INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG

CO_2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland

Horst Fehrenbach und Silvana Bürck

Heidelberg, 2022

ifeu Wilckensstraße 3 69120 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

Erstellt im Auftrag der Deutschen Umwelthilfe (DUH).

IMPRESSUM

Autoren:	Horst Fehrenbach, Silvana Bürck
Herausgeber:	ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
	Wilckensstraße 3 - D-69120 Heidelberg
Erscheinungsjahr:	2022
Bildquellen:	Fehrenbach

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **3**

Tabellenverzeichnis **4**

1 Hintergrund und Zielsetzung **5**

2 Methodik **7**

2.1 Fragestellung 7

2.2 Daten 7

2.3 Vorgehensweise 9

2.3.1 Flächenbelegung durch den Anbau von Biokraftstoffen 11

2.3.2 Flächenbelegung durch Solarenergie bei vollständigem Ersatz der Biokraftstoffe 11

2.3.3 Potenzial der Kohlenstoffsenke durch Renaturierung und CO_2-Opportunitätskosten 12

2.3.4 Weitere ökologische Aspekte 13

3 Ergebnisse **14**

3.1 CO_2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen 14

3.1.1 Bestandsaufnahme der Biokraftstoffe 14

3.1.2 Substitution der Biokraftstoffe durch Elektromobilität 19

3.1.3 Entgangene Kohlenstoffspeicherung 21

3.1.4 Vergleiche der CO_2-Opportunitätskosten in zwei Szenarien 25

3.2 Weitere ökologische Aspekte 28

4 Diskussion **30**

5 Zusammenfassung **36**

Literaturverzeichnis **37**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Workflow der Studie; bei Schritt 1 – 3 erfolgt eine Differenzierung in (a) produzierten und (b) verbrauchten Biokraftstoff in Deutschland, Schritt 4 beschränkt sich auf die Betrachtung der verbrauchten Biokraftstoffe (b) ; Quelle: eigene Darstellung ifeu 10

Abbildung 2: Energiemengen der auf deutschen Agrarflächen in 2020 produzierten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten in Tabelle 2, (BMEL 2020), (FNR 2021a), (FNR 2021b)) 15

Abbildung 3: Aufkommen der in Deutschland in 2020 eingesetzten Biokraftstoffe auf Basis von Anbaubiomasse (Quelle: (BLE 2021)) 17

Abbildung 4: Flächenbelegung der in Deutschland in 2020 produzierten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (FNR 2021a), (ifeu o.J.)) 18

Abbildung 5: Flächenbelegung der in Deutschland in 2020 eingesetzten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.)) 19

Abbildung 6: Flächenbelegung der Biokraftstoffe und der Alternative Freiflächen-Photovoltaik auf Basis der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (FNR 2021a), (ifeu o.J.), (BMEL 2020), (FNR 2021b), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b)) 20

Abbildung 7: Flächenbelegung der Biokraftstoffe und Freiflächen-Photovoltaik für die Bereitstellung gleicher Fahrleistung auf Basis der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b), (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2018)) 21

Abbildung 8: Mittlere jährliche CO_2-Speicherung durch Aufwuchs natürlicher Vegetation auf heutigen Anbauflächen für die Produktion der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe; Darstellung ifeu; Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010) 24

Abbildung 9: Gegenüberstellung der THG-Emissionseinsparung in Deutschland durch Anbau-Biokraftstoffe nach BLE (2021) mit den CO_2-Opportunitätskosten der Biokraftstoffe, differenziert nach Produktionsregionen Darstellung: ifeu; Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010) 26

Abbildung 10: Schematische Darstellung der jährlichen Nettoemissionseinsparung der Option Nutzung der Biokraftstoffe (links) und Ersatz der Biokraftstoffe (rechts) (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b), (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2018)) 27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung zentraler Datengrundlagen	8
Tabelle 2:	Übersicht über die verwendeten Daten zu Ernteerträgen, Flächenbelegungen in Deutschland, Biokraftstoffausbeuten und Allokationsfaktoren zur Aufteilung der Treibhausgasemissionen sowie der Flächenbelegung zwischen Biokraftstoff und jeweiligen Nebenprodukten	9
Tabelle 3:	Auf deutschen Agrarflächen erzeugte Biokraftstoffmengen	15
Tabelle 4:	In Deutschland eingesetzte Biokraftstoffmengen auf Basis von Anbaubiomasse differenziert nach Ausgangssubstrat und Herkunft (Werte gerundet)	16
Tabelle 5:	Überblick über die potenzielle Vegetationsentwicklung und damit verbundene Sequestrationsraten	23

1 Hintergrund und Zielsetzung

Kraftstoffe auf Basis von Biomasse gelten seit längerer Zeit als Möglichkeit zur Minderung der Emissionen von Treibhausgasen (THG) des Verkehrs, denn Biomasse ist vom Prinzip her ein erneuerbarer Rohstoff. Daher wird das beim Verbrennen von Biomasse entstehende Kohlenstoffdioxid (CO_2) gemeinhin als klimaneutral betrachtet, da man davon ausgeht, dass dieses CO_2 zuvor beim Wachsen der pflanzlichen Biomasse aus der Luft fixiert wurde. Es befindet sich somit in einem Kreislauf. Biokraftstoffe sind dennoch nicht klimaneutral, denn ihre Herstellung ist vergleichsweise aufwändig. Nicht unerhebliche Mengen an Treibhausgasen werden über den Ackerbau (v.a. Düngemittel, Diesel für Maschinen, Herstellung von Pestiziden) freigesetzt und auch die Verarbeitung der Rohstoffe zu einem Kraftstoff ist energieintensiv. In der „Nettobilanz“ gegenüber dem ersetzten fossilen Diesel und Benzin schneiden die Biokraftstoffe nach amtlichen Berechnungsweisen in der Regel dennoch mit einer Einsparung ab.

Dies gilt jedoch nur, wenn durch die Biomassenutzung keine Landnutzungsänderung verursacht wird. In diesem Fall ist der Kreislauf des biogenen CO_2 nicht geschlossen und die oben erwähnte Klimaneutralität nicht gegeben. Weltweit führt die Umwandlung von Wäldern zu Agrarflächen zu THG-Emissionen in Höhe von 5,2 Milliarden Tonnen CO_2 (IPCC 2021), was bei insgesamt 47 Milliarden Tonnen Treibhausgasemissionen weltweit beträchtlich ist. Landnutzungsänderungen wirken im Übrigen nicht nur auf das Klima, sondern auch massiv auf die Biodiversität, Wasserhaushalte und Böden (IPBES 2019). Oft gehen auch Vertreibungen der Bevölkerung einher mit entsprechenden sozialen Folgen (Herman und Mayrhofer 2016).

Der Treiber für die Produktion von Biokraftstoffen ist die EU-Politik, die Mindestquoten an erneuerbarer Energie im Verkehrsbereich vorschreibt. Grundlage dafür ist die Erneuerbare Energien Richtlinie (Renewable Energy Directive, kurz RED) bzw. deren seit 2021 geltende Neufassung (RED II). Angerechnet werden nur Biokraftstoffe, die bestimmte Nachhaltigkeitskriterien erfüllen und dies per Zertifizierung nachweisen können. Zu den Kriterien zählt auch eine Mindesteinsparung an THG-Emissionen. Die Berechnungsmethode dafür ist ebenfalls in der RED bzw. RED II festgelegt. In Deutschland werden die zertifizierten Einsparungen in einem Register der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) erfasst und in jährlichen Evaluationsberichten durch die BLE dokumentiert. Für das Jahr 2020 berichtet die BLE eine mit dem Einsatz von Biokraftstoffen verbundene Einsparung von insgesamt 13,2 Mio. t CO_2-Äquivalenten (BLE 2021).

Wie ist diese Zahl einzuschätzen? Zunächst ist festzustellen, dass auch im Jahr 2020 Biokraftstoffe zum Großteil auf landwirtschaftlichem Anbau beruhen. Ein Teil des Biodiesels wird zwar aus Abfallstoffen (v.a. gebrauchtes Speiseöl) hergestellt, doch der Anteil aus Raps und Palmöl überwiegt. Für Bioethanol dienen primär verschiedene Getreidearten wie Weizen als Rohstoff.

Die Flächenbelegung für die Biokraftstoffproduktion ist durchaus beträchtlich: In Deutschland nimmt sie 6,6 % der Ackerfläche ein. Von den inländisch erzeugten Biokraftstoffen wird im Übrigen ein großer Teil exportiert. Gleichzeitig importieren die deutschen Kraftstoffunternehmen große Mengen, vor allem Bioethanol, aber auch das bereits genannte Palmöl. Durch die Zertifizierung kann zwar die *direkte Landnutzungsänderung* praktisch ausgeschlossen werden, sprich, der Biokraftstoff kommt nicht von Plantagen, für die erst

kürzlich Wald gerodet wurde. Durch das zusätzliche Marktprodukt Biokraftstoff steigt aber der Flächenbedarf insgesamt, sodass irgendwo auf der Welt die zusätzliche Fläche bereitgestellt werden muss. Dies wird als *indirekte Landnutzungsänderung* (kurz iLUC) bezeichnet. Danach ist es unerheblich, ob die Biokraftstoffproduktion direkt auf dafür umgewandelten Waldflächen erfolgt, denn auch der Anbau auf Flächen, die nachweislich schon lange Agrarland sind, trägt zur Verdrängung anderer Agrarerzeugnisse und damit zur Verknappung der Fläche bei und führt letztlich indirekt zur Entwaldung.

Diese Konflikte wurden auch bei der Formulierung der RED wahrgenommen, weswegen die Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse nur begrenzt auf die Quoten und Einsparziele angerechnet werden dürfen. Sie sind nach der EU Richtlinie auf maximal 7 % des Endenergieverbrauchs im Verkehr gedeckelt. In Deutschland ist dieser Deckel im Zuge der Umsetzung der RED II in nationales Recht sogar auf 4,4 % abgesenkt worden.

Diese Begrenzung mag geeignet sein, um die beschriebenen iLUC-Effekte einzudämmen. Es stellt sich jedoch eine andere Frage: Bildet die THG-Bilanz nach den Regeln der RED wirklich alle Aspekte ab? Tatsächlich ist ein Aspekt in der ganzen Diskussion bisher kaum beachtet worden. Angenommen, man verzichtet auf die Produktion von Kraftstoffen aus Anbaubiomasse und stellt die dafür in Beschlag genommenen Flächen der Regeneration der natürlichen Vegetation zur Verfügung, wie sähe dann die Klimabilanz aus? Als Begriff für diese Art von entgangenen Nutzen hat sich in der Fachwelt der Begriff der *CO_2-Opportunitätskosten* etabliert (siehe u.a. (Hayek et al. 2021; Schmidinger und Stehfest 2012; Searchinger et al. 2018; Wirsenius et al. 2020)). Er kann auch weiter gefasst werden als ökologische Opportunitätskosten.

An diesem Punkt setzt die hier vorliegende Studie an. Die zentrale Aufgabenstellung lautet, den von der BLE veröffentlichten Einsparwerten gegenzurechnen, wie viel Kohlenstoff bzw. CO_2 sich jährlich binden lassen, wenn wir auf denen bisher in Deutschland und weltweit für Biokraftstoffe beanspruchten Flächen die Renaturierung zuließen. Neben dem damit verbundenen Senkenpotenzial entgehen durch den Anbau von Agrarbiomasse für Biokraftstoffe weitere ökologische Möglichkeiten, wie beispielsweise die Entwicklung von Naturräumen mit hoher Biodiversität.

Diese Studie hat somit das Ziel, bisherige Betrachtungen zum Klimaschutzbeitrag von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse um deren CO_2-Opportunitätskosten zu erweitern. Methodisch wird dabei Bezug auf die oben bereits erwähnten Arbeiten genommen. Die Studien von (Evans et al. 2015; Righelato und Spracklen 2007) haben ebenfalls einen Fokus auf Biokraftstoffe. Jedoch existiert nach unserem aktuellen Kenntnisstand keine Studie zur Untersuchung und Abschätzung der CO_2-Opportunitätskosten der in Deutschland produzierten sowie im Verkehr eingesetzten Biokraftstoffe. Die Studie betrachtet außerdem über den Klimaschutz hinausgehende Aspekte und geht auf weitere ökologische Opportunitätskosten ein. Auch dieser Teilaspekt findet unseres Wissens in aktuellen Studien wenig Aufmerksamkeit. Folglich hat die vorliegende Studie auch das Ziel, diese Forschungslücken zu schließen und greift folgende Frage als zentralen Punkt für die Studie auf:

Welche Flächennutzung ermöglicht mehr Klima- und Biodiversitätsschutz, der Anbau von Biokraftstoffen oder eine Renaturierung? Dabei betrachten wir a.) die in Deutschland zur Produktion von Biokraftstoffen belegten Flächen und b.) die in Deutschland und weltweit zur Produktion von in Deutschland getankten Biokraftstoffen belegten Flächen.

Der Aufbau dieser Studie gestaltet sich folgendermaßen: Zu Beginn wird die Methodik, einschließlich der Forschungsfragen, verwendeter Datengrundlagen und der Vorgehensweise (Kapitel 2) erläutert. Anschließend werden in Kapitel 3 die Ergebnisse dargestellt und in Kapitel 4 diskutiert. Die Studie endet mit einer Zusammenfassung, welche die zentralen Kernpunkte der Studie aufführt (Kapitel 5).

2 Methodik

2.1 Fragestellung

Im Zentrum dieser Studie steht der Vergleich der offiziell berichteten Emissionseinsparungen durch die Beimischung von Biokraftstoffen zu fossilen Kraftstoffen auf der einen Seite, mit den durch den Flächenbedarf der Biokraftstoffproduktion entstehenden CO_2-Opportunitätskosten auf der anderen Seite. Hierfür ist eine schrittweise Analyse erforderlich, die sich in mehrere Unterfragen aufteilt.

Folgende Unterfragen werden im weiteren Verlauf untersucht:

1. Welche Biokraftstoffmengen, differenziert nach Ausgangssubstrat, werden in Deutschland jährlich
   - produziert? (Diese Betrachtung beinhaltet auch die Produktion von exportiertem Biokraftstoff.)
   - verbraucht? (Diese Betrachtung beinhaltet den Import von Biokraftstoffen nach Deutschland, jedoch nicht den Export von Biokraftstoffen aus Deutschland.)
2. Wie groß sind die dafür benötigten Agrarflächen im In- und Ausland?
3. Welche Energiemenge und Pkw-Fahrleistung wird durch diese Biokraftstoffe abgedeckt, und welcher Flächenbedarf ergäbe sich bei Bereitstellung derselben Fahrleistung über Solarstrom und Elektroantrieb?
4. Welche Art von natürlicher Vegetation könnte sich prinzipiell auf Flächen, die aktuell für die Biokraftstoffproduktion belegt sind, entwickeln? Wie viel Kohlenstoff könnte dadurch jährlich gebunden werden?
5. Werden durch die Biokraftstoffproduktion mehr Treibhausgase eingespart als durch eine potenzielle Renaturierung der Anbauflächen?
6. Welche weiteren ökologischen Aspekte bringt die Renaturierung der Anbauflächen mit sich?

2.2 Daten

Die Gegenüberstellung von berichteten THG-Einsparungen und CO_2-Opportunitätskosten der Biokraftstoffe erfolgt auf Basis von amtlichen Daten, ergänzt durch Daten aus wissenschaftlich anerkannten Arbeiten. Die Grundlage für die Untersuchung bilden die in Tabelle 1 dargestellten Datenquellen.

Die Daten der BLE (BLE 2021) sind amtliche Daten über die Herkunft und Typologie der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe. Die BLE führt das Register Nabisy (Nachhaltige Biomasse Systeme), welches die Nachweise der Nachhaltigkeit für die Zulassung zur Quotenanrechnung in Deutschland führt. Auf Basis dieser Daten veröffentlicht die BLE einen jährlichen Evaluations- und Erfahrungsbericht, der die Ausgangsstoffe für in Deutschland

verbrauchte Biokraftstoffe, differenziert nach Herkunft und Rohstoff, beinhaltet. Diese Daten entsprechen den in Deutschland auf die Quotenverpflichtung angerechneten Biokraftstoffen, d. h. die mittels Beimischung eingesetzten Biokraftstoffe. Diese umfassen sowohl die in Deutschland produzierten (abzüglich der aus Deutschland exportierten) Biokraftstoffe, als auch die von Deutschland importierten Biokraftstoffe (siehe Kapitel 3.1.1). Der jährliche BLE-Bericht berechnet darauf basierend die offiziellen THG-Emissionen bzw. Einsparungen der eingesetzten Biokraftstoffe im Vergleich zum Einsatz fossiler Kraftstoffe (siehe Kapitel 3.1.3).

Eine weitere zentrale Datenquelle sind die Daten der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) zum Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (FNR 2021a). Die Daten der FNR sind ebenfalls amtliche Daten des eingetragenen Vereins Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., der dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) untersteht. Auf der Website der FNR werden jährlich Daten zu Biokraftstoffen, wie beispielsweise die Anbauzahlen bzw. Flächenbelegungsdaten für Energiepflanzen, publiziert. Dabei beziehen sich diese Angaben im Gegensatz zu den Daten der BLE nicht auf die in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe, sondern auf die auf deutschen Flächen produzierten Biokraftstoffe (bzw. Ausgangsrohstoffe) einschließlich der Exportware und exklusiv der Importware.

Die Daten vom BMEL zu Erntestatistiken (BMEL 2020) sowie die Daten zu Kraftstoffausbeuten der FNR (FNR 2021b) werden in die Analyse miteinbezogen, um die Flächenbelegungswerte der FNR in Kraftstoffmengen umzurechnen. Für die Daten der BLE werden Erntemengen aus BioGrace (ifeu o.J.) verwendet.

Ebenfalls aus BioGrace werden die sogenannten Allokationsfaktoren entnommen. Diese werden zur Aufteilung der Flächenbelegung auf die bei der Biokraftstoffproduktion entstehenden Nebenprodukte benötigt.

Zur Abschätzung des Kohlenstoffgehaltes verschiedener natürlicher Ökosysteme werden Daten der (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010) herangezogen. Darin enthalten ist der in der ober- sowie unterirdischen Biomasse gespeicherte Kohlenstoff von Agrarsystemen und natürlichen Vegetationstypen, differenziert nach Kontinent und klimatischer Ausprägung.

Tabelle 1: Zusammenstellung zentraler Datengrundlagen

Herausgeber	Bericht/ Veröffentlichung	Art der Daten	Jahr des Datensatzes	Quellenbezeichnung
BLE	Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020	Ausgangsstoffe nach Herkunft und Art	2020	(BLE 2021)
FNR	Anbauzahlen (online)	Energiepflanzenanbau für Biokraftstoffe 2020	2020	(FNR 2021a)
BMEL	Erntestatistiken	Erträge von Agrarprodukten	2010-2020	(BMEL 2020)
FNR	Basisdaten Nachwachsende Rohstoffe	Biodieselertrag, Bioethanolertrag	2015	(FNR 2021b)
ifeu	BioGrace	Daten zur THG-Lebenswegbilanzberechnung (u.a. Ertragsdaten, Allokations- und Umwandlungsfaktoren)	2009	(ifeu o.J.)
EU Kommission	Beschluss 2010/335/EU	Kohlenstoffbestand verschiedener Vegetationsformen (globale auf IPCC beruhende Daten)	2010	(EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010)

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, Flächenbelegungen in Deutschland, Biokraftstoffausbeuten und Allokationsfaktoren zur Aufteilung der Treibhausgasemissionen sowie der Flächenbelegung zwischen Biokraftstoff und jeweiligen Nebenprodukten

	Spezifischer Ernteertrag [a)] t/(ha*a)	Flächen-belegung [b)] ha/a (nicht alloziert)	Erntemenge t/a	Biokraftstoff-ausbeute [c)] Liter/t Biomasse	Allokations faktor [d)] für Biokraftstoff MJ/MJ
Für Biodiesel					
Raps	3,6	575.000	2.070.000	455	0,59
Für Bioethanol					
Körnermais	9,49	14.400	136.656	400	0,60
Roggen	5,33	71.600	381.628	420	0,60
Weizen	7,76	67.700	525.352	380	0,60
sonst. Getreide	6,77	41.400	280.278	400	0,60
Zuckerrübe	73,72	11.600	855.152	110	0,71

Anmerkung: Die Flächenbelegung in Spalte 2 bezieht sich auf die Ernteprodukte, nicht auf die daraus erzeugten Biokraftstoffe, für die die Flächenwerte mit den in Spalte 5 aufgeführten Allokationsfaktoren zu multiplizieren sind.
Quelle: a) (BMEL 2020), b) (FNR 2021a), c) (FNR 2021b), d) BioGrace, nach den Regeln der RED auf Basis der Energiegehalte Koppelprodukte

2.3 Vorgehensweise

Räumlich betrachtet umfasst diese Studie die in Deutschland produzierte sowie die in Deutschland konsumierte Biokraftstoffmenge. Der Zeitpunkt der Datengrundlage liegt dabei auf dem Jahr 2020, da die Daten der BLE und FNR sich auf dieses Jahr beziehen.

Die potenzielle Renaturierung der Anbauflächen für Biokraftstoffe ist ein dynamischer Prozess, dessen Entwicklung über einen längeren Zeitraum betrachtet werden muss. Mit Blick auf 2050, als das zentrale Zieljahr der Klimapolitik, wird der Betrachtungszeitraum der Kohlenstoffspeicherung über den Verlauf der natürlichen Vegetationsentwicklung auf 30 Jahre gesetzt. Der jährlichen Einsparung von Treibhausgasemissionen (repräsentiert durch die Datenlage im Jahr 2020) wird eine jährliche Speicherung von CO_2 im natürlichen Aufwuchs als Mittelwert über 30 Jahre gegenübergestellt.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die einzelnen Schritte. Diese werden im Folgenden erläutert.

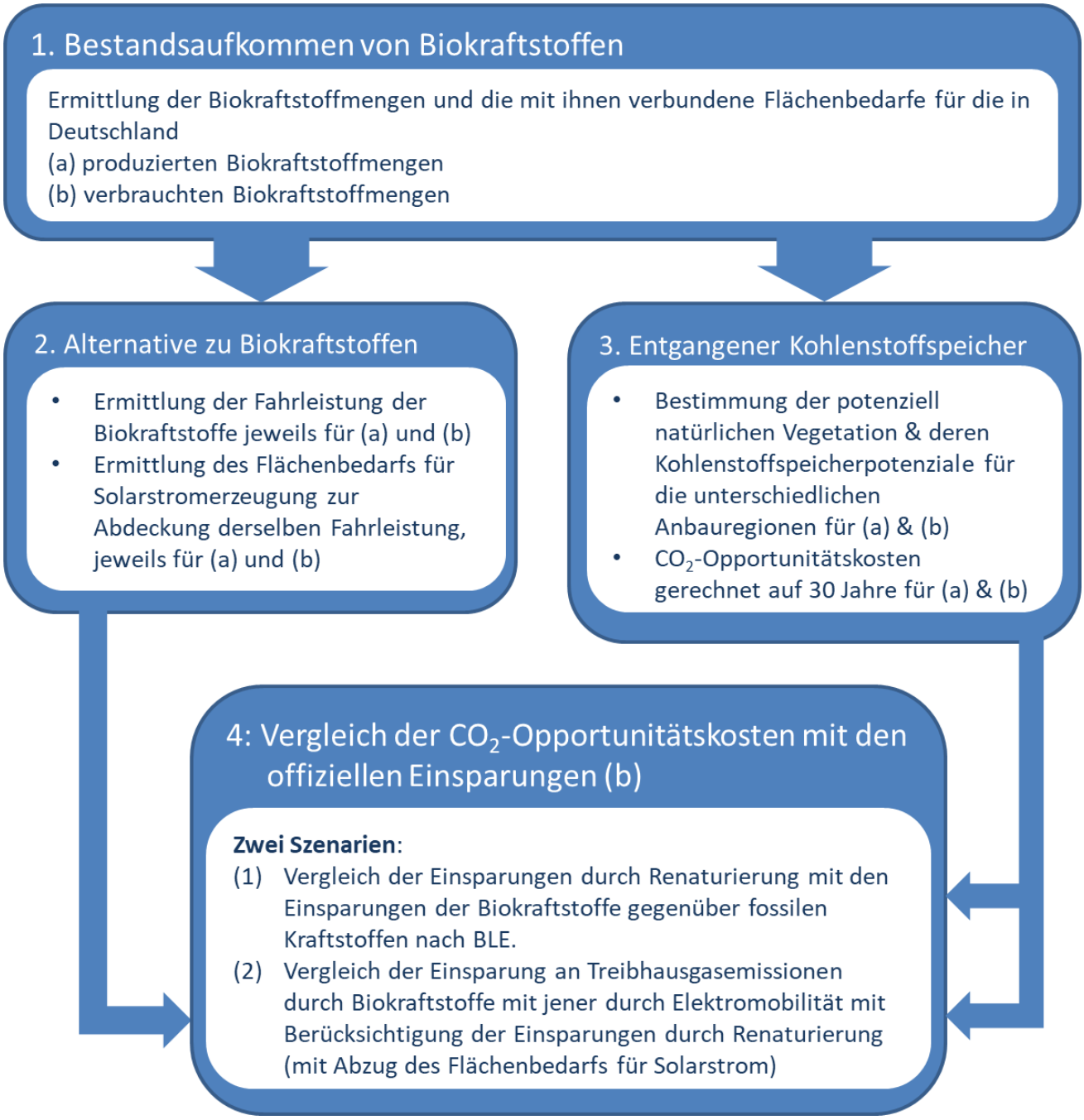

Abbildung 1: Workflow der Studie; bei Schritt 1 – 3 erfolgt eine Differenzierung in (a) produzierten und (b) verbrauchten Biokraftstoff in Deutschland, Schritt 4 beschränkt sich auf die Betrachtung der verbrauchten Biokraftstoffe (b) ; Quelle: eigene Darstellung ifeu

2.3.1 Flächenbelegung durch den Anbau von Biokraftstoffen

Die Daten der BLE und der FNR liegen in unterschiedlichen Einheiten vor. Während die Daten zum Energiepflanzenanbau für Biokraftstoffe der FNR bereits in Hektar vorliegen, beziehen sich die Daten der BLE auf Megajoule.

Um den Bezug zur Fläche herstellen zu können, werden die Daten der BLE mit Ertragszahlen aus dem THG-Emissionsberechnungstool für Biokraftstoffe „BioGrace"[1] in Flächenbelegungsdaten umgerechnet.

Weitergehend werden die Flächenbelegungsdaten der FNR mit Ertragsdaten in Tonnen pro Hektar und Jahr (t/(ha·a)) des (BMEL 2020) und Biokraftstoffausbeuten in Liter pro Tonnen Biomasse (l/t BM) der FNR (FNR 2021b) und in Petajoule (PJ) umgerechnet.

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. Sowohl die Flächenbelegungsdaten der FNR als auch die der BLE werden folglich mit einem Allokationswert verrechnet. 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 Hauptprodukte und Nebenprodukten nach BioGrace zu Grunde gelegt. 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 Glyzerin) reduziert sich der Wert um 42 % auf 0,156 Mio. ha. Folglich werden 58 % der Fläche des Rapsackers dem Biokraftstoff zugerechnet.

2.3.2 Flächenbelegung durch Solarenergie bei vollständigem Ersatz der Biokraftstoffe

In diesem Schritt (Schritt 2a in Abbildung 1) wird ermittelt, welche Fahrleistung in Kilometer mit den in Deutschland produzierten bzw. eingesetzten Biokraftstoffen abgedeckt wird und welche Fläche für Photovoltaik benötigt würde, um dieselbe Fahrleistung alternativ mit solarstrombetriebener Elektromobilität erbringen zu können. Der Strom für den Elektroantrieb wird in diesem Szenario über Freiflächen-Photovoltaik bereitgestellt. Es werden zwei Betrachtungen vorgenommen: Einerseits wird die Fahrleistung und die korrespondierende Substitution auf Basis der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe berechnet, andererseits wird die Fahrleistung der in Deutschland verbrauchten Biokraftstoffe (exkl. Export und inkl. Import) ermittelt.

Ausgehend von den Biokraftstoffmengen für Biodiesel und Bioethanol erfolgt anhand des volumenspezifischen Energiegehaltes von 33 MJ/l für Biodiesel und 21 MJ/l für Bioethanol (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2018) eine Umrechnung der BLE Daten in das Aufkommen von Biodiesel und Bioethanol in Liter.

Aufgrund der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Umrechnung der FNR Daten in PJ besteht bei den FNR Daten bereits der Bezug zum volumenspezifischen Energiegehalt.

Um die dadurch abgedeckte Fahrleistung zu ermitteln, wird das Kraftstoffaufkommen mit dem Verbrauch eines durchschnittlichen Mittelklasse PKW von 4,7 l/100 km multipliziert

[1] https://www.biograce.net/

(Helms et al. 2019). Anschließend wird anhand des durchschnittlichen Strombedarfs eines äquivalenten Mittelklasse E-Pkw von 18,4 kWh/100 km (Helms et al. 2019) berechnet, welcher Strombedarf für die Fahrleistung der Biokraftstoffe erforderlich ist. Anhand von Flächenbelegungsdaten für Freiflächen-Photovoltaik von 22 m^2*a/MWh aus (Fehrenbach et al. 2021b) erfolgt eine Umrechnung des Strombedarfs in Fläche. Diese kann mit der von Biokraftstoffen belegten Fläche verglichen werden.

2.3.3 Potenzial der Kohlenstoffsenke durch Renaturierung und CO_2-Opportunitätskosten

Die Ermittlung der CO_2-Opportunitätskosten der deutschen Biokraftstoffe erfolgt auf der Basis des Potenzials an Kohlenstoffspeicherung auf einer zur Renaturierung freigegebenen Fläche (Schritt 3 in Abbildung 1). Dafür wird ein hypothetisches Szenario betrachtet, in dem in Deutschland vollständig auf Produktion und Einsatz von Biokraftstoffen und somit auch auf den Energiepflanzenbau verzichtet wird. Stattdessen werden diese Flächen, die bisher vom Energiepflanzenbau belegt wurden, sich selbst überlassen. Auf diesen Flächen entwickeln sich natürliche Vegetationsgesellschaften. Wie in den vorigen Schritten werden auch hier die Potenziale an Kohlenstoffspeicherung sowohl auf Basis der in Deutschland produzierten als auch auf Basis der in Deutschland verbrauchten Biokraftstoffe ermittelt. Letzteres beinhaltet auch eine Betrachtung der Flächen in den Ländern aus denen Deutschland Biokraftstoffe bzw. Agrarrohstoffe für Biokraftstoffe importiert.

Die potenzielle Kohlenstoffspeicherung auf den sich selbst überlassenen Flächen wird folgendermaßen ermittelt.

- Für die Flächen in Deutschland wird anhand des Konzeptes der heutigen potenziell natürlichen Vegetation (hpnV) (Suck et al. 2014a) untersucht, welche Vegetationsform sich auf den Agrarflächen entwickeln kann.
- Für die Anbaugebiete außerhalb Deutschlands werden die Anbaugebiete der Biokraftstoffe, differenziert nach Land und Energiepflanze, anhand der BLE Berichte identifiziert. Dieser Schritt ist essenziell, um festzustellen welche potenzielle Vegetation sich auf diesen Flächen entwickeln kann.
- Für die Zuordnung der sich potenziell entwickelnden Vegetation und der damit verbundenen potenziellen Kohlenstoffspeicherung werden Angaben zu Kohlenstoffspeicherung in verschiedenen Vegetationstypen der EU Kommission verwendet (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010). Demnach würde sich beispielsweise auf Agrarland in Indonesien bei Unterlassung der Bewirtschaftung die Vegetationsform tropischer Regenwald, Asien (Inseln), mit einem Kohlenstoffgehalt von bis zu 230 Mio.t/ha im Endstadium, entwickeln. Diese Informationen zu den Kohlenstoffgehalten der Vegetationsformen und auch der Agrarfläche liegen auf der Ebene klimatischer Großregionen vor.
- Zur Ableitung einer jährlichen Kohlenstoffspeicherrate wird die Differenz gebildet aus dem Kohlenstoffbestand der Agrarfläche und dem Kohlenstoffgehalt der sich entwickelnden Vegetationsform im Endstadium. Es wird angenommen, dass sich das Endstadium in einem Zeitraum von 30 Jahren entwickeln kann. Daher wird die Differenz der Kohlenstoffbestände durch den Faktor 30 dividiert.[1] Die Daten zu Kohlenstoffbeständen der Agrarflächen und der sich entwickelnden Vegetationsformen

[1] Die gleichmäßige Mittelwertbildung über 30 Jahre stellt hier eine Vereinfachung ein, da die Kohlenstoffeinbindung kein konstanter Prozess ist und gewissen Schwankungen unterliegt.

werden aus (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010) entnommen. Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Kohlenstoffbindung gleichmäßig über die Zeit erfolgt, entspricht dies der jährlichen Kohlenstoffspeicherrate. Diese Kohlenstoffspeicherraten werden mit den Flächen der Anbaugebiete multipliziert.

Die potenzielle Kohlenstoffspeicherung aus der Renaturierung entspricht den CO_2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen. Das heißt sie korrespondieren mit dem entgangenen potenziellen Kohlenstoffspeicher bei Fortführung des Einsatzes der Biokraftstoffe.

Zum Vergleich der CO_2-Opportunitätskosten mit den berichteten Treibhausgas-Emissionseinsparungen der Biokraftstoffe, werden Emissionseinsparquoten aus dem jüngsten Bericht der BLE herangezogen (BLE 2021). Hierbei werden von den ausgewiesenen Treibhausgas-Gesamteinsparungen die auf Abfallbiomasse (v.a. Biodiesel auf Basis gebrauchten Pflanzenöls) beruhenden Treibhausgas-Anteile abgezogen.

In Schritt 2a (siehe Kapitel 2.3.2) wird die Differenz des Flächenbedarfs zwischen einem Antrieb mit Biokraftstoff und mit Solarstrom errechnet. In Schritt 2b (siehe Abbildung 1) wird nun der Vergleich zwischen den alternativen Antrieben auf der Basis ihrer Treibhausgasbilanzen gezogen und zwar unter Einbeziehung des CO_2-Speicherpotenzials, das mit der Renaturierung der Flächendifferenz verbunden ist.

Ausgehend von der ermittelten Fahrleistung (siehe Kapitel 2.3.2) wird die Nettoemissionseinsparung der Biokraftstoffe mit der Nettoemissionseinsparung der Elektromobilität mit Renaturierung verglichen. Die Nettoemissionseinsparung der Biokraftstoffe setzt sich aus der Differenz zwischen den Emissionen eingesparter fossiler Kraftstoffe und den Emissionen der Biokraftstoffe zusammen. In Analogie dazu setzt sich die Nettoemissionseinsparung der Elektromobilität mit Renaturierung aus der Differenz zwischen den Emissionen eingesparter fossiler Kraftstoffe und Emissionen der Photovoltaik Freiflächenanlagen zusammen. Zusätzlich wird hier die CO_2-Einsparung durch Renaturierung der nicht für Photovoltaik benötigten Fläche eingerechnet.

2.3.4 Weitere ökologische Aspekte

Der Anbau von Biomasse für Biokraftstoffe ist nicht nur mit Blick auf Treibhausgasemissionen zu bewerten, sondern auch mit weiteren ökologischen Aspekten verbunden. Diese werden im Rahmen dieser Studie übersichtsweise erörtert (siehe Kapitel 3.2). Dabei wird auch auf Umweltwirkungen eingegangen, die im Rahmen von Ökobilanzen betrachtet werden.

Zur Bewertung der ökologischen Qualität von genutzten Flächen kann das Konzept der Hemerobie (Naturferne) dienen. Auf diese Weise ist zusätzlich zur quantitativen Analyse der Flächenbelegung auch eine qualitative Betrachtung möglich – für die Agrarflächen wie auch für renaturierte Flächen. Die ausführlich von (Fehrenbach et al. 2021b) beschriebene Methodik stuft verschiedene Nutzungsformen nach Grad der Intensität menschlicher Eingriffe in insgesamt sieben Hemerobieklassen ein. Klasse I stellt den natürlichen unbeeinflussten Zustand dar, Klasse VII völlig überprägte Flächen wie Versiegelungen oder Tagebaue. Landwirtschaftsflächen finden sich in den Klassen IV bis VI. Über die Klasse wird die Flächenbelegung mit einem Faktor zu einem Naturfernepotenzial umgerechnet – analog zum Treibhausgaspotenzial aus CO_2, Methan und verschiedenen anderen Treibhausgasen. Und analog zu den kg CO_2-Äquivalenten als Einheit für das Treibhausgaspotenzial, wird das Naturfernepotenzial in m^2 oder ha Äquivalente an artifizieller Fläche angegeben.

3 Ergebnisse

3.1 CO$_2$-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen

3.1.1 Bestandsaufnahme der Biokraftstoffe

Die Bestandsaufnahme der Biokraftstoffe erfolgt anhand von zwei Betrachtungsebenen:

1. die Ebene der landwirtschaftlichen Produktion in Deutschland (Daten der FNR)
2. die Ebene der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (Daten der BLE)

Während die erste Betrachtungsebene auch die aus Deutschland exportierten Biokraftstoffe enthält, gibt die zweite Ebene die tatsächlich in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe, abzüglich der exportierten und zuzüglich der importierten Mengen, wieder. Beide Ebenen werden im weiteren Verlauf der Studie berücksichtigt.

3.1.1.1 Aufkommen der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe

Tabelle 3 zeigt die Ableitung der mit auf deutschen Agrarflächen angebauter Biomasse produzierten Biokraftstoffmenge auf der Basis von FNR-Daten und BMEL-Ertragsdaten. Danach wurden im Jahr 2020 942 Millionen Liter rapsbasierter Biodiesel und 621 Millionen Liter Bioethanol auf deutschen Ackerflächen produziert. Insgesamt betrachtet wurden also 1.560 Millionen Liter Biokraftstoffe produziert. Umgerechnet in Energieinhalt sind dies insgesamt 44,1 PJ Biokraftstoffe. Den größten Anteil nimmt dabei Biodiesel auf Basis von Raps (70,4 %) ein, gefolgt von Bioethanol aus Getreide (vor allem Weizen und Roggen, (25,1 % Getreide insgesamt)) und Bioethanol aus Zuckerrüben (4,5 %) (Abbildung 2).

Diese Angaben beschreiben, wie erwähnt, ausschließlich die Menge an Biokraftstoffen, die auf Basis in Deutschland angebauter Biomasse erzeugt wurden, inklusive des Anteils an exportierten Biokraftstoffen. Die Mengen entsprechen nicht den real in Deutschland eingesetzten bzw. konsumierten Biokraftstoffen.

Die tatsächlich in Deutschland eingesetzte Biokraftstoffmenge enthält dagegen auch einen hohen importierten Anteil, wie im folgenden Kapitel ausgeführt wird.

Tabelle 3: Auf deutschen Agrarflächen erzeugte Biokraftstoffmengen

	Flächenbelegung ha/a (alloziert)	Biokraftstoffmenge Mio. Liter/a	Biokraftstoffmenge Petajoule/a
Biodiesel aus Raps	337.000	942	31,1
Summe Biodiesel	**337.000**	**942**	**31,1**
Bioethanol aus			
Körnermais	8.570	55	1,15
Roggen	42.600	160	3,37
Weizen	40.300	200	4,19
sonst. Getreide	24.600	112	2,35
Zuckerrübe	8.270	94	1,98
Summe Bioethanol [a)]	**124.000**	**621**	**13,0**
Summe Biokraftstoffe [a)]	**461.000**	**1.560**	**44,1**

Anmerkung: Die Flächenbelegung in Spalte 2 stellt die für die Biokraftstoffe allozierte Fläche unter Abzug der den Nebenprodukten zugerechneten Fläche dar
a) Werte auf drei signifikante Stellen gerundet.
Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten in Tabelle 2, (BMEL 2020), (FNR 2021a), (FNR 2021b), BioGrace

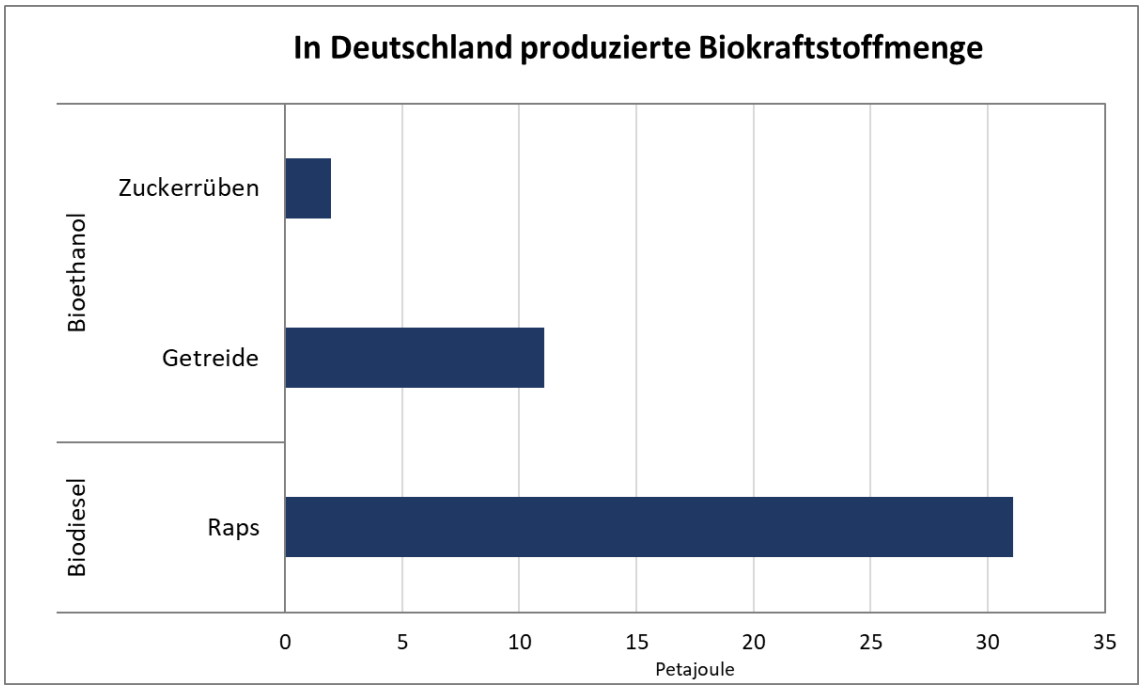

Abbildung 2: Energiemengen der auf deutschen Agrarflächen in 2020 produzierten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten in Tabelle 2, (BMEL 2020), (FNR 2021a), (FNR 2021b))

3.1.1.2 Aufkommen der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe

Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2020 Anbau-Biokraftstoffe im Umfang von 121,2 PJ eingesetzt. Das heißt diese Menge wurde in Deutschland getankt und auf die Treibhausgas-Quote angerechnet. Tabelle 4 zeigt das ganze Sortiment unterschiedlicher Ausgangsstoffe der in Deutschland verwendeten Anbau-Biokraftstoffe. Danach setzt sich der Biodiesel größtenteils aus Palmöl und Rapsöl zusammen. Soja und Sonnenblumen nehmen weitaus geringere Anteile im Biodiesel ein. Weitergehend besteht das Bioethanol primär aus Getreide und zu geringeren Anteilen aus Zuckerrüben und Zuckerrohr.

Darüber hinaus wird in Abbildung 3 die Herkunft der erläuterten pflanzlichen Ausgangsstoffe dargestellt. Der Großteil der nach Deutschland importierten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse stammt mit 53,0 PJ aus Asien und besteht aus Palmöl.[1] Aus EU-Ländern importiert Deutschland weitere 27,8 PJ Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse, darunter größtenteils Kraftstoffe auf Basis von Raps, Sonnenblumen und Getreide aus Ungarn und Polen. An dritter Stelle stehen die in Deutschland produzierten und eingesetzten Biokraftstoffe, darunter primär rapsölbasierte Kraftstoffe.

Tabelle 4: In Deutschland eingesetzte Biokraftstoffmengen auf Basis von Anbaubiomasse differenziert nach Ausgangssubstrat und Herkunft (Werte gerundet)

Herkunft / Ausgangsstoffe	Deutschland	EU-Ausland	Nicht-EU-Europa	Asien	Mittel-/ Südamerika	Australien	Sonstige Länder
			Angaben in	Petajoule	(PJ)		
Raps	11,4	10,7				4,2	1,8
Sonnenblumen		4,9					
Ölpalme				53,0	5,3		
Soja					1,9		
Summe Biodiesel	11,4	15,6		53,0	7,2	4,2	1,8
Getreide	1,8	12,2	11,4				
Zuckerrüben	0,46	0,04					
Zuckerrohr					2,1		
Summe Bioethanol	2,3	12,2	11,4		2,1		
Summe Biokraftstoffe (gesamt)	**13,7**	**27,8**	**11,4**	**53,0**	**9,3**	**4,2**	**1,8**

Quelle: (BLE 2021)

[1] Nach (BLE 2021) ist Asien außerdem für Deutschland der größten Exporteur an Altspeiseöl für Biodiesel mit 17,8 PJ in 2020.

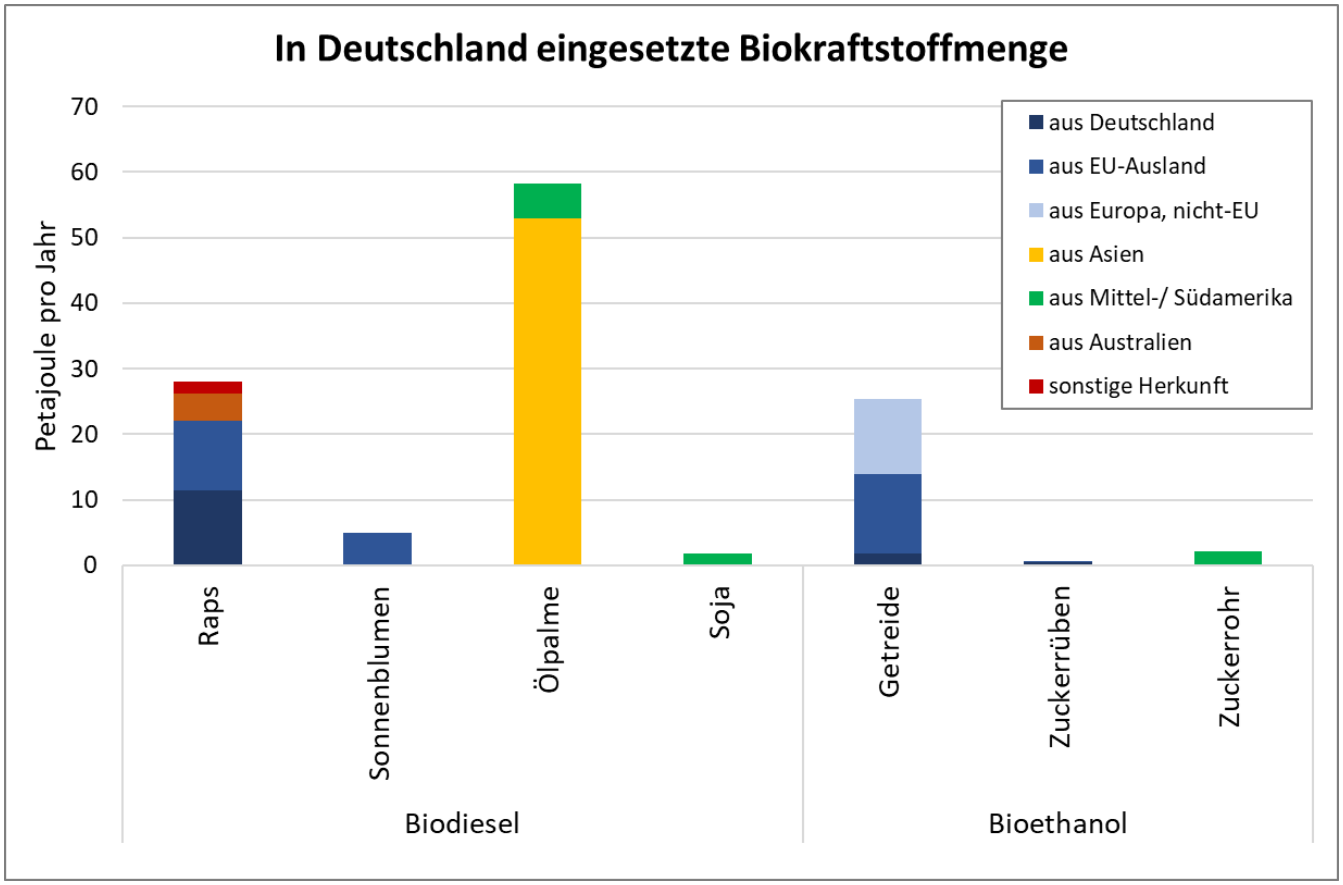

Abbildung 3: Aufkommen der in Deutschland in 2020 eingesetzten Biokraftstoffe auf Basis von Anbaubiomasse (Quelle: (BLE 2021))

3.1.1.3 Flächenbelegung der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe

Nach (FNR 2021a) werden Energiepflanzen für Biokraftstoffe im Umfang von 0,78 Mio. ha auf deutschen Äckern angebaut. Unter Abzug der Koppelprodukte, wie in Kapitel 2 erläutert, reduziert sich dieser Wert auf 0,461 Mio. ha. Diese Fläche ist in etwa doppelt so groß wie die Fläche des Saarlandes. Auf diesen Flächen wird primär Raps für Biodiesel (0,34 Mio. ha) angebaut (Abbildung 4). Ferner wird Getreide im Umfang von 0,12 Mio. ha für Bioethanol kultiviert und in geringem Ausmaß Zuckerrüben (0,01 Mio. ha).

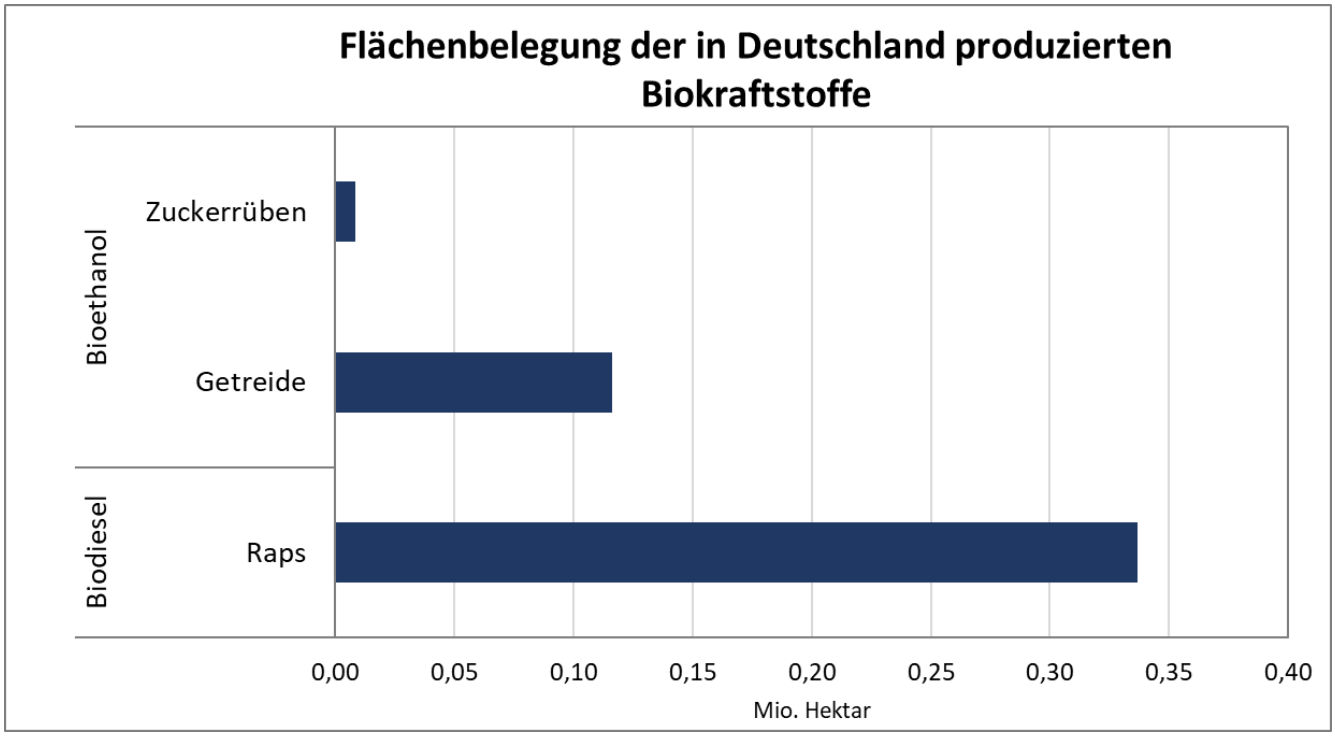

Abbildung 4: Flächenbelegung der in Deutschland in 2020 produzierten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (FNR 2021a), (ifeu o.J.))

3.1.1.4 Flächenbelegung der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe

Die gesamte Flächenbelegung der in Deutschland in 2020 eingesetzten Biokraftstoffe beträgt 1,88 Mio. ha, unter Abzug der Koppelprodukte 1,23 Mio. ha. Diese Fläche entspricht etwa der fünffachen Fläche des Saarlandes bzw. etwas weniger als der Fläche Schleswig-Holsteins. Hohe Flächenbelegungen sind mit dem Rapsanbau, dem Anbau von Ölpalmen und dem Getreideanbau verbunden. Wie aus Abbildung 5 hervorgeht, werden insbesondere durch den Anbau von Ölpalmen Flächen im Umfang von 0,35 Mio. ha belegt, größtenteils in Indonesien. Für den Anbau von Raps werden sowohl in Deutschland (0,16 Mio. ha) als auch im EU-Ausland (0,15 Mio. ha) große Flächen belegt. Darüber hinaus werden im EU-Ausland und in europäischen Ländern außerhalb der EU auf 0,17 bzw. 0,18 Mio. ha Getreide für Bioethanol angebaut.

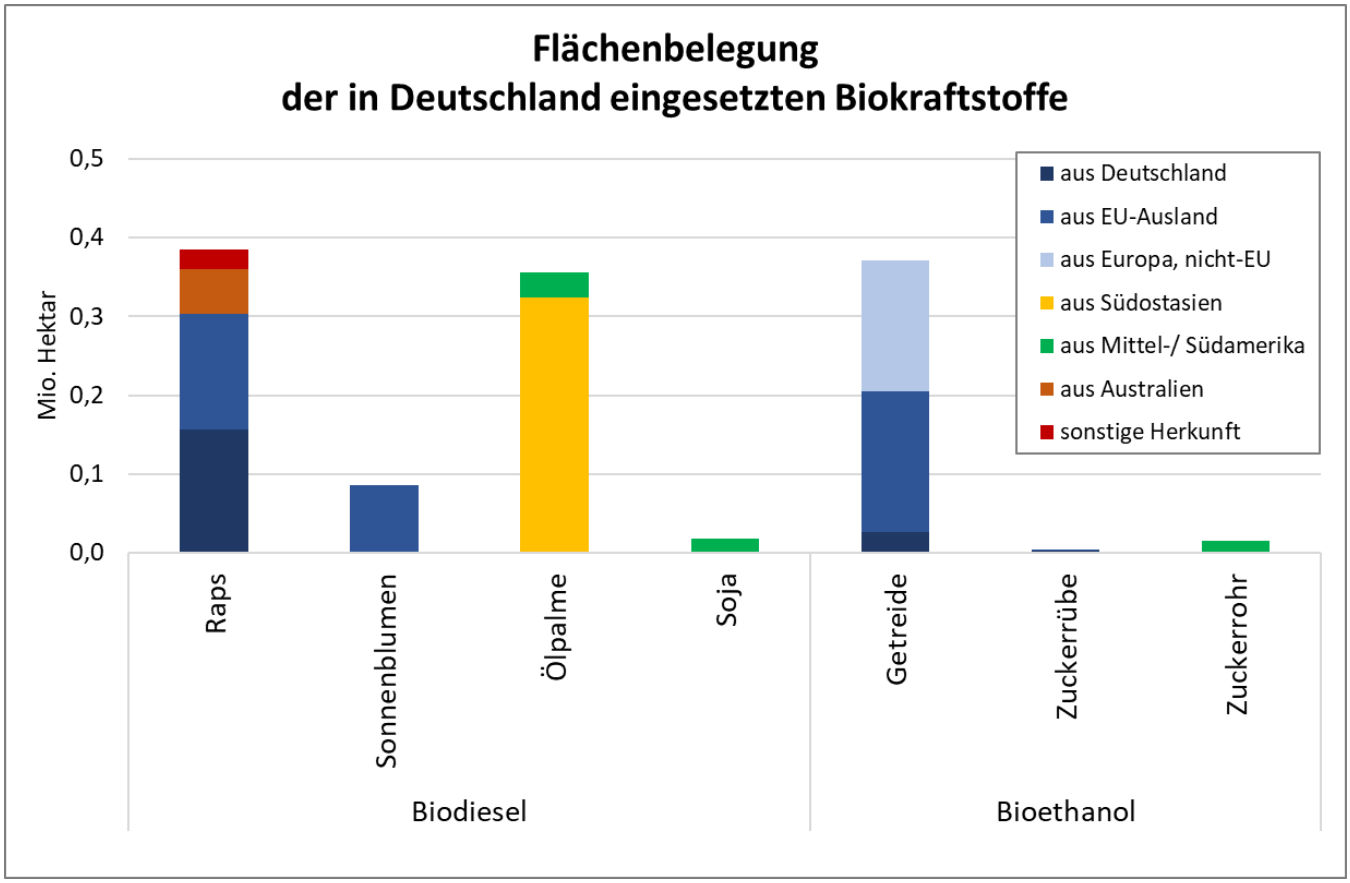

Abbildung 5: Flächenbelegung der in Deutschland in 2020 eingesetzten Anbau-Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.))

3.1.2 Substitution der Biokraftstoffe durch Elektromobilität

Hier wird nun betrachtet, wie sich der Flächenbedarf verändern würde, wenn die derzeit durch Biokraftstoffe abgedeckte Fahrleistung stattdessen durch Solarstrom für Elektroantrieb bereitgestellt würde. Die Darstellung der Fahrleistung und damit einhergehende Flächenbelegungen durch Solarenergie teilt sich ebenfalls in zwei Betrachtungsweisen. Zum einen wird die Fahrleistung auf Basis der landwirtschaftlichen Produktion Deutschlands (inkl. Exporte) betrachtet, zum anderen wird die Fahrleistung der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (inkl. Importe, exkl. Exporte) wiedergegeben.

3.1.2.1 Fahrleistung der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe

In Deutschland werden derzeit jährlich 942 Mio. Liter Biodiesel und 621 Mio. Liter Bioethanol produziert (siehe auch Kapitel 3.1.1.1). Mit dieser Menge an Kraftstoff ist in einem Kompaktklasse-Pkw eine Fahrleistung von insgesamt ca. 33.200 Mio. km möglich.

Um diese Fahrleistung zu erbringen, können auch andere Alternativen, wie beispielsweise Elektromobilität basierend auf Solarenergie, zum Einsatz kommen. Hierfür sind insgesamt 6,1 TWh Strom erforderlich. Unter der Annahme, dass der Strom durch Freiflächenphotovoltaik generiert wird, geht mit diesem Strombedarf eine Flächenbelegung von 0,01 Mio. ha einher. Gemessen an der gesamten deutschen Agrarfläche für Biokraftstoffe entspricht dies 2,9 %. Abbildung 6 stellt diese beiden Optionen der Energieerzeugung zur Erbringung von 33.247 Mio. km Fahrleistung vergleichend gegenüber. Während im Fall der Nutzung

von Biokraftstoffen die gesamte Fläche von 0,461 Mio. ha dem Anbau von Raps, Getreide und Zuckerrüben für die Bereitstellung der Fahrleistung dient, werden bei der Option Solarenergie ausschließlich 0,013 Mio. ha Fläche für die Bereitstellung derselben Fahrleistung belegt. Folglich würde sich der Flächenbedarf um über 97 % reduzieren und 0,448 Mio. ha bisherige Agrarfläche stünden für anderweitige Nutzung zur Verfügung.

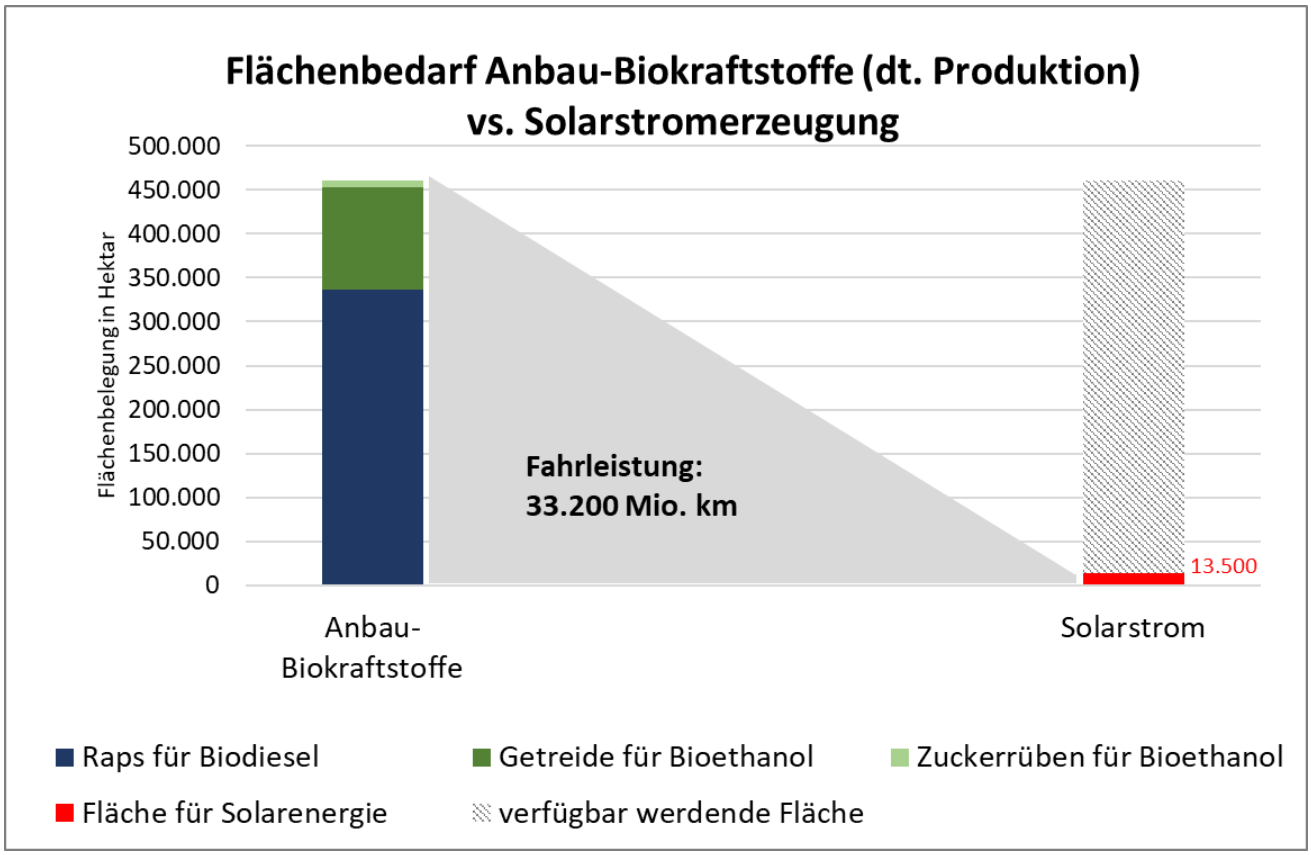

Abbildung 6: Flächenbelegung der Biokraftstoffe und der Alternative Freiflächen-Photovoltaik auf Basis der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (FNR 2021a), (ifeu o.J.), (BMEL 2020), (FNR 2021b), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b))

3.1.2.2 Fahrleistung der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe

Hier wird nun die vorangehende Berechnung mit der Biokraftstoffmenge durchgeführt, die in Deutschland eingesetzt wird, d.h. bei geringerer Flächenbelegung im Inland, dafür mit sehr viel höheren Flächenanteilen im Ausland (Palmöl aus Südostasien, Soja aus Südamerika, Sonnenblumen und Getreide aus Europa). Der Flächenbedarf beläuft sich auf 1,23 Mio. ha (siehe Kapitel 3.1.1.4). Mit der Biokraftstoffmenge ist eine Pkw-Fahrleistung von 88.500 Mio. km möglich. Ein Elektro-Pkw benötigt hierfür ca. 16,3 TWh Strom, die durch Freiflächen-Photovoltaik in Deutschland auf einer Fläche von 0,036 Mio. ha erzeugt werden können. Die in Abbildung 6 dargestellten Flächenverhältnisse wiederholen sich somit in Abbildung 7.

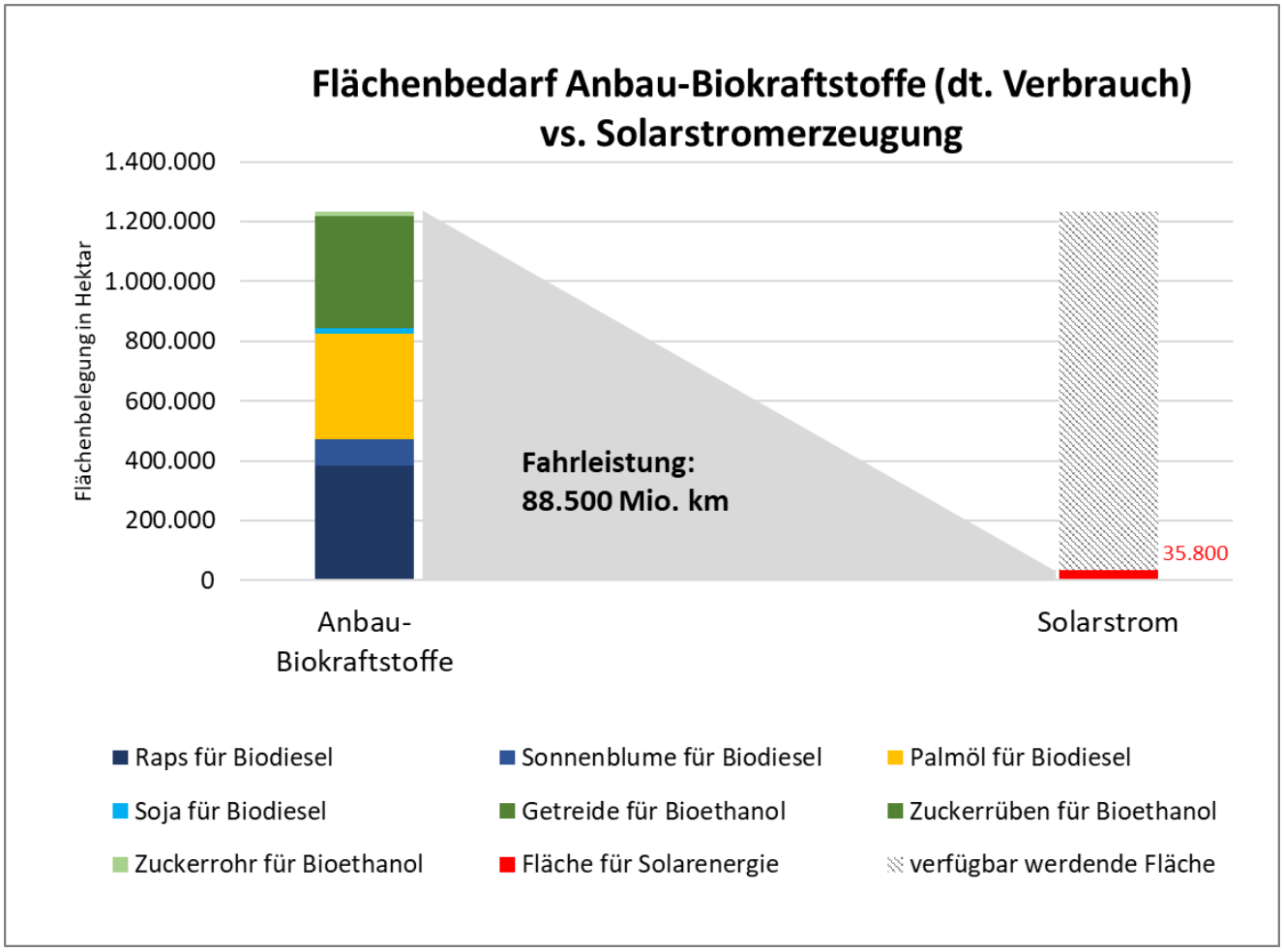

Abbildung 7: Flächenbelegung der Biokraftstoffe und Freiflächen-Photovoltaik für die Bereitstellung gleicher Fahrleistung auf Basis der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b), (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2018))

3.1.3 Entgangene Kohlenstoffspeicherung

Im nächsten Schritt wird betrachtet, welche natürlichen Kohlenstoffsenken sich prinzipiell auf den derzeit für Anbau-Biokraftstoffe belegten Flächen entwickeln könnten. Dies erfolgt analog zu bisherigen Ergebnissen zum einen für in Deutschland produzierten Biokraftstoffe (Fall (a) nach Abbildung 1) und zum anderen für die in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (Fall (b) nach Abbildung 1).

3.1.3.1 Renaturierung der Flächen der in Deutschland produzierten Biokraftstoffe

Unter der Annahme, dass die Produktion von Biokraftstoffen auf deutschen Agrarflächen unterlassen wird, stehen für eine Renaturierung in Deutschland 0,461 Mio. ha zur Verfügung. Sofern Solarstrom für Elektromobilität generiert werden soll, reduziert sich dieser Anteil wie in Kapitel 3.1.2 dargestellt auf 0,448 Mio. ha. Um in Erfahrung zu bringen welche Art von Vegetation sich auf diesen Flächen entwickeln kann, werden Informationen aus dem Konzept der Potenziellen Natürlichen Vegetation herangezogen.

Die vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) beauftragte Karte „Potentielle Natürliche Vegetation Deutschlands“ (Suck et al. 2013, 2014a; b), stellt die potenzielle Vegetation Deutschlands bezogen auf heutige Standortverhältnisse dar. Somit entspricht diese Darstellung der heutigen potenziellen natürlichen Vegetation (hpnV).

Der Karte zufolge würden sich unter heutigen Bedingungen primär Waldgesellschaften aus Buchenwäldern entwickeln. Somit kann angenommen werden, dass sich auf den Agrarflächen, die der Kraftstoffbereitstellung dienen, bei Unterlassung der Bewirtschaftung langfristig Waldgesellschaften mit Buchenwäldern entwickeln würden. Es gibt eine Vielzahl an Buchenwaldformationen, darunter nehmen die Hainsimsen-Buchenwälder innerhalb Deutschlands den größten Flächenanteil ein.

3.1.3.2 Renaturierung der Flächen der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe

Gemäß Kapitel 3.1.1 stehen weltweit insgesamt 1,23 Mio. ha für Renaturierung zur Verfügung unter der Annahme, dass auf die in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe verzichtet wird. Sofern, wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben, Flächen für die Produktion von Solarstrom für Elektromobilität reserviert werden, reduziert sich das Potenzial an zu renaturierenden Flächen auf 1,20 Mio. ha.

Auch hier wird bei Unterlassen der Nutzung von Biokraftstoffen von einer Entwicklung hin zu natürlichen Vegetationsgesellschaften auf den Flächen ausgegangen. Da sich auf diesen weltweit verteilten Flächen unterschiedliche Vegetationsformen entwickeln würden, wurden die Länder, von denen die Rohstoffe für die in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe stammen, anhand der Angaben von (BLE 2020) identifiziert. Der neueste Bericht der BLE (BLE 2021) enthält keine Aufschlüsselung der einzelnen Herkunftsländer mehr, sondern nur Informationen auf Ebene der Großregionen und Kontinente. Daher wurde an dieser Stelle auf den BLE-Bericht des Jahres 2020 zurückgegriffen.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die primären Produktionsländer der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe, einschließlich der dort kultivierten Energiepflanzen auf Basis der Angaben der BLE (BLE 2020, 2021). Darüber hinaus enthält Tabelle 5 Informationen zu sich dort potenziell entwickelnden Vegetationsformen, basierend auf einer Zuordnung der Produktionsländer in die Ökozonen in (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010). Demnach würden sich auf dem Großteil der Flächen Waldsysteme entwickeln. Während dies in Europa und Nordamerika primär Wälder der gemäßigten kontinentalen Zonen sind, können sich auf den Flächen in Südostasien und Mittel- und Südamerika vor allem sekundäre tropische Regenwälder entwickeln. In Peru und Australien wird angenommen, dass sich auf den Produktionsflächen tropisches Buschland entwickeln würde.

Tabelle 5: Überblick über die potenzielle Vegetationsentwicklung und damit verbundene Sequestrationsraten

Großraum	Land [a)]	Energiepflanzen [a)]	Potenzielle natürliche Vegetationssysteme [b)]	C-Speicherrate in t C/ha *a bei Renaturierung
Deutschland	Deutschland	Raps, Getreide, Zuckerrübe	Wald der gemäßigt-kontinentalen Zonen, Asien, Europa (>20 Jahre)	2,9
EU-Ausland	Ungarn	Raps, Sonnenblumen, Getreide, Zuckerrübe	Wald der gemäßigt-kontinentalen Zonen, Asien, Europa (>20 Jahre)	2,9
	Polen	Raps, Sonnenblumen, Getreide, Zuckerrübe	Wald der gemäßigt-kontinentalen Zonen, Asien, Europa (>20 Jahre)	2,9
Nicht-EU Europa	Ukraine	Getreide	Wald der gemäßigt-kontinentalen Zonen, Asien, Europa (>20 Jahre)	2,9
Südostasien	Indonesien	Ölpalme	tropischer Regenwald, Asien (Inseln)	5,67
Mittel-/ Südamerika	Honduras	Ölpalme	tropischer Regenwald, Nord- und Südamerika	4,6
	Peru	Zuckerrohr	Buschland, tropisch, Nord- und Südamerika	1,6
	Brasilien	Soja	tropischer Regenwald, Nord- und Südamerika	6,6
Australien	Australien	Raps	Buschland, tropisch, Australien	1,53
Sonstige Länder	Nordamerika	Raps	Wald der gemäßigt-kontinentalen Zonen, Nord- und Südamerika (> 20 Jahre)	3,1

Quelle: Berechnung des ifeu auf Basis von a) ((BLE 2020), (BLE 2021)), b) (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010)

3.1.3.3 CO_2-Opportunitätskosten von in Deutschland produzierten Anbau-Biokraftstoffen

Gemäß den Erläuterungen in Kapitel 2.3.3 errechnet sich die mittlere jährliche Kohlenstoffspeicherrate aus der Differenz der Kohlenstoffbestände der bestehenden Kulturflächen und der sich potenziell entwickelnden natürlichen Vegetation.

Tabelle 5 zeigt die daraus resultierenden jährlichen Kohlenstoffspeicherraten differenziert nach Produktionsland. Für Deutschland beträgt die gemittelte jährliche Kohlenstoffspeicherrate demnach 2,9 t C/ha·a. Diese Menge könnte im Mittel jährlich durch den Aufwuchs von natürlicher Vegetation auf den derzeit mit Anbaubiomasse belegten Agrarflächen in Deutschland und Europa gebunden werden. Das heißt: Auf den 0,461 Mio. ha, die

derzeit in Deutschland für Anbaubiomasse benötigt werden, könnten pro Jahr im Schnitt 4,9 Mio. t CO_2 gebunden werden. Unter der Annahme einer kontinuierlichen Kohlenstoffeinbindung würde der Kohlenstoffspeicher nach 30 Jahren insgesamt ca. 147 Mio. t CO_2 betragen.

3.1.3.4 CO_2-Opportunitätskosten von in Deutschland verbrauchten Anbau-Biokraftstoffen

Sofern alle Agrarflächen, die weltweit derzeit der Biokraftstoffproduktion für in Deutschland eingesetzten Biokraftstoff dienen, sich selbst überlassen würden und sich auf diesen Flächen über einen Zeitraum von 30 Jahren die in Tabelle 5 aufgeführten Vegetationsarten entwickelten, könnten im Mittel jährlich 16,37 Mio. t CO_2 gebunden werden. Die Speicherraten variieren von 1,53 t C/ha·a auf tropischem Buschland in Australien bis hin zu 6,6 t C/ha·a im tropischen Regenwald Brasiliens.

Über einen 30-Jahres-Zeitraum könnte sich so eine Kohlenstoffsenke von insgesamt 491 Mio. t CO_2 entwickeln. Vor allem in Asien, insbesondere Indonesien, könnte sich bedingt durch die hohe Flächenbelegung einerseits und andererseits durch die hohe jährliche Speicherrate ein Kohlenstoffspeicher von ca. 200 Mio. t CO_2 etablieren.

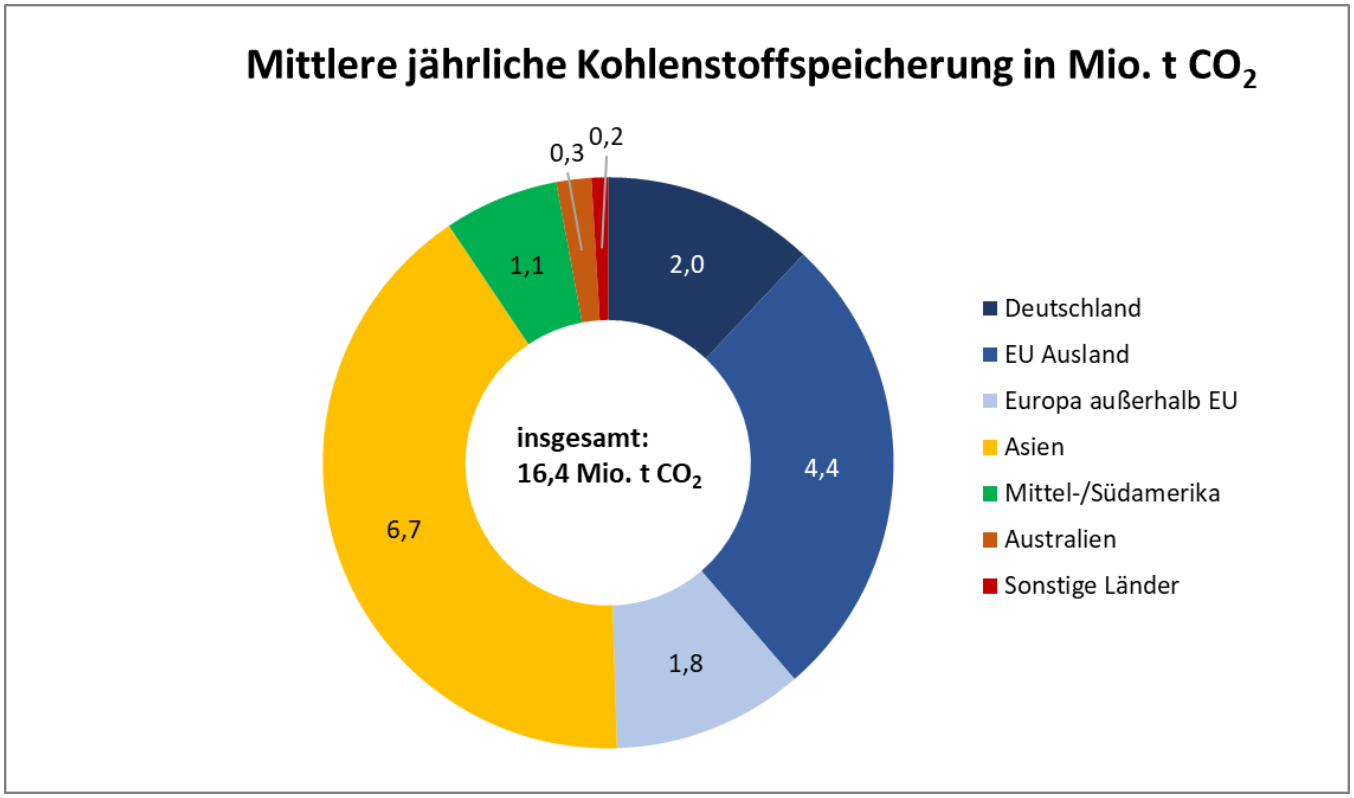

Abbildung 8: Mittlere jährliche CO_2-Speicherung durch Aufwuchs natürlicher Vegetation auf heutigen Anbauflächen für die Produktion der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe;
Darstellung ifeu; Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010)

3.1.4 Vergleiche der CO_2-Opportunitätskosten in zwei Szenarien

Die vorangehend ermittelten CO_2-Opportunitätskosten werden nun in zwei Vergleichsszenarien weiter betrachtet:

1. Vergleich
   - der amtlich berichteten Emissionseinsparung von Treibhausgasen durch Ersatz von fossilen Kraftstoffen durch Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse mit
   - der dabei entgangenen potenziellen Senkenwirkung durch Renaturierung (CO_2-Opportunitätskosten)
2. Vergleich
   - der Nutzung von Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse (anhand der amtlich berichteten Emissionseinsparungen von Treibhausgasen) mit
   - der alternativen Nutzung von solarstrombetriebener Elektromobilität, die gleichfalls fossile Kraftstoffe ersetzt, verbunden mit der Senkenwirkung durch Renaturierung durch den vermiedenen Anbau von Biomasse (mit Abzug der Fläche für den benötigten Solarstrom).

Es sei betont, dass sich die Vergleiche in den Treibhausgasbilanzen lediglich auf die Flächenbedarfe und Emissionen aus der Erzeugung der Antriebsenergie beschränken. Ein umfassender Systemvergleich, der auch die Herstellung der Infrastruktur oder der Fahrzeuge berücksichtigt, wird hier nicht erstellt. Dass deren Einbeziehung das Ergebnis nur wenig beeinflusst, haben zahlreiche weitere Studien gezeigt, z .B. (Helms et al. 2019), (Liebich et al. 2020), (EU Commission et al. 2020).

3.1.4.1 Vergleich der amtlichen Einsparung an Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe mit den CO_2-Opportunitätskosten

Gemäß den neusten amtlichen Zahlen wurden durch den Einsatz biogener Kraftstoffe in Deutschland in 2020 insgesamt **13,2 Mio. t CO_2-Äq**. eingespart (BLE 2021). Diese Zahl errechnet sich aus den durch die Bereitstellung der Biokraftstoffe entstandenen Emissionen von 2,77 Mio. t CO_2-Äq. und den durch den Ersatz der korrespondierenden Menge fossiler Kraftstoffe einsparten Emission von 15,92 Mio. t CO_2-Äq.

Bei diesen Zahlen ist zu beachten, dass ein nicht unerheblicher Anteil auf die abfallbasierten Biokraftstoffe, insbesondere aus gebrauchtem Speiseöl, entfällt. Nach Abzug von diesen verbleiben **9,21 Mio. t CO_2-Äq**. an rechnerischen THG-Emissionseinsparungen, die auf Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse beruhen.

In Abbildung 9 werden die in Kapitel 3.1.3.4 ermittelten CO_2-Opportunitätskosten der Biokraftstoffe den THG-Emissionseinsparungen gemäß (BLE 2021) gegenübergestellt. Während durch die Erzeugung und den Einsatz von aus agrarischer Biomasse erzeugten Biokraftstoffen und damit ersetzten fossilen Kraftstoffen laut amtlicher Angabe 9,2 Mio. t CO_2-Äq pro Jahr eingespart werden, würde auf der gleichen Fläche (1,23 Mio. ha in 2020) bei Unterlassen des Anbaus und dem Aufwuchs natürlicher Vegetation jährlich im Mittel etwa 16,4 Mio. t CO_2 pro Jahr gespeichert werden. Das bedeutet: Die CO_2-Kosten der Anbau-Biokraftstoffe übersteigen deutlich die berichteten CO_2-Einsparungen durch ihren Einsatz.

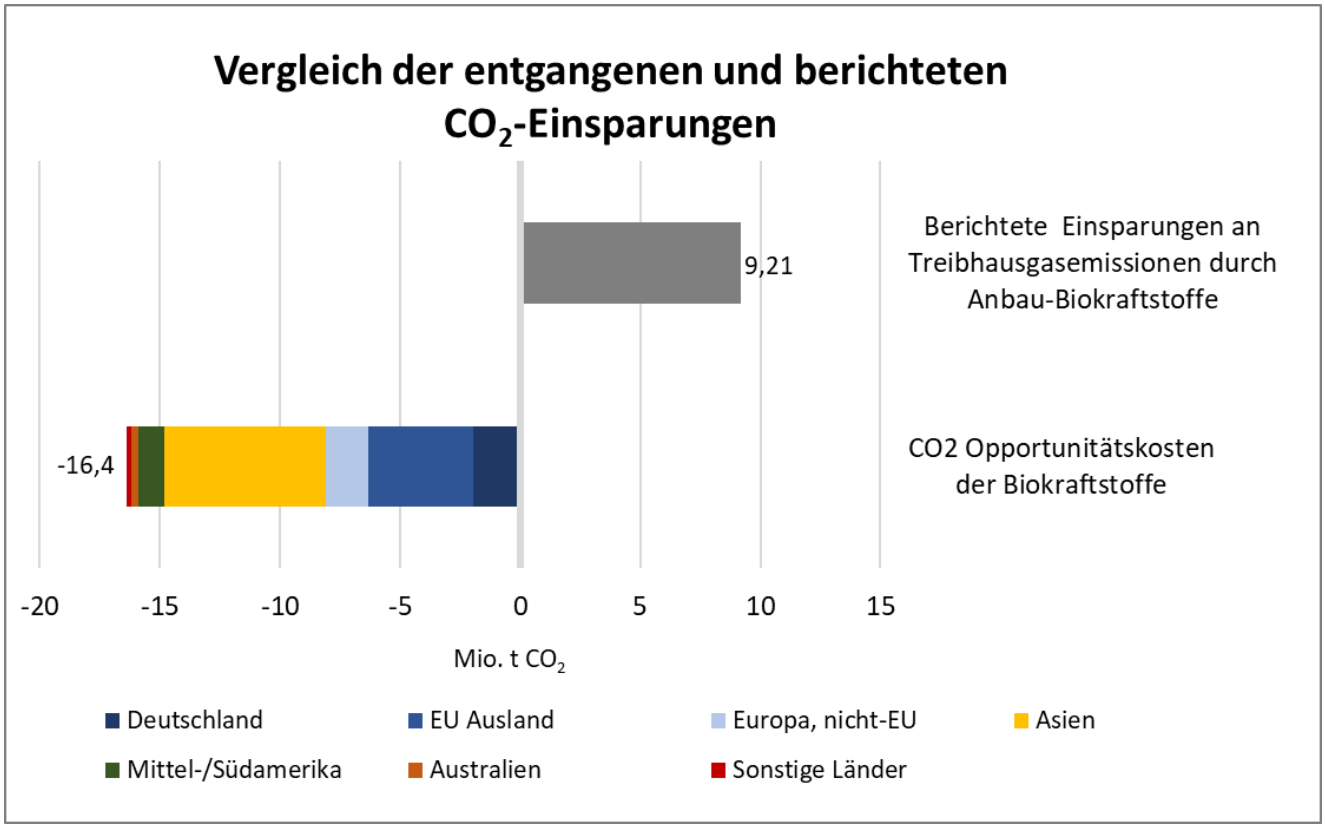

Abbildung 9: Gegenüberstellung der THG-Emissionseinsparung in Deutschland durch Anbau-Biokraftstoffe nach BLE (2021) mit den CO_2-Opportunitätskosten der Biokraftstoffe, differenziert nach Produktionsregionen
Darstellung: ifeu; Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010)

3.1.4.2 Vergleich der Einsparung an Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe mit jener durch Elektromobilität

Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Flächenbelegung durch Anbau-Biokraftstoffe mit CO_2-Opportunitätskosten verbunden ist, die die offiziellen CO_2-Einsparungen durch Einsatz von Biokraftstoffen deutlich übersteigen. In einem zweiten Szenario wird nun betrachtet, welche CO_2-Einsparungen möglich wären, wenn die derzeit durch Anbau-Biokraftstoffe abgedeckte Fahrleistung durch solarstrombetriebene Elektromobilität gedeckt würde und auf der - nach Bereitstellung der nötigen Fläche für Photovoltaik - verbleibenden Fläche natürliche Vegetation aufwachsen würde.

Aufgrund der Tatsache, dass die Fläche zur Bereitstellung von ausreichend Strom ca. 2,9 % der gesamten für die Biokraftstoffproduktion belegten Agrarfläche (1,2 Mio. ha) entspricht, reduziert sich der Flächenanteil für die Renaturierung um 2,9 %. Folglich verringert sich die jährliche Kohlenstoffbindung im Gegensatz zu den Ausführungen in Kapitel 3.1.3.4 von 16,4 Mio. t CO_2 auf 16,0 Mio. t CO_2. Abbildung 10 gibt einen schematischen Überblick über die Nettoeinsparung beider Optionen bei gleicher Fahrleistung einschließlich der dadurch belegten Flächen.

Nutzung der Biokraftstoffe: Hier setzt sich die Nettoemissionseinsparung von **9,2 Mio. t CO_2-Äq**. aus der Differenz zwischen der Emission eingesparter fossiler Kraftstoffe und der Produktionsemissionen der Biokraftstoffe zusammen.

Szenario Ersatz der Biokraftstoffe: Hier setzt sich die Nettoemissionseinsparung aus der Differenz zwischen den Emissionen eingesparter fossiler Kraftstoffe, der Emissionssenke

auf den Renaturierungsflächen und den Emissionen der Freiflächenphotovoltaikanlagen zusammen. Nach den Rechenregeln der RED werden die mit der Herstellung der Produktionsanlagen und sonstiger Infrastruktur verbundenen Emissionen nicht berücksichtigt.[1] Das bedeutet, dass für Strom aus der Photovoltaik-Anlage keinerlei Emissionen anzurechnen sind. Da wie bei der Nutzung der Biokraftstoffe auch in diesem Szenario im gleichen Maße fossile Kraftstoffe ersetzt werden, ist hier eine Emissionseinsparung von 11,5 Mio. t CO_2-Äq. anzurechnen. Hinzu kommt hier nun die Senkenwirkung durch die in diesem Szenario für eine Renaturierung frei gewordenen Flächen von 16 Mio. t CO_2. Die Nettoemissionseinsparung dieser Option beträgt folglich insgesamt **27,5 Mio. t CO_2-Äq.**

Abbildung 10 stellt die Nettoemissionseinsparung der Nutzung von Biokraftstoffen jener aus einem alternativen Antrieb mit E-Mobilität mittels Solarstrom gegenüber. Hinsichtlich der Angabe von 0 Mio. t CO_2-Äq. für die Produktionsemissionen von Solarstrom sei nochmal auf die Erklärung anfangs von Kapitel 3.1.4 hingewiesen, wonach bei der Betrachtung hier insgesamt keine Emissionen aus der Herstellung von Anlagen berücksichtigt sind.

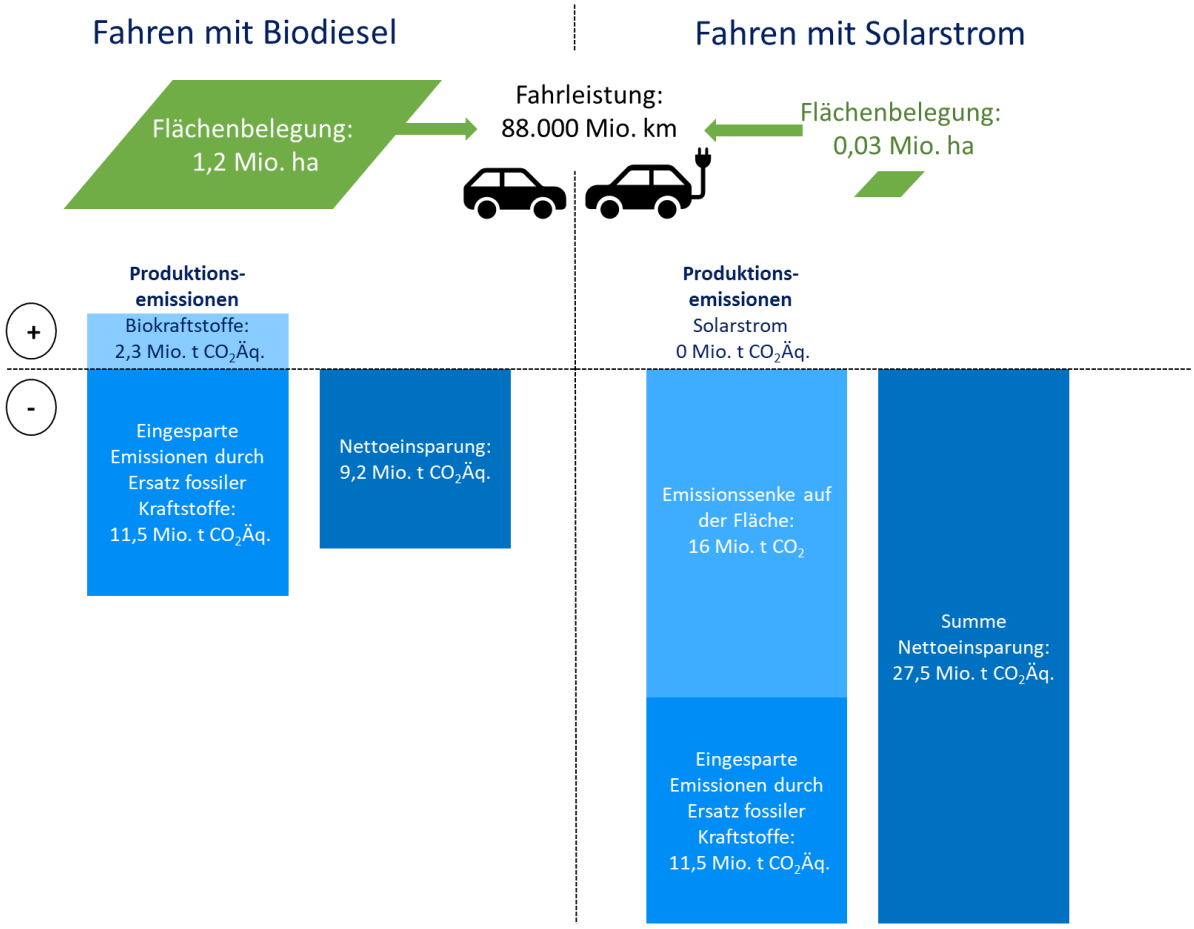

Abbildung 10: Schematische Darstellung der jährlichen Nettoemissionseinsparung der Option Nutzung der Biokraftstoffe (links) und Ersatz der Biokraftstoffe (rechts) (Quelle: Berechnungen des ifeu auf Basis von Daten von (BLE 2021), (ifeu o.J.), (Helms et al. 2019), (Fehrenbach et al. 2021b), (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union 2018))

[1] Richtlinie Anhang V, Teil C, Nr. 1a)

3.2 Weitere ökologische Aspekte

Die Gegenüberstellung von eingesparten THG-Emissionen bzw. entgangenen Speicherleistungen stellt „lediglich“ auf den Aspekt des Klimaschutzes dar. Bei der Gegenüberstellung von Agrarflächen und sich natürlich entwickelnden Flächen sind jedoch noch eine Reihe weiterer Faktoren zu beachten, wie insbesondere:

1. Auswirkungen der intensiven Landwirtschaft auf die Biosphäre, Pedosphäre, Atmosphäre, Hydrosphäre
   - Eintrag von **Stickstoff und anderen Düngemitteln**, die zu unerwünschten Einträgen von Nitrat in Grund- oder Oberflächengewässer oder zu Luftschadstoffemissionen mit versauernder oder eutrophierender Wirkung führen können.
     So nennt der Sachverständigenrat in Umweltfragen (SRU 2015) in seinem Sondergutachten die überhöhten Nährstoffeinträge zuallererst als Bedrohung für die Biodiversität– noch vor Auswirkungen auf die Gesundheit (NO_X in der Luft und Nitrat im Trinkwasser) und das Klima (Lachgas).
   - Eintrag von **Pestiziden**, die ebenfalls in benachbarte Ökosysteme übertragen werden können und die somit auf die Biodiversität Einfluss haben.
     Das Thema Pestizide hat insbesondere im Zusammenhang mit dem Rückgang von Insekten und dem Bienensterben breite Aufmerksamkeit bekommen. Während in spezifischen Fällen, wie bei den Neonicotinoiden, die Zusammenhänge relativ eindeutig beschrieben sind ((Hallmann et al. 2017), (Woodcock et al. 2017)), stellt die Vielzahl an Insektiziden, Herbiziden und Fungiziden in der Landwirtschaft in Menge und auch möglichen Kombinationswirkungen ein Problem dar (BfN 2018).
2. Ökosystemleistungen naturnaher Wälder
   - Die **ökologische Qualität des Lebensraums** selbst, d.h. die Ökosystemqualität und Biodiversität zwischen mehr oder weniger intensiv genutzter Agrarfläche und einem sich natürlich entwickelnden System unterscheidet sich sehr stark und ist maßgeblich für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Naturnahe Wälder bringen eine Bandbreite an Ökosystemleistungen, wie beispielsweise die Klimawandelanpassung oder die Regulation des Wasserhaushalts mit sich. Von Seiten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit bestehen bereits Vorschläge für die Honorierung solcher Ökosystemleistungen (BMU 2021).

Vor der Industrialisierung galt die Landwirtschaft in Deutschland lange Zeit als Garant für die Arten- und Biotopvielfalt in der offenen Kulturlandschaft, die aufgrund ihres Abwechslungsreichtums an Habitaten auch höhere Artenvielfalt gegenüber einem reinen natürlichen mitteleuropäischen Waldsystem aufwies. Doch mit der Intensivierung im Anbau zählt sie heute zu den Haupttreibern für den Verlust an biologischer Vielfalt. Sorgten früher kleine Ackerschlaggrößen, Flurgehölze oder Saumbiotope aller Art für diese Vielfalt, so ist diese insbesondere in den ackerbaulichen Gunstregionen und in den Intensivtierhaltungsregionen nur noch selten anzutreffen (UBA 2015). Nach Aussagen von (Beckmann et al. 2019) geht mit einer Ertragssteigerung um 85 % auf einer zuvor „mittelintensiv“ genutzten Fläche, ein Artenverlust vom ca. 22 % einher. Auch dem Bericht zur Lage der Natur des Bundesumweltministeriums (BMU 2020) zufolge ist der Anbau von Energiepflanzen mit ein Treiber des schlechten Erhaltungszustandes der Lebensräume.

Wie die vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) veröffentlichten Roten Listen der gefährdeten Tier-, Pflanzen- und Pilzarten in Deutschland belegen, haben in den vergangenen Jahrzehnten sowohl die Artenvielfalt der Insekten als auch deren Häufigkeit abgenommen. Die Gefährdungsursachen sind vielfältig und komplex. Der Rückgang der Insektenvielfalt geht mit dem oben bereits beschriebenen quantitativen Verlust und der qualitativen Verschlechterung der Lebensräume einher. Die vom BfN genannten Hauptfaktoren sind:

- die quantitativen Verluste von Lebensräumen durch Nutzungsänderungen
- die qualitativen Verschlechterungen von Habitaten in Folge der Beseitigung oder Veränderung von Habitatstrukturen sowie Fragmentierung
- die Intensivierung der Bewirtschaftung, die überhöhten Nährstoff- und Schadstoffeinträge sowie des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln

Damit führt das BfN einen erheblichen Teil der Einflussfaktoren auf die Art und die Intensität der Landbewirtschaftung zurück (BfN 2015).

Hemerobiebewertung

Das Maß an Intensität bzw. an Eingriffsstärke in die natürliche Selbstregulation von Ökosystemen lässt sich auch im Rahmen der Ökobilanzmethode quantifizieren. Für dieses Maß hat sich der Begriff der *Hemerobie* etabliert, der eben dieses Maß an menschlichem Eingriff im Sinne einer Naturferne beschreibt.

Mit der in Kapitel 2.3.4 beschriebenen, von (Fehrenbach et al., 2021) vorgeschlagenen Methodik, liegt der Grad an Naturferne der Agrarflächen für die Produktion der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe bei einem Faktor 0,39 (auf einer Skala von 0 – natürlich bis 1 – künstlich). Dies beinhaltet die Flächen für Raps, Weizen, sowie auch Palmöl und die übrigen Agrarrohstoffe. Die Anbaufläche von 1,23 Mio. ha entspricht somit 0,48 Mio. ha Äquivalenten an artifizieller Fläche. Anstelle dessen würde ein sich natürlich und ungestört entwickelndes Waldökosystem keine negative Wirkung aufweisen (Faktor 0 und damit 0 ha Äquivalente an artifizieller Fläche). Die ökologischen Opportunitätskosten lägen in diesem Fall bei 0,48 Mio. ha Äquivalente an artifizieller Fläche. Das wäre gemessen an der Eingriffsstärke somit gleichbedeutend mit zusätzlichen 0,48 Mio. ha Versiegelung. Nach Umweltbundesamt liegt die real versiegelte Fläche in Deutschland bei 5,1 Mio. ha (UBA 2021). Die in Hemerobie gemessenen ökologischen Opportunitätskosten des Biokraftstoffanbaus lägen somit bei nahezu 10 % der bestehenden Lasten durch die Versiegelung in Deutschland.

4 Diskussion

Die vorliegende Studie hat Fragen nach Umfang und Ausmaß der deutschen Biokraftstoffe, deren Substitution durch Alternativen und die Frage nach entgangenen natürlichen Kohlenstoffsenken und weiteren ökologischen Aspekten analysiert. In der hier erfolgenden Diskussion werden im Übrigen auch Einschränkungen und Grenzen dieser Analysen erörtert.

Bestandsaufnahme

Für die Bestandsaufnahme, d.h. die Darstellung der Biokraftstoffmengen und Flächenbelegungen bilden die Ergebnisse nach unserem aktuellen Kenntnisstand die erste umfassende Darstellung der aktuellen Situation der Biokraftstoffe ab. Hierbei erfolgte erstmalig ein direktes Gegenüberstellen der in Deutschland eingesetzten und produzierten Biokraftstoffe. Dieser Darstellung wurden die Originaldaten der BLE (122 PJ aus Anbaubiomasse) und FNR (782.000 Hektar Fläche für Biokraftstoffe) zugrunde gelegt. Um den Bestand auf Ebene der Biokraftstoffmenge in die Energieeinheit Petajoule (PJ) und der Flächenbelegung in ha wiederzugeben, wurde auf Ertragswerte, Umwandlungswerte und Allokationsfaktoren des BMEL, der FNR sowie BioGrace zurückgegriffen (siehe Kapitel 2.2), d.h. es wurde im Rahmen dieser Studie, so weit wie möglich, auf amtliche Daten zurückgegriffen. Außerdem wurde im Zweifel konservativ, d.h. zu Gunsten der Biokraftstoffe, bilanziert. So wurden auch bei der Ermittlung des Flächenbedarfs für die Biokraftstoffe die ebenfalls entstehenden Koppelprodukte (z.B. Rapsschrot) durch Allokation in Linie mit den RED-Regeln eingerechnet und die Gesamtfläche entsprechend nur anteilig der Produktion von Biokraftstoff zugerechnet.

Beim Umgang mit den Daten wie auch bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass sich die Produktionsmengen von Biokraftstoffen aus auf Ackerflächen in Deutschland angebauten Rohstoffen erheblich von den in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffmengen und -arten unterscheiden. Erstere beruhen auf Daten der FNR und beinhalten die exportierten Mengen. Zweitere gehen auf die von der BLE mit dem NaBiSy-Register erfassten Daten zurück, welche den hohen Anteil an importierten Biokraftstoffen oder aus importierten Rohstoffen erzeugten Biokraftstoffen beinhalten. Für ein besseres Verständnis von Import und Export können Daten der GENESIS-Datenbank des Statistischen Bundesamts (Destatis 2021) hinzugezogen werden. Sie geben aber keinen Aufschluss zu den Herkunftsländern und differenzieren lediglich zwischen Biodiesel und Bioethanol. So wurden nach der GENESIS-Datenbank in Deutschland im Jahr 2020 Biodiesel und Bioethanol in Höhe von umgerechnet 131 PJ hergestellt, inklusive der aus importierten Rohstoffen (z.B. Palmöl oder Getreide) erzeugten Biokraftstoffe. Etwa die Hälfte dieser Produktion wurde exportiert. Nach den Zahlen von Destatis verbleiben davon insgesamt ca. 72 PJ Biokraftstoffe in Deutschland. Die Angaben aus Destatis ergänzen das Bild der Bestandsaufnahme, da sie das Verhältnis aus Importen und Exporten wiedergeben, was anhand der Daten der BLE und FNR nicht möglich ist.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die oben erwähnten 122 PJ Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse, die Deutschland im Jahr 2020 zur Quotenerfüllung angerechnet wurden, einem Anteil von 5,3 % am Endenergieverbrauch in Verkehr in Deutschland in 2020 entsprechen.[1] Nach dem *Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote* (Bundestag 2021) ist für diese Art Biokraftstoffe eine Deckelung bei 4,4 % ab dem Jahr 2022 vorgeschrieben. Die Menge in 2020 liegt somit deutlich über dieser Grenze. Außerdem lag der Anteil von Biokraftstoffen auf Palmölbasis bei über 50 %. Das Gesetz schließt ab dem Jahr 2023 Palmöl von der Anrechenbarkeit aus. Gleichzeitig verpflichtet es bis zum Jahr 2030 zu einer Treibhausminderung von 25 % beim Energieeinsatz im Verkehr. Dadurch wird der Druck, möglichst hohe Anteile an Biokraftstoffen zur Anrechnung zu bringen, bestehen bleiben. Offen ist, welche Rohstoffe dann zur Erfüllung der Quotenanforderungen herangezogen werden.

Kritische Betrachtung der berichteten Emissionseinsparungen durch Anbau-Biokraftstoffe

Es sei an dieser Stelle außerdem darauf hingewiesen, dass der Hintergrund dieser als amtlich geltenden Werte, die über die Berechnungs- und Zertifizierungsvorgaben gemäß der RED seitens der Marktakteure erstellt wurden, nicht transparent sind. So entwickeln sich die Emissionswerte für mehrere Biokraftstoffarten seit einigen Jahren deutlich nach unten – was einerseits wünschenswert ist und auch Ziel der rechtlichen Umsetzung der RED in Deutschland über die THG-Minderungsquote. Andererseits sind die Werte z.T. trotz der stichprobenweisen Überprüfung seitens der BLE ohne Kenntnis der zu Grunde liegenden Basisdaten nicht plausibel. Zum Beispiel liegen die Emissionswerte für die Erzeugung von Ethanol auf Basis von Getreide extrem niedrig: für Ethanol auf Basis von Weizen sogar bei lediglich 3,16 g CO_2-Äq/MJ. Dabei ist zu beachten, dass für den Anbau von Weizen bezogen auf das daraus erzeugte Ethanol bereits um die 20 g CO_2-Äq./MJ (EC - European Commission o.J.)[2] verursacht werden.

Diese Absenkung wird in der Praxis der THG-Berechnung durch die Anrechnung des bei der Vergärung zu Ethanol entstehenden CO_2 erreicht. Ob diese Praxis jedoch tatsächlich mit der Vermeidung von stattdessen erzeugtem fossilem CO_2 verbunden ist, wird nicht nur seitens des Berichts der Bundesregierung (2019) über die Umsetzung und Effekte der Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung angezweifelt, der u.a. folgende Aussage enthält: „Die hohe THG-Einsparung beim Bioethanol ist u.a. Ergebnis von CO_2-Gutschriften für die externe Verwendung des prozessbedingt entstehenden biogenen CO_2. Da klare Bilanzierungsregeln dazu nicht vorliegen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Substitution von konventionellem CO_2 zu hoch ausfällt.“ Seit dem Bericht der Bundesregierung haben sich die THG-Einsparungen beim Bioethanol weiter deutlich vergrößert, ohne dass inzwischen klare Bilanzierungsregeln vorliegen. Es ist daher zu befürchten, dass diese Einsparwerte allein schon wegen dieser Berechnungspraxis deutlich überschätzt sind.

Vergleich der Flächenbelegung durch Biokraftstoffe mit Erzeugung von Solarstrom für E-Mobilität

Die Flächenbelegung der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe (Basis: die Daten der BLE) beträgt nach den Berechnungen dieser Studie ca. 1,2 Millionen Hektar, wobei die Flächen aufgrund der importierten Biokraftstoffe überwiegend im Ausland liegen. Würde

---

[1] Nach der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB 2021) lag der Endenergieverbrauch in Verkehr (ohne Flug- und Schiffsverkehr) in Deutschland in 2020 bei 2.292 PJ.

[2] Während die Marktteilnehmer zwar seit einigen Jahren statt der Defaultwerte selbst errechnete THG-Werte für ihre Biokraftstoffe errechnen, so werden für den Anbau keine Werte selbst gerechnet, sondern üblicherweise die in vorausgehender Fußnote referenzierten sogenannten NUTS2-Werte verwendet (siehe auch (Deutscher Bundestag 2019)).

man die damit verbundene Fahrleistung bei gleicher Fahrzeugklasse durch Elektromobilität auf Basis von Solarenergie bereitstellen, würde man nur knapp 3 % dieser Fläche benötigen. Dabei wird von Freiflächenanlagen-Photovoltaik ausgegangen, unter Verwendung von Daten von (Fehrenbach et al. 2021b). Mit anderen erneuerbaren Energiequellen, wie z.B. Windenergie, wäre der Flächenbedarf noch geringer.

Renaturierungspotenziale

Die Renaturierungspotenziale wurden anhand der zwei Betrachtungsebenen (in Deutschland angebaute und in Deutschland eingesetzte Biokraftstoffe) ermittelt. Im ersten Fall stehen hierfür 0,461 Mio. ha, im zweiten Fall 1,2 Mio. ha bei Unterlassen der Biokraftstoffproduktion zur Verfügung. Unter der Annahme, dass auf diesen Flächen auch Solarstrom für Elektromobilität zum Ersatz der Biokraftstoffe produziert werden soll, reduzieren sich diese Flächen jeweils um 3 %.

Die Autor*innen betonen, dass es sich bei dieser Betrachtung um das Ermessen eines Potenzials handelt. Die konkreten Flächen, auf denen z.B. im Jahr 2020 Rohstoffe für Biokraftstoffe angebaut wurden, sind im Einzelnen nicht bekannt. In den Vor- und Folgejahren können hierfür auch andere Flächen belegt gewesen sein. Dementsprechend pauschal erfolgt auch die Annahme der sich potenziell entwickelnden Vegetationsformen. Aufgrund der Tatsache, dass die Angaben der (BLE 2021) nur nach Kontinenten und nicht nach Ländern oder Regionen differenziert vorliegen, musste die Identifikation der Produktionsländer auf Basis des BLE-Berichts der Vorjahre erfolgen. Hierdurch entsteht eine Datenunsicherheit, da nicht garantiert werden kann, dass die Produktionsländer aus 2020 auch denen im Jahr 2021 entsprechen. Unsicherheiten bestehen aufgrund mangelnder Informationen ebenfalls bei der Zuordnung der Energiepflanzen Sonnenblume, Zuckerrübe und Zuckerrohr zu Produktionsländern. Allerdings nehmen diese Energiepflanzen keinen signifikanten Anteil an der gesamten Biokraftstoffmenge ein (siehe 3.1.1.2).

Die Daten zu den Kohlenstoffspeichern wurden dem Amtsblatt der EU-Kommission entnommen (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010). Sie basieren weitgehend auf IPCC-Daten und entsprechen der großräumlichen Differenzierung, die sowohl im Rahmen der RED wie auch des IPCC als offizielle Grundlage gilt.

Neben der Option diese Flächen sich selbst zu überlassen, bestehen grundsätzlich weitere sinnvolle Maßnahmen wie beispielsweise die Umwandlung in Ökolandbauflächen oder Agroforstwirtschaft. Auch besteht die Möglichkeit der gezielten Aufforstung der verbleibenden Flächen, um diese somit einer Waldbewirtschaftung zuzuführen.

Der Ansatz, die potenziell freiwerdenden Flächen sich selbst zu überlassen, wurde hier gewählt, da er sowohl den Klimaschutz als auch weitere ökologische Aspekte adressiert. So befindet er sich auch im Einklang mit der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt (BMUB 2015) mit dem Ziel, den Anteil natürlicher Landlebensräume durch beispielsweise Wiedervernässung und Renaturierung um 10 % zu erhöhen. Die (Bundesregierung o.J.) betont im Rahmen des Klimaschutzgesetzes, dass natürliche Senken wie Wälder gestärkt werden sollen. Im Rahmen des Aktionsprogramms „Natürlicher Kilmaschutz“ wird sogar explizit die Wiederherstellung degradierter Ökosysteme gefordert (Deutscher Bundestag 2021). Auch auf europäischer und internationaler Ebene rückt die Forderung nach Renaturierung immer weiter in den Fokus. So werden aktuell gesetzliche Festlegungen zu verpflichtenden Renaturierungszielen auf Ebene der EU erwartet (EC - European Commission o.J.). Auf internationaler Ebene haben (UNEP und FAO o.J.) die Dekade der Renaturierung ausgerufen. Auch während der COP26 in Glasgow war der Kohlenstoffspeicher des Waldes ein zentrales Thema und es wurde ein Pakt zum Schutz der Wälder beschlossen, der von mehr als 100 Staaten unterzeichnet wurde. Dieser Pakt sieht vor, bis 2030 die Zerstörung von Wäldern und anderen wertvollen Ökosystemen zu beenden, da Wäldern im Klimaschutz eine besondere Rolle hinsichtlich ihrer Kohlenstoffspeicherung zukommt (Taylor et

al. 2021; UKCOP26.ORG 2021). Somit kann davon ausgegangen werden, dass auch auf politischer Ebene die Rolle des Kohlenstoffspeichers natürlicher Vegetationsarten ein zunehmend aktuelles Thema wird.

CO_2-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen

Im Rahmen der Studie wurden mittlere jährliche Kohlenstoffspeicher von 5 bzw. 16 Mio. t CO_2 auf den Renaturierungsflächen ermittelt, je nachdem ob der inländische Anbau (nach FNR) oder der inländische Einsatz (nach BLE) der Biokraftstoffe betrachtet wurde. Die Menge von 16 Mio. t CO_2 entspricht ca. 2,2 % der gesamten deutschen Treibhausgasemissionen. Somit könnte prinzipiell durch die Umsetzung der Option Renaturierung auf derzeitigen Agrarflächen für Biokraftstoffe ein nicht unerheblicher Anteil an Treibhausgasen sequestriert werden. Es liegen verschiedene Arbeiten zu regionalen Kohlenstoffspeicherraten im globalen Kontext vor (z.B. (Cook-Patton et al. 2020)). Als Grundlage für die hier vorliegenden Abschätzungen wurden die Speicherraten aus dem Beschluss der (EUROPÄISCHE KOMMISSION 2010) entnommen, da dieser als amtliche Grundlage für Treibhausemissionsberechnungen nach RED gilt. Die Werte der jährlichen Speicherraten sind mit gewissen Unsicherheiten verbunden, wodurch abweichende Speicherwerte grundsätzlich möglich sind. Die Unsicherheiten gründen einerseits in den Kohlenstoffbeständen der Agrarflächen und Wald- bzw. Buschlandflächen, andererseits in der Annahme, dass sich der jeweilige Kohlenstoffbestand der Vegetationsformen innerhalb von 30 Jahren entwickelt.

Den Autor*innen ist bewusst, dass eine Kohlenstoffeinbindung kein konstanter Prozess ist und gewissen Schwankungen unterliegt, genauso wie die Tatsache, dass Kohlenstoffbestände in Agrar- oder Waldsystemen differenzierter betrachtet andere Werte aufweisen werden. Somit möchten die Autor*innen betonen, dass die Kohlenstoffspeicher als potenzielle Speicher aufgefasst werden. Jedoch entsprechen die Angaben zu Kohlenstoffbeständen den amtlichen Angaben, die auch den offiziellen Berichterstattungen zugrunde gelegt werden. Die Annahme, dass innerhalb von 30 Jahren der Kohlenstoffbestand der Vegetationsformen erreicht werden soll, stellt eine Vereinfachung dar. Vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse zur Regenerationsfähigkeit tropischer Wälder (Heinrich et al. 2021) erscheint dieser Betrachtungszeitraum in jedem Fall für die tropischen Regionen als plausibel. Die Autor*innen merken an, dass sich die Kohlenstoffspeicherung räumlich und zeitlich weitaus dynamischer und differenzierter gestaltet. Beispielsweise kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb der ersten 10 Jahre in den Tropen eine stärkere Kohlenstoffeinbindung erfolgt als in den gemäßigten Breiten. Somit entsprechen die Angaben zur Kohlenstoffspeicherung der Tropen tendenziell eher einer Unterschätzung, während die der gemäßigten und borealen Gebiete eher einer Überschätzung ähneln.

Es sei im Übrigen betont, dass der in dieser Studie ermittelte Kohlenstoffspeicher nicht den Bodenkohlenstoff beinhaltet. Dieser kann je nach Region einen erheblichen Anteil am gesamten Kohlenstoffbestand in Waldsystemen ausmachen. Ein schematischer Überblick wird in (Neufeld 2022) gegeben. Demnach variieren die Kohlenstoffbestände im Boden von 96 t C/ha in gemäßigten Wäldern bis zu 344 t C/ha in borealen Wäldern und 643 t C/ha bei Mooren. Bodenkohlenstoffvorräte bei Kulturflächen betragen dagegen maximal 80 t C/ha. Vor dem Hintergrund, dass aufgrund mangelnder Datengrundlagen Bodenkohlenstoff nicht miteingerechnet werden konnte, erscheint das Gesamtergebnis – auch vor dem Hintergrund der 30-jährigen Kohlenstoffeinbindung – als konservativ. (Cook-Patton et al. 2020) zufolge entsprechen die von amtlicher Seite her offiziellen Angaben der Kohlenstoffspeicherung des IPCC sogar einer Unterschätzung.

In einer Literaturstudie zur Vorbereitung der Aktualisierung des Biomassepositionspapiers des Umweltbundesamts (Nr. 127447) (Fehrenbach et al. 2021a)[1] werden verschiedene Optionen der Kohlenstoffspeicherung auf der Fläche und in Produkten untersucht und gegenübergestellt. Insbesondere die Option Aufforstung mit einer jährlichen Kohlenstoffspeicherrate von 2,8 t C/ha nach (Paul et al. 2009) korrespondiert mit der in dieser Studie ermittelten durchschnittlichen jährlichen Kohlenstoffspeicherrate durch Renaturierung von 2,9 t C/ha. Es ist durchaus möglich, dass durch das Durchführen von Initialmaßnahmen wie beispielsweise von naturnaher Aufforstung ein noch schnellerer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden könnte.

THG-Emissionseinsparungen versus CO_2-Opportunitätskosten

Die Studie stellt die jährlichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe von 9,21 Mio. t CO_2-Äq. den CO_2-Opportunitätskosten im Umfang von 16,37 Mio. t CO_2 gegenüber. Dieser Vergleich verdeutlicht, dass auf eine signifikante potenzielle Kohlenstoffsenke verzichtet wird, wenn Ackerfläche für die Produktion von Biokraftstoffen verwendet wird. (Righelato und Spracklen 2007) kommen in ihrer Studie zu ähnlichen Erkenntnissen. Nach deren Bilanzen ist die Kohlenstoffspeicherrate bei Renaturierung zwei- bis neunmal höher als die THG-Emissionseinsparungen von Biokraftstoffen. Diese Bandbreite zeigt, dass die in der vorliegenden Studie dargelegten CO_2-Opportunitätskosten auf eher konservativer Basis ermittelt sind.

Die Aussage, dass das Renaturierungspotenzial von Flächen die THG-Emissionseinsparung der von der Biomasse dieser Flächen erzeugten Biokraftstoffe übersteigt, bestätigen auch (Evans et al. 2015) und ermöglichen dabei eine differenziertere Betrachtung. Gerade bei ertragsschwachen Produktionssystemen für Biokraftstoffe (z.B. auf Basis von Mais) liegt das Renaturierungspotenzial deutlich über den Einsparungen der Biokraftstoffe. Eher umgekehrt verhält es sich dagegen bei ertragsstarken Produktionssystemen wie beispielsweise Bioethanol auf Basis von Zuckerrohr. Da im Rahmen dieser Studie primär ertragsschwache Produktionssysteme auf Basis von Getreide und Rapsöl (siehe Kapitel 3.1.1.2) zum Einsatz kommen, kann die Kernbotschaft der vorliegenden Studie als robust erachtet werden.

Wie oben angeführt, darf gemäß Treibhausgasminderungsquoten-Gesetz (Bundestag 2021) ab 2023 Biokraftstoff aus Palmöl in Deutschland nicht mehr angerechnet werden. Es ist davon auszugehen, dass der bisherige Anteil von Palmöl durch andere Energiepflanzen wie Raps oder Soja ersetzt wird. Im Falle von Soja würden noch höhere CO_2 -Opportunitätskosten entstehen.

Bleibendes Problem Landnutzungsänderung

In dieser Studie wurden Treibhausgasemissionen durch Landnutzungsänderung in Folge von Anbau-Biokraftstoffen nicht weiter betrachtet. Mit dem künftigen Ausschluss von Palmöl und der gesetzlichen Deckelung der Anbau-Biokraftstoffe auf 4,4 % am Endenergieverbrauch im Verkehr könnte man annehmen, dass sich damit das Thema der sogenannten *indirekten Landnutzungsänderung* (iLUC) erübrigt hätte. Doch es liegt gerade im Prinzip von iLUC, dass der direkte Zusammenhang zwischen dem konkreten Anbau und dem Endprodukt aufgelöst ist. Die Effekte kommen vielmehr durch globale Marktmechanismen zustande. Verlagert sich die Nachfrage nach Pflanzenöl für Biodiesel von Palmöl zu mehr Rapsöl, dann steigt weiterhin der globale Flächenbedarf, der schließlich dort gedeckt wird, wo weitere Flächen erschlossen werden können. Diese liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit dort, wo die Entwaldungsraten bereits hoch sind.

[1] noch unveröffentlicht, eine Veröffentlichung in 2022 ist vorgesehen

Die Modellierung solcher globalen Marktmechanismen ist mit vielen Variablen verbunden. Daher liegen die Ergebnisse der iLUC-Studien in großen Bandbreiten. Aufgrund dieser Unsicherheiten sind auch weiterhin Risiken durch iLUC nicht auszuschließen.

Weitere ökologische Aspekte

Mit der landwirtschaftlichen Produktion sind nicht nur unmittelbar negative Auswirkungen auf die Biodiversität verbunden (IPBES 2019), sondern auch viele weitere Wirkungen, wie Ökobilanzen zeigen. Eine dieser Wirkungskategorien wird in Kapitel 3.2 in Form des Naturfernepotenzials ausgedrückt. Dort wurde Anbaufläche für die in Deutschland eingesetzten 1,23 Mio. ha umgerechnet in 0,48 Mio. ha Äquivalente an artifizieller Fläche, die dem ökologischen Wert von versiegelter Fläche gleichkommt. Das wäre nahezu ein Zehntel der tatsächlich versiegelten Fläche in Deutschland.

Auch in weiteren Wirkungskategorien sind die Ergebnisse für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse grundsätzlich nachteilig. Bereits die ersten Ökobilanzen zu der Thematik (Kaltschmitt und Reinhardt 1998) zeigten, dass Biokraftstoffe allein aufgrund der Düngemaßnahmen (Düngerproduktion und Emissionen bei der Düngung selbst) in den Kategorien Eutrophierungs- wie auch im Versauerungspotenzial schlechter abschneiden als fossile Kraftstoffe.

5 Zusammenfassung

Diese Studie berechnet erstmals die sogenannten CO_2-Opportunitätskosten für in Deutschland eingesetzte Biokraftstoffe. Als Einsatzmenge werden die im Jahr 2020 auf die Quotenverpflichtung angerechneten 121 Petajoule Biokraftstoff zu Grunde gelegt. Das entspricht 5,3 % des Endenergieverbrauchs im Jahr 2020 und liegt damit höher als in allen Jahren zuvor. Auf Ackerflächen in Deutschland wurden in 2020 Rohstoffe für 44 Petajoule Biokraftstoffe angebaut. Die dafür benötigte Fläche beträgt 0,461 Mio. Hektar, unter Abzug der Fläche für Koppelprodukte wie Rapsschrot. Ein Großteil der in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe ist importiert und belegt ausgedehnte Flächen insbesondere in Asien v.a. durch den Anbau von Ölpalmen. Insgesamt belegen die in Deutschland eingesetzten Biokraftstoffe weltweit 1,23 Mio. Hektar, was mehr als 10 % der Ackerfläche Deutschlands entspricht.

Die Einsparung an Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Anbau-Biokraftstoffen anstelle von fossilen Kraftstoffen betrug in 2020 nach amtlichen Angaben 9,2 Mio. t CO_2-Äq.. Würde man auf diese Einsparung verzichten und stattdessen auf den für Biokraftstoffe belegten Flächen natürliche Vegetation aufwachsen lassen, wäre dadurch eine mittlere jährliche Kohlenstoffbindung von über 16 Mio. t CO_2 möglich. Dies sind die CO_2-Opportunitätskosten der Biokraftstoffproduktion und sie liegen deutlich höher als die Emissionsminderung durch den Ersatz von fossilen Kraftstoffen.

Darüber hinaus zeigt die Studie, dass sich die derzeit durch Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse abgedeckte Fahrleistung auf nur ca. 3 % der Fläche über Solarstrom für Elektroantriebe zur Verfügung stellen lässt. Kombiniert man den Umstieg auf E-Mobilität mit einer Renaturierung der „freiwerdenden“ 97 % der Fläche, sind jährliche Emissionseinsparungen von 27 Mio. t CO_2 möglich. Das ist nahezu das Dreifache der offiziell berichteten gesamten Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch Biokraftstoffe.

Des Weiteren wären mit einer Renaturierung statt Anbau und Nutzung der Biokraftstoffe weitere ökologische Vorteile verbunden: Erhöhung des Anteils natürlicher Flächen, Schutz der Biodiversität und von Ökosystemleistungen, Verringerung des Eintrags versauernder und eutrophierender Stoffe in Boden, Wasser und Luft.

Die vorliegende Studie beruht auf zahlreichen offiziellen Daten und wissenschaftlichen Arbeiten. Einige der verwendeten Faktoren, wie die Kohlenstoffspeicherraten von verschiedenen Ökosystemen, sind dabei mit Unsicherheitsbandbreiten verbunden – insbesondere auch zur Frage des Bodenkohlenstoffs, der in dieser Studie nicht betrachtet wurde. Hier besteht fraglos weiterer Forschungsbedarf. Die Aussagen der Studie sind jedoch durch den im Zweifel stets konservativen Ansatz als richtungssicher zu werten. Abweichungen in den konkreten Zahlen führen zu keiner Änderung der Kernaussage.

Literaturverzeichnis

AGEB (2021): Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland - Daten für die Jahre von 1990 bis 2020. *https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/09/awt_2020_d.pdf* (27.12.2021).

Beckmann, M.; Gerstner, K.; Akin-Fajiye, M.; Ceaușu, S.; Kambach, S.; Kinlock, N. L.; Phillips, H. R. P.; Verhagen, W.; Gurevitch, J.; Klotz, S.; Newbold, T.; Verburg, P. H.; Winter, M.; Seppelt, R. (2019): Conventional land-use intensification reduces species richness and increases production: A global meta-analysis. In: *Global Change Biology*. Vol. 25, No. 6, S. 1941–1956.

BfN (2015): Artenschutz-Report 2015 Tiere und Pflanzen in Deutschland. Bonn. *https://www.bfn.de/publikationen/bfn-report/artenschutz-report* (27.12.2021).

BfN (2018): Auswirkungen von Glyphosat auf die Biodiversität. Bonn. S. 13. *https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-04/20180131_BfN-Papier_Glyphosat.pdf*.

BLE (2020): Evaluations-und Erfahrungsbericht für das Jahr 2019. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung. Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. *https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2019.html* (22.12.2021).

BLE (2021): Evaluations-und Erfahrungsbericht für das Jahr 2020. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung. Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. *https://www.wochenblatt-dlv.de/media/2021-12/Evaluationsbericht_2020.pdf* (22.12.2021).

BMEL (2020): Besondere Ernte- und Qualitätsermittlung (BEE) 2020. *https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/EQB-1002000-2020.pdf* (23.12.2021).

BMU (2020): Die Lage der Natur in Deutschland Ergebnisse von EU-Vogelschutz- und FFH-Bericht. S. 62. *https://www.bmuv.de/download/bericht-zur-lage-der-natur-2020/* (01.02.2022).

BMU (2021): Ökosystemleistungen von Wäldern - Honorierung von Klimaschutzleistungen mit ambitionierten Biodiversitätsstandards. S. 4. *https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/oekosystemleistungen_waelder_positionspapier_bf.pdf* (01.02.2021).

BMUB (2015): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. *https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/nationale_strategie_biologische_vielfalt_2015_bf.pdf* (22.12.2021).

Bundesregierung (o.J.): Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045. In: *Bundesregierung Startseite*. https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672. (01.02.2022).

Bundestag (2021): Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. S. 4458.

Cook-Patton, S. C.; Leavitt, S. M.; Gibbs, D.; Harris, N. L.; Lister, K.; Anderson-Teixeira, K. J.; Briggs, R. D.; Chazdon, R. L.; Crowther, T. W.; Ellis, P. W.; Griscom, H. P.; Herrmann, V.; Holl, K. D.; Houghton, R. A.; Larrosa, C.; Lomax, G.; Lucas, R.; Madsen, P.; Malhi, Y.; Paquette, A.; Parker, J. D.; Paul, K.; Routh, D.; Roxburgh, S.; Saatchi, S.; van den Hoogen, J.; Walker, W. S.; Wheeler, C. E.; Wood, S. A.; Xu, L.; Griscom, B. W. (2020): Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. In: *Nature*. Vol. 585, No. 7826, S. 545–550.

Destatis (2021): Erzeugung, Abgabe und Ausfuhr von Biotreibstoffen: Deutschland, Jahre, Biotreibstoffe. *Text*, https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=43521-0001#abreadcrumb. (24.12.2021).

Deutscher Bundestag (2019): Unterrichtung durch die Bundesregierung. *https://dserver.bundestag.de/btd/19/079/1907990.pdf* (02.02.2022).

Deutscher Bundestag (2021): Grüne fordern Aktionsprogramm „Natürlicher Klimaschutz". In: *Deutscher Bundestag*. https://www.bundestag.de/presse/hib/842982-842982. (01.02.2022).

EC - European Commission (o.J.): Values reported to the Commission by the EU Member States implementing Article 19 (2) of the Renewable Energy Directive (Directive 2009/28/EC). *https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/documents/preiluc_directive_nuts2_report_values_mj_kg_july_2018.pdf* (02.02.2022.a).

EC - European Commission (o.J.): CONSULTATION STRATEGY IMPACT ASSESSMENT ACCOMPANYING A DRAFT LEGISLATIVE PROPOSAL ON EU NATURE RESTORATION TARGETS. *https://ec.europa.eu/environment/strategy/biodiversity-strategy-2030/eu-nature-restoration-targets_en* (01.02.2022.b).

EU Commission; Ricardo Energy & Environment; Hill, N.; Amaral, S.; Morgan-Price, S.; Nokes, T.; Bates, J.; Helms, H.; Fehrenbach, H.; Biemann, K.; Abdalla, N.; Jöhrens, J.; Cotton, E.; German, L.; Harris, A.; Haye, S.; Sim, C.; Bauen, A.; Ziem-Milojevic, S. (2020): Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: final report. Publications Office of the European Union, LU.

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2010): Beschluss der Kommission vom 10. Juni 2010 über Leitlinien für die Berechnung des Kohlenstoffbestands im Boden für die Zwecke des Anhangs V der Richtlinie 2009/28/EG (Bekannt gegeben unter Aktenzeichen K(2010) 3751). *https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/55f1c6e9-d08a-4678-9ad4-193c06df52ff* (09.06.2020).

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2018): RICHTLINIE 2018/2001 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001* (22.12.2021).

Evans, S. G.; Ramage, B. S.; DiRocco, T. L.; Potts, M. D. (2015): Greenhouse gas mitigation on marginal land: A quantitative review of the relative benefits of forest recovery versus biofuel production. In: *Environmental Science & Technology*. Vol. 49, No. 4, S. 2503–2511.

Fehrenbach, H.; Bürck, S.; Köppen, S.; Bischoff, M. (2021a): Literaturstudie zur Vorbereitung der Aktualisierung des UBA-Biomassepositionspapiers (Nr. 127447). noch unveröffentlicht.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021b): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

FNR (2021a): FNR - Pflanzen: Anbauzahlen. https://pflanzen.fnr.de/anbauzahlen. (21.12.2021).

FNR (2021b): Entwicklung Biodiesel-Produktion und -Absatz in Deutschland. https://basisdaten.fnr.de/bioenergie/biokraftstoffe. (24.12.2021).

Hallmann, C. A.; Sorg, M.; Jongejans, E.; Siepel, H.; Hofland, N.; Schwan, H.; Stenmans, W.; Müller, A.; Sumser, H.; Hörren, T.; Goulson, D.; Kroon, H. de (2017): More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. In: *PLOS ONE*. Public Library of Science. Vol. 12, No. 10, S. e0185809.

Hayek, M. N.; Harwatt, H.; Ripple, W. J.; Mueller, N. D. (2021): The carbon opportunity cost of animal-sourced food production on land. In: *Nature Sustainability*. Vol. 4, No. 1, S. 21–24.

Heinrich, V. H. A.; Dalagnol, R.; Cassol, H. L. G.; Rosan, T. M.; de Almeida, C. T.; Silva Junior, C. H. L.; Campanharo, W. A.; House, J. I.; Sitch, S.; Hales, T. C.; Adami, M.; Anderson, L. O.; Aragão, L. E. O. C. (2021): Large carbon sink potential of secondary forests in the Brazilian Amazon to mitigate climate change. In: *Nature Communications*. Vol. 12, No. 1, S. 1785.

Helms, H.; Kämper, C.; Biemann, K.; Lambrecht, U.; Jöhrens, J. (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Agora Verkehrswende. S. 72. *https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf*.

Herman, M.-O.; Mayrhofer, J. (2016): Burning Land, Burning the Climate: The biofuel industry's capture of EU bioenergy policy. OXFAM briefing paper S. 44.

ifeu (o.J.): BIOGRACE. https://www.biograce.net/home. (21.12.2021).

IPBES (2019): Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services. Zenodo. *https://zenodo.org/record/3553579* (01.02.2022).

IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Intergovernmental panel on climate change. *https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport* (04.10.2021).

Kaltschmitt, M.; Reinhardt, G. (1998): Nachwachsende Energieträger. Grundlagen, Verfahren, ökologische Bilanzierung.

Liebich, A.; Fröhlich, T.; Münter, D.; Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Dünnebeil, F.; Knörr, W.; Biemann, K.; Simon, S.; Maier, S.; Albrecht, F.; Pregger, T.; Schillings, C.; Moser, M.; Reißner, R.; Hosseiny, S.; Jungmeier, G.; Beermann, M.; Frieden, D.; Bird, N. (2020): Systemvergleich speicherbarer Energieträger aus erneuerbaren Energien. Abschlussbericht. Umweltbundesamt. *https://www.researchgate.net/publication/342420532_Systemvergleich_speicherbarer_Energietrager_aus_erneuerbaren_Energien* (01.04.2021).

Neufeld, D. (2022): Visualizing Carbon Storage in Earth's Ecosystems. In: *Visual Capitalist*. https://www.visualcapitalist.com/visualizing-carbon-storage-in-earths-ecosystems/. (02.02.2022).

Paul, C.; Weber, D. M.; Mosandl, D. R. (2009): Kohlenstoffbindung junger Aufforstungsflächen. S. 70.

Righelato, R.; Spracklen, D. V. (2007): Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? In: *Science*. Vol. 317, No. 5840, S. 902–902.

Schmidinger, K.; Stehfest, E. (2012): Including CO2 implications of land occupation in LCAs—method and example for livestock products. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Vol. 17, No. 8, S. 962–972.

Searchinger, T. D.; Wirsenius, S.; Beringer, T.; Dumas, P. (2018): Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. In: *Nature*. Vol. 564, No. 7735, S. 249–253.

SRU (2015): Stickstoff: Lösungsstrategien für ein drängendes Umweltproblem. Sondergutachten Berlin. *https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/02_Sondergutachten/2012_2016/2015_01_SG_Stickstoff_HD.pdf?__blob=publicationFile* (27.12.2021).

Suck, R.; Bushart, M.; Hofmann, G.; Schröder, L. (2013): Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands. Band II Kartierungseinheiten. Unter Verwendung von Ergebnissen aus dem F + E-Vorhaben FKZ 3508 82 0400. BfN-Skripten BfN, Bonn-Bad Godesberg.

Suck, R.; Bushart, M.; Hofmann, G.; Schröder, L. (2014a): Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands. Band I Grundeinheiten. Unter Verwendung von Ergebnissen aus dem F + E-Vorhaben FKZ 3508 82 0400. BfN-Skripten BfN, Bonn-Bad Godesberg.

Suck, R.; Bushart, M.; Hofmann, G.; Schröder, L. (2014b): Karte der Potentiellen Natürlichen Vegetation Deutschlands. Band III Erläuterungen, Auswertungen, Anwendungsmöglichkeiten, Vegetationstabellen. BfN, Bonn-Bad Godesberg.

Taylor, R.; Sims, M.; Burns, D.; Lyons, K. (2021): What COP26 Means for Forests and the Climate.

UBA (2015): Gefährdung der Biodiversität. In: *Umweltbundesamt*. *Text*, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/gefaehrdung-der-biodiversitaet. (01.02.2022).

UBA (2021): Siedlungs- und Verkehrsfläche. In: *UBA*. *Text*, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche. (13.02.2022).

UKCOP26.ORG (2021): Glasgow Leaders' Declaration on Forests and Land Use. In: *UN Climate Change Conference (COP26) at the SEC – Glasgow 2021*. https://ukcop26.org/glasgow-leaders-declaration-on-forests-and-land-use/. (23.12.2021).

UNEP; FAO (o.J.): UN Decade on Restoration. In: *UN Decade on Restoration*. http://www.decadeonrestoration.org/node. (01.02.2022).

Wirsenius, S.; Searchinger, T.; Zionts, J.; Peng, L.; Beringer, T.; Dumas, P. (2020): Comparing the life cycle greenhouse gas emissions of dairy and pork systems across countries using land-use carbon opportunity costs. *https://files.wri.org/d8/s3fs-public/comparing-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-dairy-pork-systems_0.pdf* (22.12.2021).

Woodcock, B. A.; Bullock, J. M.; Shore, R. F.; Heard, M. S.; Pereira, M. G.; Redhead, J.; Ridding, L.; Dean, H.; Sleep, D.; Henrys, P.; Peyton, J.; Hulmes, S.; Hulmes, L.; Sárospataki, M.; Saure, C.; Edwards, M.; Genersch, E.; Knäbe, S.; Pywell, R. F. (2017): Country-specific effects of neonicotinoid pesticides on honey bees and wild bees. In: *Science*. American Association for the Advancement of Science.