffe zwar teils bis zu rund 50 % an Einsparungen gegenüber fossilen Kraftstoffen erzielen, benötigen in Summe aber dennoch eine substantielle Menge an fossilen Primärenergiequellen.

Literaturverzeichnis

- BLE (2024): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (28.04.2024).
- BMEL (2022): Erntebericht 2022 - Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ernte-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (28.04.2024).
- BMEL (2023): Erntebericht 2023 - Mengen und Preise. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/erntebericht-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (28.04.2024).
- BVL (2024): Berichte über Inlandsabsatz und Export von Pflanzenschutzmitteln. https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/03_PSMInlandsabsatzAusfuhr/psm_PSMInlandsabsatzAusfuhr_node.html. (29.04.2024).
- CBD (2023): Report of the Conference Of The Parties to the Convention on Biological Diversity on the second part of its fifteenth meeting. Montreal, Nairobi. <https://www.cbd.int/doc/c/f98d/390c/d25842dd39bd8dc3d7d2ae14/cop-15-17-en.pdf>.
- Chaudhary, A.; Brooks, T. M. (2018): Land use intensity-specific global characterization factors to assess product biodiversity footprints.
- Chemnitz, C.; Heinrich-Böll-Stiftung; Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hrsg.) (2022): Pestizidatlas: Daten und Fakten zu Giften in der Landwirtschaft. Heinrich-Böll-Stiftung, Berlin.
- Destatis (2023): Anbauflächen, Hektarerträge und Erntemengen ausgewählter Anbaukulturen im Zeitvergleich. In: *Statistisches Bundesamt*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/liste-feldfruechte-zeitreihe.html>. (11.01.2023).
- Dittrich, M.; Limberger, S.; Vogt, R.; Koepfner, B.; Leuser, L.; Schoer, K. (2021): Vorstudie zu Ansätzen und Konzepten zur Verknüpfung des „Planetaren Grenzen“ Konzepts mit der Inanspruchnahme von abiotischen Rohstoffen / Materialien. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-12_texte_51-2021_vorstudie_abiotische_rohstoffe_materiellen_0.pdf.
- European Commission (2018): Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (Text with EEA relevance.). European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=DE> (11.11.2021).
- Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-eingangsdaten-emissionsbilanzen> (29.04.2022).

- ifeu (2015): Biograce. <https://www.biograce.net/home>. (21.12.2021).
- IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://zenodo.org/record/3553579> (01.02.2022).
- Prussi, M.; Yugo, M.; de Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R.; Lonza, L. (2020): JEC Well-to-Tank report v5. European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036> (09.05.2022).
- Richardson, K.; Steffen, W.; Lucht, W.; Bendtsen, J.; Cornell, S. E.; Donges, J. F.; Drüke, M.; Fetzer, I.; Bala, G.; von Bloh, W.; Feulner, G.; Fiedler, S.; Gerten, D.; Gleeson, T.; Hofmann, M.; Huiskamp, W.; Kummu, M.; Mohan, C.; Nogués-Bravo, D.; Petri, S.; Porkka, M.; Rahmstorf, S.; Schaphoff, S.; Thonicke, K.; Tobian, A.; Virkki, V.; Wang-Erlandsson, L.; Weber, L.; Rockström, J. (2023): Earth beyond six of nine planetary boundaries. In: *Science Advances*. American Association for the Advancement of Science. Vol. 9, No. 37, S. eadh2458.

Anhang

Tabelle 9: Zuweisung der Anbauflächen zu Herkunftsländern.

Aus BLE (2024)			Eigene Zuweisung		Aus BLE (2024)
Biokraftstoff	Energiepflanze	Anbauregion	Anbauland (hauptproduzierendes Land)	Sicherheit der Zuweisung	Flächenbelegung [Mio. ha]
Biodiesel	Raps	Deutschland	Deutschland	hoch	0,061
Biodiesel	Raps	EU-Drittstaaten	Polen	medium	0,132
Biodiesel	Raps	europ. Drittstaaten außerhalb EU	Ukraine	medium	0,016
Biodiesel	Raps	Asien	China	geschätzt	0,000
Biodiesel	Raps	Mittel /Südamerika	Chile	geschätzt	0,000
Biodiesel	Raps	Australien	Australien	hoch	0,085
Biodiesel	Raps	andere Länder	USA	gering	0,002
Biodiesel	Sonnenblumen	EU-Drittstaaten	Polen	medium	0,020
Biodiesel	Ölpalme	Asien	Indonesien	medium	0,077
Biodiesel	Ölpalme	Mittel /Südamerika	Honduras	medium	0,004
Biodiesel	Soja	Deutschland	Deutschland	hoch	0,000
Biodiesel	Soja	EU-Drittstaaten	Polen	medium	0,003
Biodiesel	Soja	Mittel /Südamerika	Brasilien	gering	0,077
Biodiesel	Soja	andere Länder	USA	geschätzt	0,000
Bioethanol	Getreide	Deutschland	Deutschland	hoch	0,030
Bioethanol	Getreide	EU-Drittstaaten	Polen	medium	0,235
Bioethanol	Getreide	europ. Drittstaaten außerhalb EU	Ukraine	medium	0,070
Bioethanol	Zuckerrübe	Deutschland	Deutschland	hoch	0,006
Bioethanol	Zuckerrübe	EU-Drittstaaten	Polen	medium	0,000
Bioethanol	Zuckerrohr	Mittel /Südamerika	Peru	gering	0,031

Tabelle 10: Umrechnung der Biodiversitätswirkung auf andere Größen

Biodiversitätswirkung der:	Kommentar	PDF	Mittelwert	Getreide	Ölpalme	Raps	Soja	Sonnenblume	Zuckerrohr	Zuckerrübe
a) Gesamtmenge	Gesamtmenge der in Deutschland konsumierten Agrokraftstoffe [PDF]	0,17								
b) bezogen auf 1 PJ	Differenziert nach Rohstoff [PDF/PJ]			0,003	0,013	0,018	0,0053	0,0013	0,0048	0,0015
c) bezogen auf 1 l¹	Differenziert nach Rohstoff [PDF/l]			$6,3 \cdot 10^{-11}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$7,1 \cdot 10^{-10}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-10}$	$3,2 \cdot 10^{-11}$
d) als Mittel bezogen auf 1 PJ	Mittel der Rohstoffe unterteilt nach: Diesel [PDF/PJ]		0,0094							
	Ethanol [PDF/PJ]		0,0031							
e) als Mittel bezogen auf 1 l	Mittel der Rohstoffe unterteilt nach: Diesel [PDF/l]		$3,4 \cdot 10^{-10}$							
	Ethanol [PDF/l]		$6,5 \cdot 10^{-11}$							

¹ Umrechnung von PJ auf Liter erfolgt durch die Umrechnungsfaktoren aus der RED III: 34 MJ/l für Biodiesel und 21 MJ/l für Bioethanol.

Tabelle 11: In Deutschland eingesetzte Fungizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ <https://gestis.dguv.de/>)

Wirkstoff	Verwendet für	Wirkungsmechanismus	Gefahrenhinweise nach GESTIS	Anmerkung
Benzovindiflupyr	Gerste	Hemmung der Atmungskette am Komplex II: Succinat-Dehydrogenase (SDH-Inhibitor, SDHI)	H301 + H331-410	
Bixafen	Weizen, Gerste	siehe oben	H400	
Boscalid	Raps	siehe oben	H411	
Dimoxystrobin	Raps	siehe oben	H332-351-361d-410	kann vermutlich Krebs erzeugen, kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Fluopyram	Weizen, Gerste	siehe oben	H411	
Fluxapyroxad	Weizen	siehe oben	H351-362-410	kann vermutlich Krebs erzeugen, kann Säuglinge über Muttermilch schädigen
Mefentrifluconazole	Gerste	Hemmung der C14-Demethylase in der SterolBiosynthese, DeMethylierungs-Inhibitoren (DMI)	H317-411	
Metconazol	Raps, Weizen	siehe oben	H302-361d-411	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Prothioconazol	Weizen, Gerste	siehe oben	H410	
Pyraclostrobin	Gerste	Hemmung der Atmungskette am Komplex III: Quinone-ouster Inhibitor (Qol)	H331-315-410	
Tebuconazol	Raps	Hemmung der C14-Demethylase in der SterolBiosynthese, DeMethylierungs-Inhibitoren (DMI)	H302-361d-410	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen

Tabelle 12: In Deutschland eingesetzte Insektizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ <https://gestis.dguv.de/>)

Wirkstoff	Verwendet für	Wirkungsmechanismus	Gefahrenhinweise nach GESTIS	Anmerkung
Chlorantraniliprole	Mais	Aktivierung des Ryanodin Rezeptors	H315-319-335-400	
lambda-Cyhalothrin	Gerste, Raps, Weizen, Zuckerrübe	Störung der Natriumkanäle	H301-317-319-332-334-400-410	Zulassungsende 2024
Etofenprox	Raps	siehe oben	H304-315-318-336-362	kann Säuglinge über Muttermilch schädigen
Pirimicarb	Zuckerrübe	Hemmung Acetylcholinesterase	H301+331-317-351-410	kann vermutlich Krebs erzeugen

Tabelle 13: In Deutschland eingesetzte Herbizide, deren Verwendungszweck, Wirkungsmechanismus sowie Gefahrenhinweise (Quelle: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ips/dateien/vorspann_ps-merkblatt_2012_internet.pdf/ <https://gestis.dguv.de/>)

Wirkstoff	Verwendet für	Wirkungsmechanismus	Gefahrenhinweise nach GESTIS	Anmerkung
Chlortoluron	Weizen, Gerste	Hemmung des Photosystem-II-Stoffwechsels (PSII-Hemmer)	H351-361d-410	kann vermutlich Krebs erzeugen, kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Diflufenican	Weizen, Gerste	Hemmung der Carotinoid-Biosynthese	H302+312-410	
Dimethenamid-P	Mais, Raps	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302-317-410	
Epoxiconazol	Weizen	Hemmung der C14-Demethylase in der Sterolbiosynthese, DeMethylierungs-Inhibitoren (DMI)	H351-360FD-411	kann vermutlich Krebs erzeugen, kann die Fruchtbarkeit beeinträchtigen, kann das Kind im Mutterleib schädigen
Ethofumesat	Zuckerrübe	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302+312-410	
Flufenacet	Mais, Gerste	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302-317-373-410	
Foramsulfuron	Mais	Hemmung der Acetolactat-Synthase (ALS-Hemmer)	H351-410	kann vermutlich Krebs erzeugen
Glyphosat	Mais, Raps, Weizen, Gerste, Zuckerrübe	Hemmung der Synthese aromatischer Aminosäuren	H318-411	
Iodosulfuron	Mais	Hemmung der Acetolactat-Synthase (ALS-Hemmer)	H410	
Mesotrione	Mais	Hemmung der Hydroxyphenyl-Pyruvate-Dioxygenase (HPPD-Hemmer)	H361d-373-410	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Metamitron	Zuckerrübe	Hemmung des Photosystem-II-Stoffwechsels (PSII-Hemmer)	H302-400	
Metazachlor	Raps	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302-317-351-410	kann vermutlich Krebs erzeugen
Pendimethalin	Gerste	Mikrotubuli- und Zellteilungshemmer	361d-410	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Pethoxamid	Mais	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302-317-410	
Phenmedipham	Zuckerrübe	Hemmung des Photosystem-II-Stoffwechsels (PSII-Hemmer)	H410	
Pinoxaden	Gerste	Hemmung der Acetyl-CoA-Carboxylase (ACCaseHemmer)	H302+332-317-319-335-361d-410	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Propaquizafop	Raps	Hemmung der Acetyl-CoA-Carboxylase (ACCaseHemmer)	H332	
Propyzamid	Raps	Mikrotubuli- und Zellteilungshemmer	H351-410	kann vermutlich Krebs erzeugen
Prosulfocarb	Weizen, Gerste	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H302-317-411	
Quinmerac	Raps, Zuckerrübe	Störung des Pflanzen-Hormonstoffwechsels (Synthetische Auxine bzw. Wachstumsstoffe)	H412	
Quizalofop-P	Raps	Hemmung der Acetyl-CoA-Carboxylase (ACCaseHemmer)	H301	
S-Metolachlor	Mais	Hemmung der Fettsäure-Synthese	H317-410	
Tembotrione	Mais	Hemmung der Hydroxyphenyl-Pyruvate-Dioxygenase (HPPD-Hemmer)	H317-361d-373-410	kann vermutlich das Kind im Mutterleib schädigen
Terbuthylazin	Mais	Hemmung des Photosystem-II-Stoffwechsels (PSII-Hemmer)	H302-373-410	
Thiencarbazone	Mais	Hemmung der Acetolactat-Synthase (ALS-Hemmer)	H410	

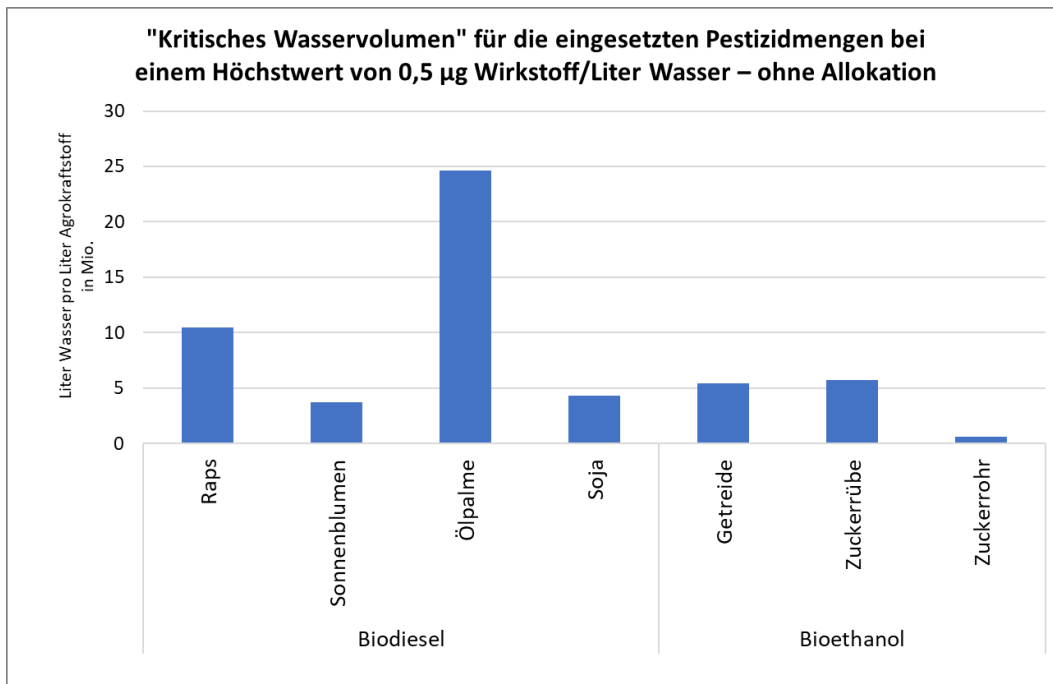


Abbildung 9 „Kritisches Wasservolumen“, das benötigt wird, um eine Pestizidkonzentration von 0,5 µg/L zu unterschreiten, jeweils für einen Liter Agrokraftstoff – ohne Allokation (Quelle: Berechnungen ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2024), (ifeu 2015))