

HINTERGRUNDPAPIER

Bio2x | Vergleichende Analyse zu nachhaltigen Biomasse- und Substitutionspotenzialen

Karin Naumann, Karl-Friedrich Cyffka, Tom Karras

1 INHALTSVERZEICHNIS

1	Inhaltsverzeichnis	II
2	Fazit Analyse Signifikante Mineralölproduktsubstitution möglich	3
3	Perspektive Betrachtungsdefizite schließen.....	5
4	Ausblick Handlungsempfehlung für zukünftige Potenzialstudien	8
5	Kontext Nutzung und Einordnung von Biomasse	9
6	Biomassepotenzial Vergleich der Studienbasis	14
7	Substitutionspotenzial Bezugsrahmen heutige Mineralölprodukte.....	17
8	Anhang Methodisches Vorgehen.....	23
9	Abkürzungsverzeichnis	32
10	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	33
11	Literaturverzeichnis	34

Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige
GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
+49 (0)341 2434-112
info@dbfz.de
www.dbfz.de

Stand:

Oktober 2024

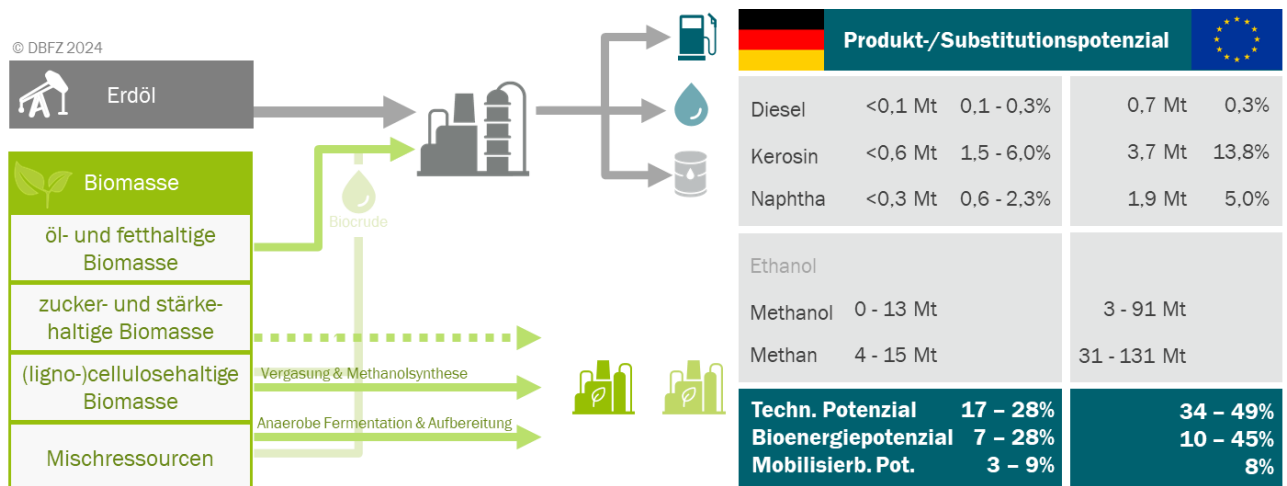
Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Wirtschaftsverbandes Fuels und Energie e. V. (en2x) durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt ausschließlich bei den Autor:innen.

2 FAZIT ANALYSE

SIGNIFIKANTE MINERALÖLPRODUKTSUBSTITUTION MÖGLICH



Das Potenzial nachhaltiger Biomasse zur Substitution bisher mineralölbasierter Bereitstellungsketten für Kraftstoffe und sonstige Produkte hat große Bandbreiten. Je nach Studie kann mit dem **Bioenergiepotenzial** in **Deutschland 7–28 %** und in der **Europäischen Union 10–45 %**¹ des derzeitigen Raffinerieoutputs substituiert werden (siehe Abbildung 1). Beim mobilisierbaren technischen Potenzial sind es 3–9 % (EU: 8 %), ebenfalls bezogen auf den Energiegehalt. Betrachtet man hinreichend ausgereifte Konversionsverfahren, so ergibt sich ein Substitutionspotenzial, das vor allem aus der Umwandlung von biogenen Nebenprodukten sowie Abfall- und Reststoffen zu Biomethan und Biomethanol resultiert. Ausgehend von einem perspektivisch vor allem aufgrund von Elektrifizierung deutlich reduzierten Bedarf an Kraft- und Brennstoffen wäre dieser relative Anteil noch deutlich höher zu bewerten. Gleichzeitig gilt es jedoch auch perspektivische Bedarfe für andere Nutzungsektoren im Blick zu behalten. Prozessketten bzw. Produkte, die zwingend auf öl- und fettthaltige Ressourcen zurückgreifen müssen, steht derzeit nur ein sehr begrenztes Potenzial entsprechender Rest- und Abfallstoffe zur Verfügung. Hier zeigt sich die dringende Notwendigkeit adäquater Prozessentwicklung bzw. -anpassung.



Hinweise: kraftstoffspezifische Werte: Bezug auf Mittelwerte u. mittlere Szenarien der Studien (Mengenangaben in Mio. metrischen Tonnen (Mt) Öleinheiten, 1 kg ÖE = 42 MJ) | Bandbreiten Gesamtpotenzial beinhalten auch Min/Max Szenarien | hier nicht berücksichtigte Ressourcen: starchy crops, sugar from sugar beet (Ethanol); rape seed, sunflower, soya seed (Diesel, Kerosin, Naphtha); lignocellulosic crops, stemwood, Waldholz (Methanol)

Abbildung 1 Biobasiertes Substitutionspotenzial für Produkte aus Mineralölraffinerien für Deutschland und Europa

¹ Bioenergiepotenziale von 9-31 % (DE) sowie 15-49 % (EU) gemäß Tabelle 2 sowie Tabelle 4 enthalten zudem Anbaubiomasse aus ENSPRESO



Betrachtet wurden die **fünf Studien** - BioRest (Fehrenbach et al. 2018), Concawe (Panoutsou und Maniatis 2021), DBFZ Ressourcendatenbank (DBFZ Ressourcendatenbank; Brosowski et al. 2019), ENSPRESO (Ruiz et al. 2015) und Searle & Malins (Searle und Malins 2016). Die Auswahl der Studien basiert auf den Kriterien: transparente Methodik, Aktualität (nicht älter als zehn Jahre) sowie betrachtete Potenzialebenen (mindestens Bioenergiepotenzial oder mobilisierbares Potenzial). Der Fokus aller Studien liegt auf der Quantifizierung der Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe sowie Nebenprodukte.

Die vergleichende Analyse zeigt signifikante **Unterschiede zwischen** den **ausgewählten Biomassepotenzialstudien** auf. Diese ergeben sich aufgrund der betrachteten Potenzialebenen, der Anzahl der betrachteten Biomassen, der Annahmen zur Mobilisierung und Nutzung der Biomassen sowie der verwendeten Datengrundlage und dem Bezugsjahr.



Die Potenzialstudien beschränken sich in der Regel auf räumlich begrenzte **Regionen** (bspw. Deutschland oder Europa) und versuchen, die Frage zu beantworten, wieviel „heimische“ Biomasse derzeit oder zukünftig zur Verfügung steht.



Die betrachteten Potenzialstudien berücksichtigen nur teilweise die derzeit bestehenden und zukünftig absehbaren **rechtlichen Nachhaltigkeitsanforderungen**, welche die Nutzbarkeit ausgewählter Biomassen in ausgewählten Sektoren einschränken kann, z. B. die Revision der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II), die EU-Verordnung für Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) sowie die EU Biodiversitätsstrategie. Anhand der Annahmen zu den Entnahmeraten von Stroh oder den Bestandteilen des Waldrestholzes, welches entnommen werden darf, kann z. B. eingeschätzt werden, inwiefern Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt wurden.



Nutzungsallokation. Die Studien Concawe und ENSPRESO berücksichtigen annahmenbasiert neben der Bioenergie auch alternative (stoffliche) Nutzungen. Die DBFZ-ResDB sowie Searle & Malins berücksichtigen stoffliche Nutzungen basierend auf Statistiken sowie zum Teil auf (Experten-)Schätzungen. Die BioRest-Studie wertet verschiedene Potenzialanalysen aus, wobei die zitierten Quellen Nutzungskonkurrenzen unterschiedlich betrachten.

3 PERSPEKTIVE BETRACHTUNGSDEFIZITE SCHLIEßEN

Potenzialstudien zur Biomasseverfügbarkeit und damit verbunden zur künftigen Verfügbarkeit von Biomasse für Kraftstoffe sind stark von der Entwicklung zahlreicher Einflussfaktoren geprägt. Ein Blick auf frühere Vergleiche von Potenzialstudien zeigt, dass es auch in der Vergangenheit eine große Bandbreite an Erwartungen und Annahmen gab (Pfeiffer und Thrän 2018). Nachfolgend wird beschrieben, welche Lücken noch zu schließen sind, um die Frage nach dem künftigen Biomassepotenzial für den Energiesektor besser beantworten zu können.



Die hier analysierten Studien können nicht abschließend die Frage beantworten, wie hoch das Biomassepotenzial für den Energiesektor im Kontext der Gesamtbioökonomie zukünftig sein wird. Eine perspektivische **Bedarfsentwicklung in allen Sektoren** der Bioökonomie wird in den Studien aufgrund ihrer zumeist konkreten Zielstellungen nicht berücksichtigt. Im Rahmen einer Transformation der vor allem fossilbasierten Wirtschaft hin zu einer Bioökonomie wird es notwendig sein, dass alle Sektoren ihre bisherigen Rohstoffe durch Ressourcen aus erneuerbaren Quellen zum Teil oder je nach Sektor auch vollständig substituieren (Bundesregierung 2020). Dementsprechend ist zu erwarten, dass die Nachfrage in den meisten Sektoren ansteigt. Für eine Allokation der Biomassepotenziale auf die Sektoren bzw. die Beantwortung der Frage, wieviel Biomasse für die Substitution fossiler Mineralölprodukte zur Verfügung steht, gilt es, perspektivisch Ansätze bestehender Potenzialstudien im Kontext der Gesamtbioökonomie weiterzuentwickeln. Dabei wären dann auch Aspekte zu berücksichtigen wie

- multifunktionale (Zwischen-)Produkte (z. B. Alkohole wie Methanol und Ethanol, Wasserstoff, Methan, Syntheseprodukte, paraffinische Produkte) aus Multiproduktanlagen (erneuerbaren Raffinerien inkl. Hybridkonzepten) und
- erweiterte Nutzungskaskaden inklusive zeitlichem Versatz der Kaskade in Abhängigkeit vom Nutzungspfad.

Dies ist in den betrachteten Studien kaum erfolgt.



Aussagen zur **Nachhaltigkeit der Biomassepotenziale** bzw. einem nachhaltigen Biomassepotenzial können im Rahmen dieser Vergleichsanalyse nur begrenzt abgeleitet werden. Der geltende sowie zukünftige regulatorische Rahmen (v. a. Nachhaltigkeitskriterien gemäß z. B. RED II und deren Revision) wird nicht vollumfänglich in den Studien berücksichtigt. Auch weitere Aspekte einer möglichen (nachhaltigen) Biomassebereitstellung fehlen in den betrachteten Studien, z.B.:

- Agroforstwirtschaft,
- Zwischenfrüchte (erweitertes Biomassepotenzial oder gesteigerte Entnahmeraten durch verbessertes Bodenmanagement),

- Paludikultur,
- Gärrestrückführung (Steigerung der Entnahmeraten von bspw. Stroh durch Humuswirksamkeit rückführbarer Gärreste),
- Biomasse als Kohlenstoffquelle respektive biogenes CO₂.

Anbaubiomassen, das heißt zucker-, stärke- oder ölhaltige landwirtschaftliche Feldfrüchte sowie Energieholz wurden nicht in allen Studien mitbetrachtet; lediglich bei Concawe und ENSPRESO. BioRest weist dagegen nur Stammholz mit Qualitätsmängeln (Dendromasse) für eine etwaige energetische Nutzung aus. Inwiefern zukünftig Anbaubiomassen für die Bereitstellung biobasierter Produkte genutzt werden und welche Anteile biobasierte Energie bzw. Energieträger hier einnehmen sollen, kann die Analyse der Potenzialstudien nicht aufzeigen.

Klimaveränderungen sowie **zukünftige Änderungen** der regulatorischen Anforderungen werden ebenfalls einen Einfluss auf das Biomassepotenzial sowie dessen Mobilisierungsoptionen haben. Diese Aspekte sind in den Studien nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.



Regionalität. Die Studien betrachten neben der Frage nach dem inländischen Biomassepotenzial zahlreiche zentrale Aspekte nicht, wie zum Beispiel:

- Wie können Import und Export von Biomasse und daraus hergestellte Produkte besser oder überhaupt abgebildet werden? ²
- Wieviel inländische Biomasse kann unter Berücksichtigung von internationalen Handelsströmen sowie möglichen ökonomischen Kostenvorteilen importierter Biomasse bzw. biomassebasierter Folgeprodukte überhaupt mobilisiert bzw. genutzt werden?



Unabhängig von der Identifizierung und Quantifizierung der Potenziale sowie allen anderen bereits genannten Diskussionspunkten stellt sich letztlich die Frage nach geeigneten **Mobilisierungsstrategien**. Erfahrungsgemäß spielen neben dem internationalen Wettbewerb u. a. die Eigentumsverhältnisse, die Verfügbarkeit von Marktplattformen und die zugehörigen infrastrukturellen Rahmenbedingungen wie bspw. Transportlogistiken, aber auch das Fachkräfteangebot eine Rolle für die Mobilisierung, Verteilung und Verarbeitung der Biomasse.



Technologieentwicklung. Die Ergebnisse zeigen, dass eine direkte Substitution des fossilen Mineralöls innerhalb der etablierten Verarbeitungsketten nur begrenzt möglich ist:

² Hinweis: Im Rahmen der nachgelagerten PRIMES Modellierung zu ENSPRESO werden auch Importe berücksichtigt. (E3Modeling 2018)

- einerseits gibt es nur sehr begrenzte deutsche und europäische Biomassepotenziale, die durch die etablierten, fossilbasierten Technologien verarbeitet werden können und
- andererseits sind die ausreichend weit entwickelten biobasierten Konversionstechnologien nicht geeignet, um das derzeitige Produktportfolio der Mineralölwirtschaft (in Breite und Menge) direkt und vollumfänglich zu substituieren.

Für die Einbindung biogener Ressourcen bedarf es einer fokussierten (Weiter-) Entwicklung geeigneter Technologien und Prozessketten. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten:

- Erreichen einer erforderlichen Technologiereife bei der Aufbereitung von für ungeeigneten Biomassen hin zu einem verarbeitbaren Biocrude und entsprechende Ertüchtigung etablierter Raffinerieprozesse, **Ziel** ist dabei die Weiternutzung bestehender Infrastruktur und Verarbeitungsketten.
- Anpassung der Gesamtbereitstellungsketten für biobasierte Energieträger und Produkte, ausgerichtet an den verfügbaren Ressourcen und Prozessen, **Ziel** ist dabei die Optimierung der Gesamteffizienz für eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit.

4 AUSBLICK

HANDLUNGSEMPFEHLUNG FÜR ZUKÜNFTIGE POTENZIALSTUDIEN

Im vorherigen Abschnitt wurden Betrachtungsdefizite aufgezeigt. Diese decken sich mit Erkenntnissen aus früheren Arbeiten des DBFZ (Brosowski 2021, 34 ff) und bestehenden Studien (Böttcher et al. 2020, S. 57). Für zukünftige Potenzialstudien lassen sich folgende Handlungsempfehlungen geben:

- Standardisierungsbedarf zur Erhöhung der Konsistenz sowie der Vergleichbarkeit von Biomassepotenzialdaten, z. B. durch eine einheitlichere Zuordnung von Einzelbiomassen in Kategorien bei klarer Benennung von Biomassepotenzialebenen,
- Digitalisierung und volle Transparenz von Biomassepotenzialdaten (inklusive Methodik und Annahmen) anstelle von statischen Werkzeugen (Datenbanken statt pdf-Dateien),
- Übertragung von Daten und Berechnungselementen in digitale Wissensmodelle (Ontologien), um einen „Diskurs“ zwischen Biomassepotenzialstudien bzw. den entsprechenden Institutionen zu ermöglichen (Brosowski 2021),
- Integration der zukünftigen Entwicklung von Nutzungskonkurrenzen verschiedener Sektoren,
- Berücksichtigung des Status quo von bestehenden Biomasseverbräuchen inkl. Im- und Exporten bei Darstellungen von verfügbaren Biomassepotenzialen,
- stärkere Integration von Nachhaltigkeitsindikatoren bzw. regulatorischer Vorgaben (z. B. EU LULUCF-Verordnung (Europäische Kommission; Rat der Europäischen Union 2021) und die EU Biodiversitätsstrategie (Europäische Kommission und Rat der Europäischen Union 2020)) in die Abschätzung und Quantifizierung von Biomassepotenzialen,
- stärkere Adressierung quantitativer Auswirkungen zeitlich versetzter Kaskadeneffekte auf Rest- und Abfallstoffpotenziale aufgrund von Annahmen zu zukünftigen Biomassenutzungsszenarien (Fehrenbach et al. 2017).

5 KONTEXT

NUTZUNG UND EINORDNUNG VON BIOMASSE

In den vergangenen Jahrzehnten ist die die **Nutzung fossiler Ressourcen** wie Erdöl, Erdgas und Kohle massiv gestiegen. Der daraus resultierende Anstieg von Treibhausgasen (v. a. CO₂) ist der Hauptantriebsfaktor für die Erwärmung der Troposphäre und weiterer Aspekten des Klimawandels (IPCC 2021). Zur Abschwächung der daraus resultierenden Folgen liegt ein verstärkter Fokus auf der Substitution fossiler Rohstoffe und Energieträger durch erneuerbare Optionen. Neben der direkten Elektrifizierung vieler Anwendungen ist jedoch auch die Substitution von ausgewählten Energieträgern sowie von stofflich genutzten Zwischen- und Endprodukten aus Erdöl erforderlich.

Pflanzliche **Biomasse** wurde historisch vor allem als Nahrungs- und Futtermittel sowie Holz als Bau- und Brennstoff genutzt. Auch die Nutztierhaltung dient im Wesentlichen der Nahrungsmittelbereitstellung. Darüber hinaus wird Biomasse aber auch bereits in anderen Sektoren genutzt, wie beispielsweise Öle und Fette in der Pharmazie oder Oleochemie für technische oder kosmetische Produkte. Auch im Bereich der Kraftstoffe für den Verkehrssektor sind bereits seit Jahren biobasierte Substitute in der Anwendung. Regulatorische und rechtliche Rahmenbedingungen sowie wissenschaftliche Analysen zu den verfügbaren Potenzialen wurden bisher überwiegend vor dem Hintergrund einer energetischen Nutzung erstellt.

Biomasse ist wie alle Ressourcen nur in begrenztem Umfang verfügbar bzw. kann aufgrund planetarer Grenzen nur in begrenztem Umfang pro Jahr nachproduziert werden. Aus dieser Begrenzung folgen schließlich **Nutzungskonkurrenzen** und basierend auf dem aktuellen gesellschaftspolitischen Diskurs in Deutschland und Europa soll nach Beachtung der Erfordernisse für die Ernährungssicherheit einer stofflichen Nutzung Vorrang vor der energetischen Nutzung gegeben werden. Die Leitprinzipien einer Nationalen Biomassestrategie in Deutschland (Nabis) sollen demnach auf dem Grundsatz einer Nutzungshierarchie unter Berücksichtigung der Möglichkeiten von Mehrfach- und Kaskadennutzungen basieren. Im Eckpunktepapier der Nabis (BMWK, BMEL, BMUV 2022) heißt es:

- Priorisierung der stofflichen Nutzung
- Vorrang der Mehrfachnutzung
- Vorrang der Nutzung des Biomasseanteils an biogenen Abfallstoffen.

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für biobasierte Kraftstoffe wurden in den vergangenen Jahren bereits zunehmend auf die Nutzung von Abfällen und Reststoffen ausgelegt. Auf Basis der aktuellen Vorgaben der Erneuerbaren Energien Richtlinie der EU (RED II) lassen sich grundsätzlich folgende Biomasseklassen für Biokraftstoffe unterscheiden:

1. Konventionelle Biomasse (sog. Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, food/feed-crops)
 - Kulturpflanzen mit hohem Stärkegehalt, Zuckerpflanzen oder Ölpflanzen, die als Hauptkulturen auf landwirtschaftlichen Flächen produziert werden

2. Fortschrittliche Biomasse

- Rohstoffe gemäß Annex IX A der RED II (bzw. 38. BImSchV, Anhang 1), die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel geeignet sind, wie bspw. Algen und Cyanobakterien, Bioabfall, biogene Industrieabfälle, Stroh, Mist/Gülle und Klärschlamm, Abwasser aus Palmölmühlen (POME), Tallölpech, Rohglyzerin, Bagasse, Abfälle und Reststoffe aus Forstwirtschaft und anderes (ligno-)cellulosehaltiges Material
- neu gemäß Delegierte Richtlinie (2024/1405): Fuselöle aus der Alkoholdestillation, Rohmethanol aus Kraftzellstoff, der aus der Zellstoffherstellung stammt, Zwischenfrüchte wie Zweitfrüchte und Deckpflanzen sowie Pflanzen von stark degradierten Flächen (keine Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, non-food-crops) für die Herstellung von Biokerosin

3. Abfallbasierte Biomasse

- Rohstoffe gemäß Annex IX B der RED II (bzw. 38. BImSchV, Anhang 4): gebrauchtes Speiseöl (sog. Used Cooking Oils, UCO) und tierische Fette der Kategorien I und II
- neu gemäß Delegierte Richtlinie (2024/1405): geschädigte Pflanzen, kommunales Abwasser außer Klärschlamm, Zwischenfrüchte wie Zweitfrüchte und Deckpflanzen sowie Pflanzen von stark degradierten Flächen (keine Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, non-food-crops) für die Herstellung anderer Biokraftstoffe als Biokerosin

4. Biomasse mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen (sogenannte high iLUC sind ausgeschlossen)

- Palmöl

5. Sonstige Biomasse

- Rohstoffe ohne explizite Zuweisung zu einer der anderen Kategorien, beispielsweise für Deutschland Vinasse, Molasserückstände, Bier- u. Hopfentreber, Schlempe, Altmehl (BLE 2024b).

In Abbildung 2 sind in Grün die Biomassen und -kategorien dieser rechtlichen Klassifizierung zugeordnet sowie nach Hauptbestandteilen unterteilt, welche wiederum eine Orientierung für geeignete Konversionstechnologien bieten. Neben biobasierten Kraftstoffen werden zunehmend nicht-biobasierte erneuerbare Optionen betrachtet, nicht zuletzt, um den genannten Nutzungskonkurrenzen um Biomasse zu begegnen. Die wesentlichen Ressourcen dieser nicht-biobasierten Optionen sind in Blau dargestellt, wobei Anforderungen an den Strom aus erneuerbaren Quellen wie z. B. Zusätzlichkeit oder zeitliche und räumliche Korrelation hier nicht integriert sind.

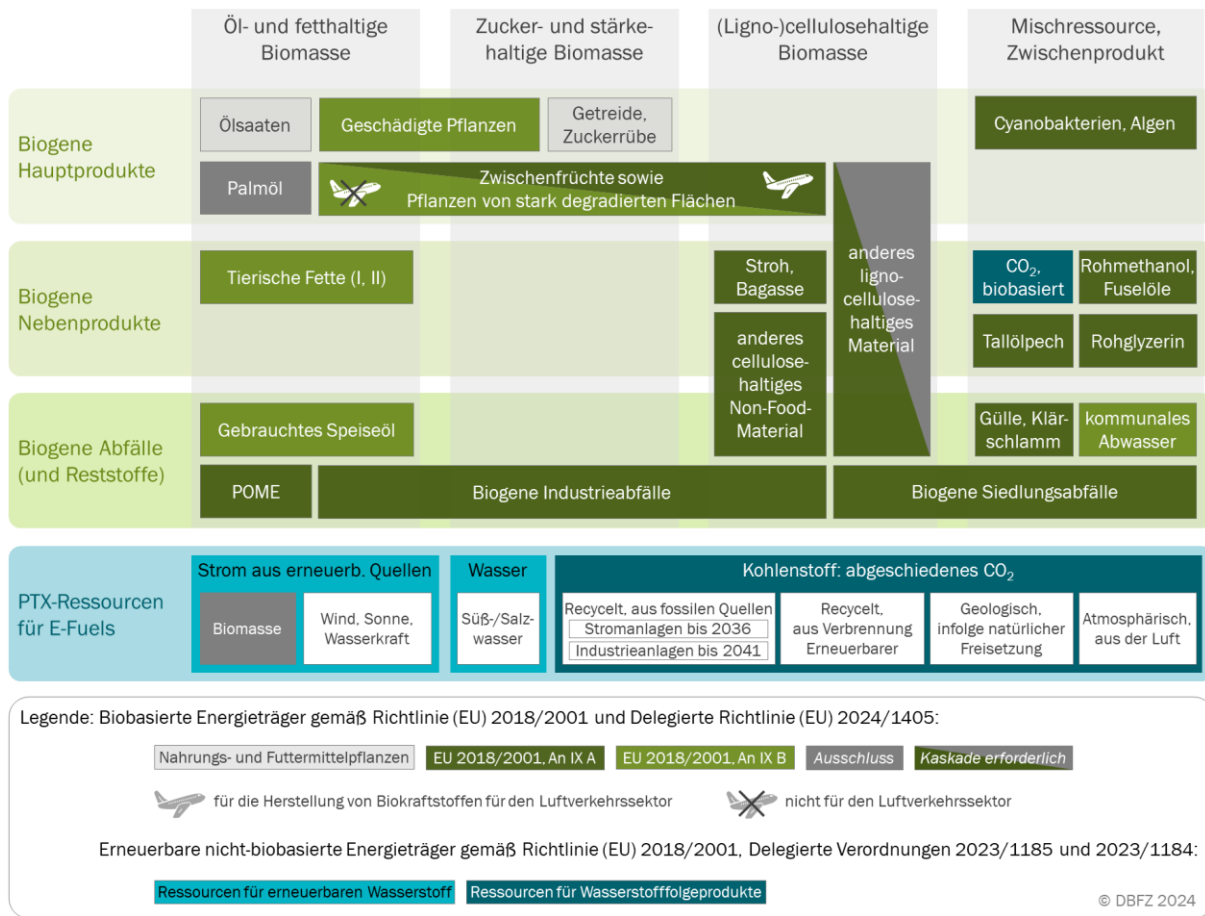


Abbildung 2 Ressourcen zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, kategorisiert gemäß rechtlichen Vorgaben

Exkurs

Die Begrifflichkeit **nachhaltiges Biomassepotenzial** zielt im Rahmen dieser Vergleichsstudie auf die Analyse von in den Studien adressierten (teils regulatorischen), jedoch nicht vollumfänglich berücksichtigten Nachhaltigkeitsaspekten ab. Hervorzuheben ist, dass der in den jeweiligen Studien verwendete Begriff nachhaltiges Biomassepotenzial nicht mit einer Gegenüberstellung des Gesamtbiomasseangebots sowie des Gesamtbiomassebedarfs einer zukünftigen Bioökonomie gleichgesetzt werden kann.

Gesondert ist dahingehend die Nachhaltigkeitsfrage für Anbaubiomasse bezogen auf die damit in Verbindung stehende Fläche zu bewerten, welche seitens der Studien nicht adressiert wurde. Die Nachhaltigkeit von Anbaubiomasse zielt im öffentlich-wissenschaftlichen Diskurs oft primär auf die Frage der Flächennutzung bzw. des Flächenbedarfs ab. Um die Nachhaltigkeit einer etwaig genutzten Fläche zur Produktion von Anbaubiomasse zu bewerten, ist der angewendete Bezugsrahmen des Gesamtflächenverbrauchs der Bioökonomie für den geführten Diskurs entscheidend. Dieser Bezugsrahmen kann sich beispielsweise auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche Deutschlands, den derzeitigen Status-quo-Flächenverbrauch (im In- und Ausland) der deutschen Bioökonomie oder auf eine Einbettung des Gesamtflächenverbrauchs der deutschen Bioökonomie in die EU-Flächenangebote sowie -bedarfe beziehen. Im Jahr 2022 wurden durch die Nutzung von Biokraftstoffen in Deutschland Emissionen in Höhe von 11,6 Mio. t CO₂-eq vermieden (46 % der

insgesamt 140 PJ entfielen auf Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen, 54 % auf solchen aus Anbaubiomasse) (BLE 2024a). Der Verzicht auf Anbaubiomasse kann perspektivisch zu höheren Kosten der Energiewende und einem deutlichen Anstieg der H₂ und PTX-Importe führen (Meisel et al. 2023).

Maßnahmen wie Zwischenfruchtanbau oder Agroforstwirtschaft können sich positiv auf die Flächeneffizienz oder den Ertrag der Hauptfrucht auswirken. Mögliche Vorteile von Agroforst-Systemen, z. B. gegenüber reinen Kurzumtriebsplantagen (DeFAF 2023), u. a. durch positive Ertragseffekte bei einjährigen Kulturen und damit geringeren iLUC-Effekten, werden in der Novellierung des Anhang IX A der RED nur unzureichend berücksichtigt. Grund dafür ist, dass sich non-food-crops nur als Rohstoff für die Produktion von fortschrittlichen Biokraftstoffen (Biokerosin) qualifizieren, falls diese von marginalen Flächen stammen. Gleichzeitig weist die Folgenabschätzungen der EU zur Biomassenutzung im Verkehrssektor vor allem langfristig signifikante Bedarfsmengen für (lignocellulosebasierte) non-food-crops aus (Europäische Kommission 2021a, 2021b; Vera et al. 2021; Europäische Kommission 2020).

Erwähnenswert ist zudem, dass die Restriktionen der RED II hinsichtlich der Nachhaltigkeit oder der begrenzten Nutzung von Anbaubiomasse grundsätzlich nicht bindend für stoffliche Nutzungsoptionen sind, d. h. biobasierte Produkte, die keiner energetischen Nutzung zugeführt werden.

Neben der Quantifizierung von Biomassepotenzialen ist auch deren **Mobilisierbarkeit** von zentraler strategischer Bedeutung. Das heißt, es braucht auch geeignete und für eine Marktetablierung entsprechend weit entwickelte Produktionstechnologien. Bestenfalls sind sogar Produktionskapazitäten vorhanden oder es können beispielsweise vorhandene Kapazitäten aus dem Bereich der Verarbeitung fossiler Ressourcen umgenutzt respektive entsprechend ertüchtigt werden. Neben der ökonomischen und ökologischen Vorteilhaftigkeit ist hier vor allem der Faktor Zeit von Bedeutung. Die Projektierung, Genehmigung und Realisierung neuer oder zumindest ertüchtigter Produktionsinfrastruktur nimmt viel Zeit in Anspruch und verzögert jegliche Zielerreichung entsprechend. Abschließend gilt selbiges auch für jegliche Nutzungsinfrastruktur, die im Falle der Kraftstoffe vor allem einen geeigneten Bestand der Verkehrsmittel wie Fahrzeugen oder Flugzeugen, aber auch die Verteil- und Tankinfrastruktur umfasst.

Der **Markt** für erneuerbare Kraftstoffe und Energieträger wird geschaffen und gesteuert durch die rechtlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und nationaler Ebene. Sie wirken nicht nur direkt oder indirekt auf alle Bestandteile der Bereitstellungs- und Nutzungskette (Abbildung 3), sondern sie werden zunehmend komplex, auch hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen untereinander. Beispielsweise verstärken alle etablierten Rahmenbedingungen für erneuerbare Kraftstoffe und deren strategische Weiterentwicklungen den Fokus auf die Verwertung von Abfällen, bei der die anaerobe Vergärung eine zentrale Rolle spielt. Demgegenüber wurden neue Flottengrenzwerte für verschiedene Fahrzeugklassen definiert: Ab 2035 müssen neu zugelassene Pkw emissionsfrei fahren, wobei die EU-Kommission Möglichkeit schaffen will, damit darüber hinaus Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zugelassen werden können, die ausschließlich mit CO₂-neutralen Kraftstoffen fahren (Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union 2023b). Auch bei schweren Nutzfahrzeugen will sie nach Anhörung der Interessenträger die Rolle einer

Methode für die Zulassung schwerer Nutzfahrzeuge, die ausschließlich mit CO₂-neutralen Kraftstoffen betrieben werden, bewerten (Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union 2024). Inwiefern hier auch biobasierte nachhaltige Kraftstoffe Berücksichtigung finden werden, bleibt noch abzuwarten. Für die Mobilisierung der nachhaltigen und fortschrittlichen Biomassepotenziale für die Kraftstoffbereitstellung wäre dies von grundlegender Bedeutung - nicht zuletzt jedoch auch für den Klimaschutz, da die direkte Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen, v. a. auf der Langstrecke, mit ungleich höheren infrastrukturellen Herausforderungen verbunden ist als die von Pkw (NLL 2024).

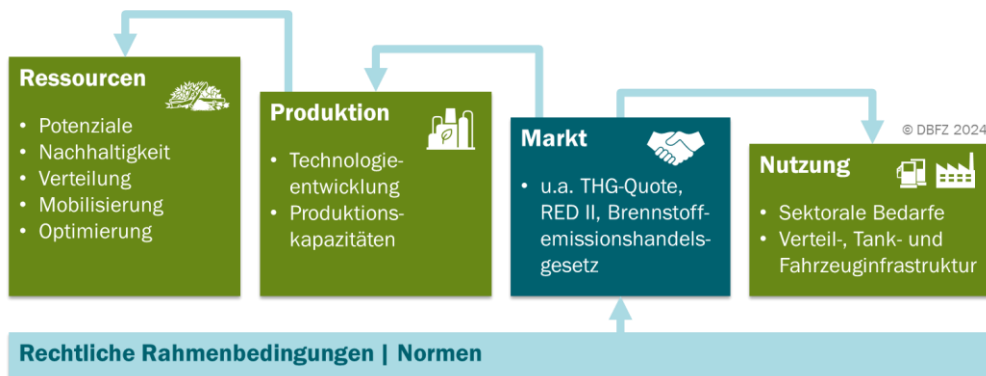


Abbildung 3 Bereitstellungs- und Nutzungskette erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehr

6 BIOMASSEPOTENZIAL VERGLEICH DER STUDIENBASIS

Für die vergleichende Analyse erfolgte zunächst die Auswahl von fünf Studien nach den Kriterien Relevanz, Datenverfügbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Methodik in Kombination mit der Aktualität. Die in den Studien ausgewiesenen Potenziale bilden die Grundlage für die anschließende Kontextualisierung für die Mineralölwirtschaft. Tabelle 1 enthält neben dem Publikationsjahr sowie dem räumlichen und zeitlichen Bezug auch Informationen zu den in den Studien berücksichtigten Biomassen. Der Fokus in den Studien liegt mehrheitlich auf biogenen Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten. Die Einzelbiomassen wurden für eine bessere Vergleichbarkeit Kategorien zugeordnet, welche sich an denen der DBFZ-ResDB orientieren (Brosowski et al. 2019).

Tabelle 1 Übersicht der analysierten Studien

Studie	BioRest	Concawe	DBFZ-ResDB	ENSPRESO	Searle & Malins
Quelle	(Fehrenbach et al. 2018)	(Panoutsou und Maniatis 2021)	(DBFZ Ressourcendatenbank)	(Ruiz et al. 2015)	(Searle und Malins 2016)
Publikationsjahr	2019	2021	2019	2015	2016
Räumlicher Bezug	DE	EU28 + DE	DE	EU28 + DE	EU28 + DE
Zeithorizont	2020, 2030, 2050	2030, 2050	2015	2010, 2020, 2030, 2040, 2050	2010, 2020, 2030
Einzelbiomassen	24	16	77	16	11
DBFZ-Biomassekategorien ^a	10	9	10	9	8
NawaRo enthalten	nein	ja	nein	ja	nein
Stammholz enthalten	ja	ja	nein	ja	nein

^a siehe Tabelle 6

Für den Vergleich der Biomassepotenziale wurden alle Potenzialangaben aus den Studien in die Energieeinheit PJ (Petajoule) umgerechnet. Zusätzlich wurden die angegebenen Potenzialdefinitionen aus den Studien einheitlichen Potenzialebenen zugeordnet und dargestellt (Methodenbeschreibung siehe 8 Anhang). Die Potenziale für den deutschen Kontext sind in Abbildung 4 dargestellt; für den europäischen Kontext in Abbildung 5. Farblich dargestellt sind die Biomassen, welche in allen Studien zu finden waren. Grau eingefärbt sind die Biomassen, welche nicht in jeder Studie betrachtet wurden. Sofern Szenarien oder Spannbreiten vorhanden sind, bilden die Balken nur die mittleren Werte der Studie ab. Aus der Analyse und dem Vergleich der Studien ergaben sich folgende Hauptpunkte, die zu den unterschiedlichen Potenzialen führten und im Folgenden erläutert werden:

Potenzialebene. Die größten Unterschiede ergeben sich aus den unterschiedlichen Potenzialebenen. Die mobilisierbaren technischen Potenziale, auch ungenutzte technische Potenziale genannt, von Searle & Malins und der DBFZ-ResDB weisen somit die geringsten Werte auf. In den Diagrammen sind sie mit einem [D] in der X-Achse gekennzeichnet. Die technischen Potenziale [A] sind hingegen die höchsten Werte.

Anzahl der betrachteten Biomassen. Potenzialunterschiede ergeben sich auch über die Anzahl der betrachteten Biomassen. Potenzialunterschiede ergeben sich auch über die Anzahl der betrachteten Biomassen. So ist beispielsweise in den meisten Studien Altspeisefett (used cooking oil) enthalten und bei ENSPRESO nicht. Auch aufgrund der größten Anzahl an betrachteten Einzelbiomassen hat die DBFZ-ResDB das höchste technische Potenzial an Rest- und Abfallstoffen sowie Nebenprodukten.

Mobilisierungsraten, Nutzungskonkurrenzen und Systemgrenzen. Weiterhin haben die Annahmen zu Bergungsraten oder konkurrierenden Nutzungsoptionen einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. So ist bspw. der hellblaue Balken für Stroh in Concawe höher, weil Concawe auf der einen Seite die höchste Entnahmerate (45 %) für Stroh beinhaltet und zusätzlich auch den höchsten Anteil einer energetischen Nutzung (89-92 %) für Stroh annimmt. Im Rahmen der BioRest-Studie hingegen wird keine Nutzung von Waldrestholz (<7 cm Durchmesser) angenommen, sodass BioRest im Vergleich zu allen anderen Studien für primäre holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte keine Potenziale ausweist.

Datengrundlagen inklusive Bezugsjahr. Die Datengrundlagen für die Berechnung der Potenziale unterscheiden sich zum Teil ebenfalls. So betrachtet die Studie von Searle & Malins das Potenzial für tierische Exkremente in ihrer Publikation von 2016 anhand der Abfallstatistiken aus EUROSTAT. Darin sind nur gesammelte Mengen an tierischem Urin und Fäkalien gelistet, die wirklich als Abfall eingesammelt werden. Die anderen vier Studien beziehen sich hingegen auf den kompletten Viehbestand und errechnen anhand von Güllefaktoren je Tier sowie angenommener Mobilisierungsraten das Potenzial für tierische Exkremente. Neben der Datengrundlage ist auch das Bezugsjahr relevant, weil je nach Aktualität z. T. unterschiedliche Erhebungszeitpunkte der gleichen Statistik genutzt werden und somit die Studien ggf. nicht mit der gleichen Basis beginnen, obwohl sie eine ähnliche Methodik verwenden. Die Daten der DBFZ-Ressourcendatenbank (ResDB) beziehen sich ursprünglich auf 2015 (Brosowski et al. 2019) aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden diese jedoch dem Jahr 2020 zugeordnet.

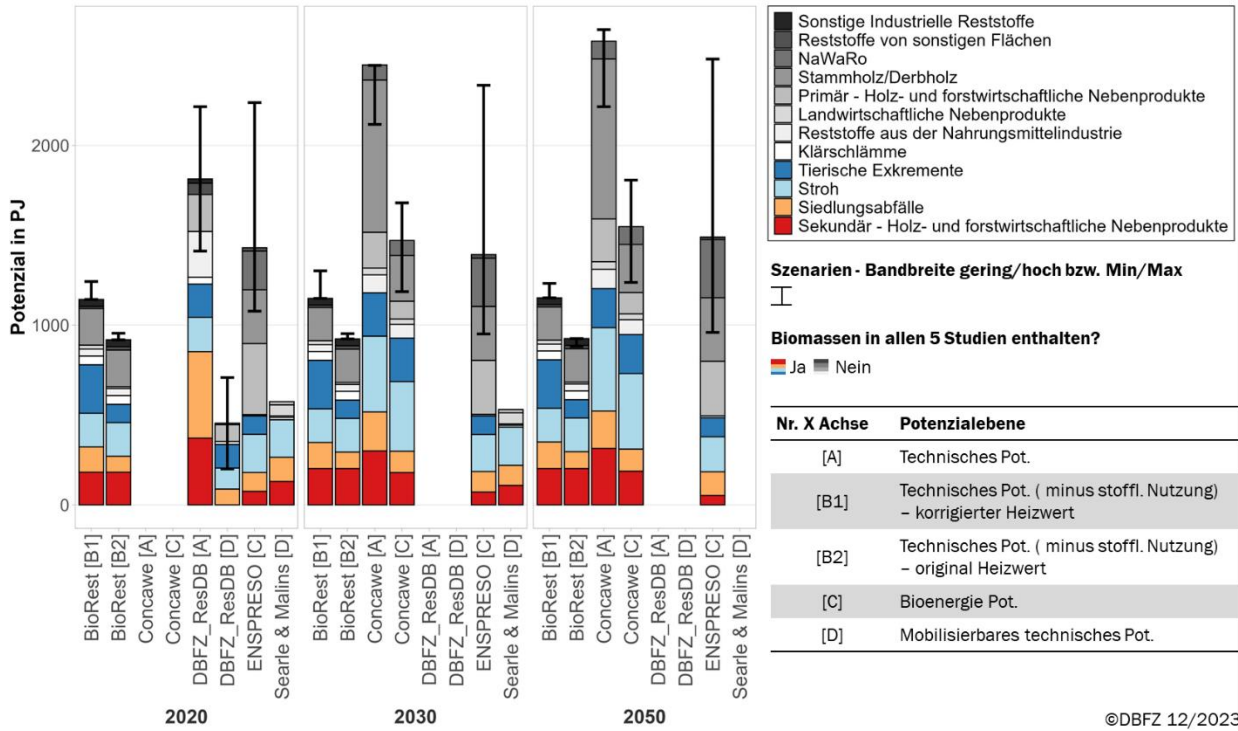


Abbildung 4 Biomassepotenziale für Deutschland, mittleres Szenario

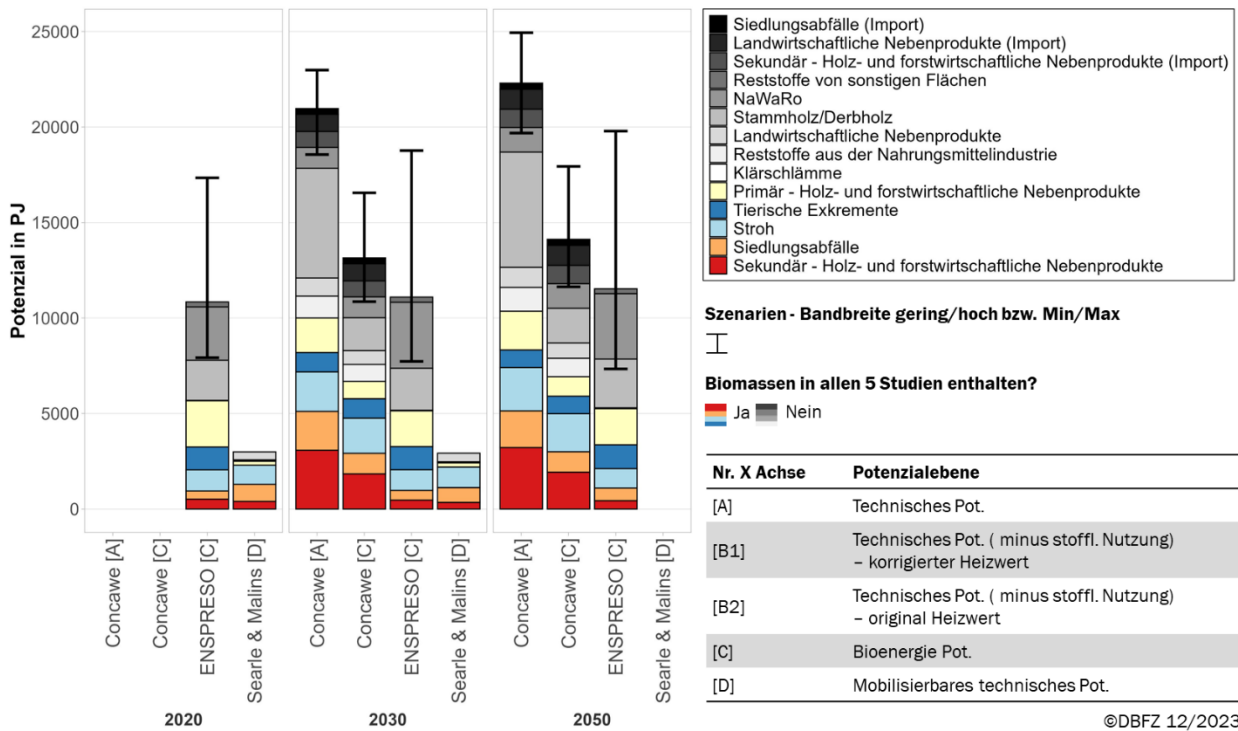


Abbildung 5 Biomassepotenziale für EU-28, mittleres Szenario

7 SUBSTITUTIONSPOTENZIAL BEZUGSRAHMEN HEUTIGE MINERALÖLPRODUKTE

Das heutige **Produktportfolio der Mineralörraffinerien** umfasst neben Kraftstoffen für den Verkehrssektor und Brennstoffen für andere energetische Nutzungen auch mineralölbasierte Produkte und Zwischenprodukte. Wie in Abbildung 6 vereinfacht dargestellt, wird insbesondere der Bedarf an Kraft- und Brennstoffen durch eine zunehmende Elektrifizierung auf Basis erneuerbarer Energien perspektivisch deutlich zurückgehen. Neben einem verbleibenden Bedarf an Kraftstoffen, vor allem für den Flug- und Seeverkehr, werden insbesondere Nebenprodukte wie beispielsweise Schmierstoffe und Bitumen sowie Ausgangsstoffe für die chemische Industrie von Bedeutung bleiben. Hier können gemäß Chemistry4Climate (Ausfelder et al. 2023) weiterhin Naphtha oder perspektivisch auch alternative Kohlenwasserstoffe wie Methanol eine zunehmende Rolle spielen.

Der Raffinerieoutput in Deutschland belief sich im Jahr 2023 auf 17,3 Mio. t Ottokraftstoff, 33,4 Mio. t Dieselloststoff, 26,9 Mio. t sonstige Hauptprodukte, 9,5 Mio. t Fluggturbinenkraftstoff sowie 8,0 Mio. t weitere Nebenprodukte; in Summe 95 Mio. Tonnen (BAFA 2023). Mit dem Ziel der Klimaneutralität betrachten zahlreiche Studien die erforderliche Entwicklung von Energiebedarf und Energieträgern im Verkehrssektor. So kommt beispielsweise Agora für 2045 zu einem verbleibenden Bedarf von lediglich 10,2 Mio. t (Öläquivalente) für Otto-, Diesel- und Fluggturbinenkraftstoff, was einem Rückgang um 83 % gegenüber 2023 entsprechen würde (Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut 2021). Hinzu kämen erhebliche Mengen, die als Ressourcen für die stoffliche Nutzung, v. a. in der chemischen Industrie, substituiert werden müssen sowie ggf. verbleibende Bedarfe im Bereich von bspw. Hochtemperatur-Prozesswärme oder Regelernergie (Meisel et al. 2023). Selbst bei vollständiger Substitution dieser sonstigen Raffinerieprodukte würde allein die Entwicklung im Verkehrssektor das Raffinerieoutput um 53 % reduzieren. Für alle verbleibenden Anwendungen kommen Energieträger und Kohlenwasserstoffe auf Basis der in Abbildung 2 dargestellten Ressourcen in Betracht.

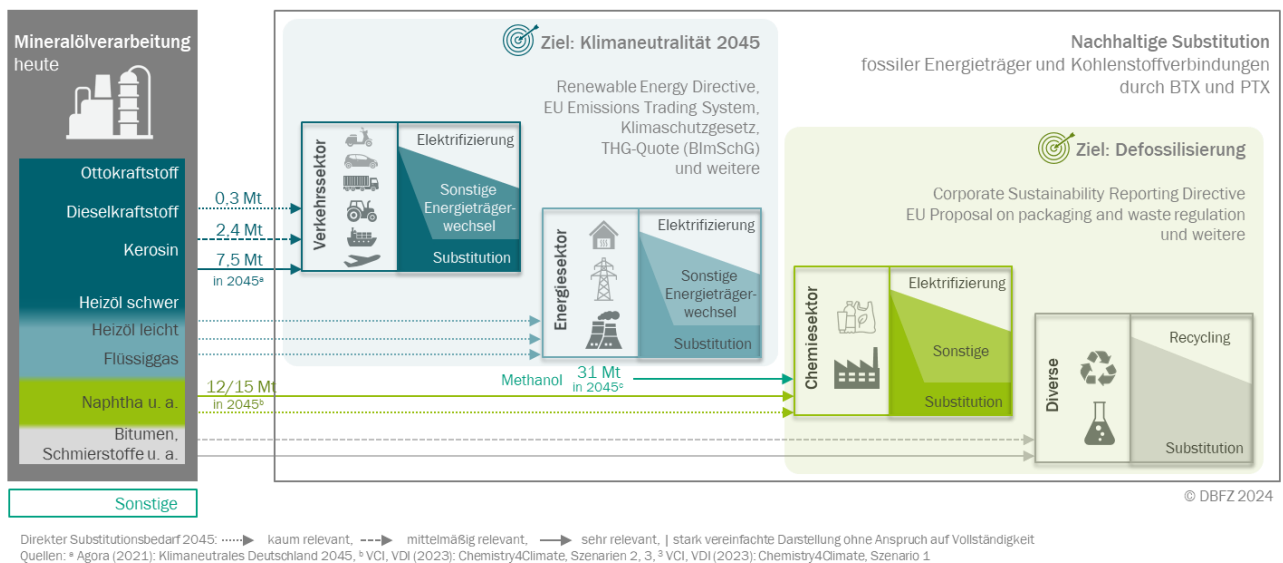


Abbildung 6 Heutige Mineralölverarbeitung und zukünftige Veränderungen in verschiedenen Sektoren

Grundsätzlich stehen für die Bereitstellung von Kraftstoffen und Energieträgern aus Biomasse eine **Vielzahl von Technologieoptionen** zur Verfügung. Sie unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der geeigneten Biomasse und der Art des Hauptproduktes, aber auch bezüglich technischer Kriterien wie Effizienz und anfallenden Nebenprodukten sowie ökonomischen und ökologischen Aspekten wie Kosten und Treibhausgasbilanzen. Vor allem sind sie jedoch unterschiedlich weit entwickelt bzw. kommerziell etabliert. Je weiter der technologische Reifegrad (sog. Technology Readiness Level, TRL) fortgeschritten ist, um so belastbarer kann die Technologie bewertet werden. Um die große Bandbreite und Komplexität technologischer Möglichkeiten einzugrenzen, wird nachfolgend lediglich eine mögliche Option des Substitutionspotenzials für wenige ausgewählte Technologien, die einen möglichst hohen Entwicklungsgrad haben und für die betrachteten Rest- und Abfallbiomassen geeignet sind, aufgezeigt (siehe 8 Anhang sowie Abbildung 9). Das Ergebnis bildet, basierend auf den Studien, jeweils ein mögliches Substitutionspotenzial ab und kann zur Orientierung dienen. Bei der Nutzung alternativer Prozessketten können sich die Produktanteile und -mengen auch deutlich verschieben. Aufgrund der Auswahl der Technologien besteht ein Großteil des abgeleiteten Substitutionspotenzials aus **Methan und Methanol**. Dies ergibt sich aus den breiten Einsatzmöglichkeiten des anaeroben Fermentationsprozesses (Biogas/Biomethan) für eine Vielzahl von Ressourcen und dem Prozess der Vergasung mit anschließender Methanolsynthese für holzartige lignocellulosehaltige Biomassen. Ölbasierte Rest- und Abfallstoffe sind lediglich in Form von gebrauchtem Speiseöl bzw. Altspeisefett (UCO) und tierischen Fetten Bestandteil der Studien. In Verbindung mit der Hydrotreating-Technologie ergibt sich ein relativ geringes Substitutionspotenzial, welches Diesel-, Kerosin- und Naphthasubstitute umfasst. Die Herstellung von Ethanol aus geeigneten Abfall- und Reststoffen stellt eine weitere Option dar. Aufgrund der in den Studien nicht ausreichend spezifizierten Biomassen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung wurde diese Option jedoch nur für die in ENSPRESO ausgewiesenen zucker- und stärkehaltigen Anbaubiomassen berücksichtigt.

Eine direkte **Substitution des Mineralöls** innerhalb der etablierten Prozessketten ist somit derzeit kaum möglich. Zum einen sind die geeigneten und verfügbaren (öl- und fetthaltigen) Biomassepotenziale in Deutschland und der EU relativ gering. Diese können mit den etablierten, fossilbasierten Verfahren verarbeitet werden. Andererseits sind die bereits hinreichend weit entwickelten biobasierten Konversionsverfahren auf Grundlage dieser Potenziale nicht geeignet, um das derzeitige Produktportfolio der Mineralölindustrie (in Breite und Menge) direkt zu substituieren. Für die Integration biogener Ressourcen bedarf es daher einer gezielten (Weiter-) Entwicklung geeigneter Verfahren und Prozessketten. Eine Möglichkeit wäre, die erforderliche Technologiereife bei der Aufbereitung von für etablierte Raffinerieprozesse ungeeigneten Biomassen hin zu einem verarbeitbaren Biocrude zu erreichen. Dies würde in gewissem Umfang eine Beibehaltung der nachfolgenden Verarbeitungsketten ermöglichen. Neben Naphtha betrifft dies auch andere Nebenprodukte zur Weiterverarbeitung in der chemischen Industrie wie beispielsweise Aromaten, Weißöle, Paraffine und Prozessöle. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Anpassung der gesamten Bereitstellungsketten für biobasierte Energieträger und Produkte. Diese könnten dann stärker an den verfügbaren Ressourcen und ausgereiften Prozessen ausgerichtet und bestenfalls auf eine höhere Gesamteffizienz hin optimiert werden. Die beiden Entwicklungsoptionen sind in Abbildung 7 grün dargestellt.

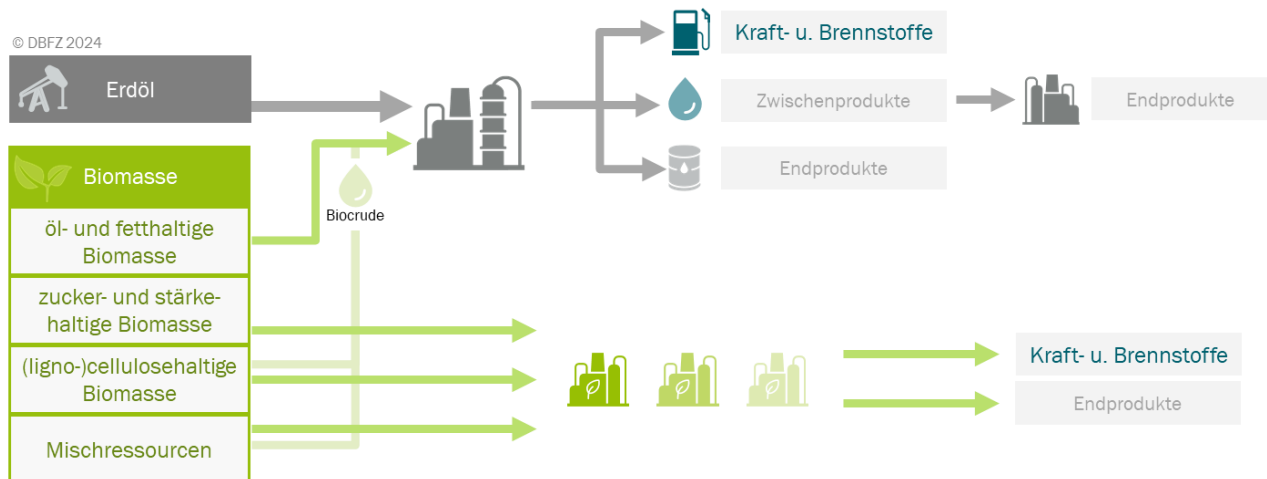


Abbildung 7 Optionen angepasster biomassebasierter Bereitstellungsketten

Basierend auf den Biomassepotenzialen der fünf Studien ergeben sich für **Deutschland** unter den definierten Annahmen und Technologieoptionen (siehe 8 Anhang) spezifische Produktpotenziale biogener Substitute für Diesel, Kerosin, Naphtha, Ethanol, Methan und Methanol. ENSPRESO identifiziert, abweichend von den anderen Studien, in sehr begrenztem Umfang auch ein Potenzial an Raps, Zuckerrübe und Getreide, welches mit 89 bis 98 PJ bzw. 2,1 Mtoe etwa auf dem Niveau der in Deutschland genutzten Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse von 2020 bzw. 2022 liegt (BLE 2024a). Die spezifischen Mengen- und Substitutionspotenziale der biomassebasierten Kraftstoffe und Produkte sind für Deutschland in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2 Mengen- (in Millionen Tonnen Öleinheiten, Mtoe) und Substitutionspotenzial (in %) biomassebasierter (Zwischen-) Produkte gegenüber Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland 2022

	BioRest 2050	Concawe 2050	DBFZ-ResDB 2015	ENSPRESO 2050	Searle & Malins 2030
Diesel	0,03 Mtoe [0,1 %]	0,10 Mtoe [0,3 %]	0,03 Mtoe [0,1 %]	0,14 Mtoe [0,4 %]	
Kerosin	0,17 Mtoe [1,8 %]	0,56 Mtoe [6,0 %]	0,14 Mtoe [1,5 %]	0,78 Mtoe [8,4 %]	
Naphtha	0,09 Mtoe [0,7 %]	0,29 Mtoe [2,3 %]	0,07 Mtoe [0,6 %]	0,40 Mtoe [3,1 %]	
Ethanol				0,78 Mtoe	
Methan	11,3 Mtoe [BIO]	12,8 Mtoe [BIO] 15,5 Mtoe [TECH]	3,7 Mtoe [MOB] 10,1 Mtoe [TECH]	7,4 Mtoe [BIO]	5,8 Mtoe [MOB]
Methanol	3,7 Mtoe [BIO]	4,5 Mtoe [BIO] 8,1 Mtoe [TECH]	2,2 Mtoe [MOB] 13,1 Mtoe [TECH]	7,5 Mtoe [BIO]	1,7 Mtoe [MOB]

Dargestellt sind produktspezifische Erträge bezogen auf Mittelwerte der Konversionseffizienz sowie der Bioenergiepotenziale [BIO], mobilisierbarer Potenziale [MOB] bzw. technischer Potenziale [TECH], in toe (Tonnen Öleinheiten/ oil equivalent)

aus Biomasse gemäß RED Annex IX A

aus Biomasse gemäß RED Annex IX B


aus konventioneller Biomasse

keine Angaben/ nicht berücksichtigt/ nicht betrachtet

Bezogen auf das Referenzjahr 2022 mit etwa 100 Mio. Tonnen Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland (BAFA 2022), ergibt sich auf Basis der mittleren Werte durchschnittlich ein mobilisierbares Substitutionspotenzial von 6 % (DBFZ-ResDB) bzw. 7 % (Searle & Malins), ein Substitutionspotenzial von 15 % (BioRest), 17 % (ENSPRESO) bzw. 18 % (Concawe) basierend auf dem Bioenergiepotenzial sowie von 23 % (DBFZ-ResDB) bzw. 24 % (Concawe) basierend auf dem technischen Potenzial. Diese Gesamtmengen sind in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt.

Wird von einem gegenüber heute bis 2045 deutlich reduzierten Bedarf an v. a. Kraftstoffen ausgegangen und damit von einem beispielsweise um 50 % reduzierten Raffinerieoutput (Abbildung 6), ergibt sich jeweils ein doppelt so hohes relatives Substitutionspotenzial.

Tabelle 3 Gesamtsubstitutionspotenzial biomassebasierter (Zwischen-)Produkte gegenüber Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland (Referenzjahr 2022)

	BioRest 2050	Concawe 2050	DBFZ-ResDB 2015	ENSPRESO 2050	Searle & Malins 2030
Mobilisierbares Potenzial	⊘	⊘	6,2 Mtoe [6 %] 3,0–9,4 Mtoe	⊘	7,5 Mtoe [7 %] 7,4–7,7 Mtoe
Bioenergiepotenzial	15,3 Mtoe [15 %] 14,8–15,7 Mtoe	18,3 Mtoe [18 %] 14,0–21,8 Mtoe	⊘	17,0 Mtoe [17 %] 9,0–31,2 Mtoe	⊘
Technisches Potenzial	⊘	24,5 Mtoe [24 %] 20,3–27,7 Mtoe	23,5 Mtoe [23 %] 18,2–28,7 Mtoe	⊘	⊘

Dargestellt sind jeweils aufsummierte produktspezifische Mittelwerte der Konversionseffizienz bezogen auf Mittelwerte der Potenziale (jeweils oben) sowie aufsummierte produktspezifische Bandbreiten der Konversionseffizienz bezogen auf, sofern vorhanden, Bandbreiten der Potenziale (jeweils unten) in Mtoe (Millionen Tonnen Öleinheiten/ oil equivalent).

⊘ keine Angaben/ nicht berücksichtigt/ nicht betrachtet

Basierend auf den Biomassepotenzialen aus drei der fünf Studien ergeben sich spezifische Produktpotenziale biogener Substitute für die **Europäische Union**. Das grundsätzliche Bild ist vergleichsweise ähnlich, wobei das relative Substitutionspotenzial in Summe für die EU über dem für Deutschland liegt. Die spezifischen Mengen- und Substitutionspotenziale der biomassebasierten Kraftstoffe und Produkte für die Europäische Union sind in Tabelle 4 aufgeführt. In Summe ergibt sich gegenüber den etwa 521 Mtoe Raffinerieaustöß in der Europäischen Union im Jahr 2021 (Eurostat 2023) durchschnittlich ein mobilisierbares Substitutionspotenzial von 8 % (Searle & Malins), ein Substitutionspotenzial von 26 % (ENSPRESO) bzw. 31 % (Concawe) basierend auf dem Bioenergiepotenzial sowie von 44 % (Concawe) basierend auf dem technischen Potenzial. Die Gesamtmengen des Substitutionspotenzials in der Europäischen Union sind in Tabelle 5 zusammenfassend gegenübergestellt. Auch hier würde ein perspektivisch sinkender Raffinerieoutput das relative Substitutionspotenzial entsprechend erhöhen.

Tabelle 4 Mengen- (in Millionen Tonnen Öleinheiten, Mtoe) und Substitutionspotenzial (in %) biomassebasierter (Zwischen-) Produkte gegenüber Raffinerieoutput von Mineralölprodukten in der Europäischen Union (Referenzjahr 2021)






























	Concawe 2050	ENSPRESO 2050	Searle & Malins 2030
Diesel	 0,10 Mtoe [0,3 %]	 0,14 Mtoe [0,4 %]	
Kerosin	 0,56 Mtoe [6,0 %]	 0,78 Mtoe [8,4 %]	
Naphtha	 0,29 Mtoe [2,3 %]	 0,40 Mtoe [3,1 %]	
Ethanol		 0,78 Mtoe	
Methan	 12,8 Mtoe [BIO] 15,5 Mtoe [TECH]	 7,4 Mtoe [BIO]	 5,8 Mtoe [MOB]
Methanol	 4,5 Mtoe [BIO] 8,1 Mtoe [TECH]	 7,5 Mtoe [BIO]	 1,7 Mtoe [MOB]
<p>Dargestellt sind produktspezifische Erträge bezogen auf Mittelwerte der Konversionseffizienz sowie der Bioenergiepotenziale [BIO], mobilisierbarer Potenziale [MOB] bzw. technischer Potenziale [TECH], in toe (Tonnen Öleinheiten/ oil equivalent)</p> <p> aus Biomasse gemäß RED Annex IX A</p> <p> aus Biomasse gemäß RED Annex IX B</p> <p> aus konventioneller Biomasse</p> <p> keine Angaben/ nicht berücksichtigt/ nicht betrachtet</p>			

Tabelle 5 Gesamtsubstitutionspotenzial biomassebasierter (Zwischen-) Produkte bezogen auf erzeugte Raffinerieprodukte in der Europäischen Union (Referenzjahr 2021)

	Concawe 2050	ENSPRESO 2050	Searle & Malins 2030
Mobilisierbares Potenzial			42 Mtoe [8 %] 41–43 Mtoe
Bioenergiepotenzial	168 Mtoe [31 %] 142–198 Mtoe	136 Mtoe [26 %] 75–257 Mtoe	
Technisches Potenzial	229 Mtoe [44 %] 205–256 Mtoe		
<p>Dargestellt sind jeweils aufsummierte produktspezifische Mittelwerte der Konversionseffizienz bezogen auf Mittelwerte der Potenziale (jeweils oben) sowie aufsummierte produktspezifische Bandbreiten der Konversionseffizienz bezogen auf, sofern vorhanden, Bandbreiten der Potenziale (jeweils unten) in Mtoe (Millionen Tonnen Öleinheiten/ oil equivalent).</p> <p> keine Angaben/ nicht berücksichtigt/ nicht betrachtet</p>			

Bei den hier betrachteten fermentativen Prozessen entsteht neben den Hauptprodukten Ethanol und Methan zudem **CO₂ als Nebenprodukt**. Dieses kann gegenüber der CO₂-Abtrennung aus der Luft via sogenannter Direct air capture (DAC) relativ kosteneffizient abgetrennt und als biobasierte Kohlenstoffquelle einer Nachnutzung zugeführt (Prognos 2021). Basierend auf dem mobilisierbaren Potenzial sind das für Deutschland bspw. 5 bis 12 Mio. t CO₂ (DBFZ Res-DB) bzw. 13 bis 14 Mio. t CO₂ (Searle & Malins). Bei der Betrachtung des Bioenergiepotenzials belaufen sich diese Mengen auf 26 bis 27 Mio. t CO₂ (BioRest), 23 bis 37 Mio. t CO₂ (Concawe) bzw. 11 bis 27 Mio. t CO₂ (ENSPRESO). In Abhängigkeit von der stofflichen oder energetischen Nachnutzung, zum Beispiel auch für Power-to-X (PTX), lassen sich hier weitere Potenziale heben (sog. Carbon Capture and Utilization, CCU). Analog zu anderen kohlenstoffhaltigen Koppelprodukten wie bspw. Gärrest oder Schlempe können diese biobasierten Kohlenstoffmengen auch als Senke bzw. Speicher in nachhaltige Konzepte eingebunden werden.

In den spezifischen sowie den Gesamtpotenzialen von Tabelle 2 bis Tabelle 5 sind einige Biomassen nicht berücksichtigt: Wald- bzw. Stammholz sowie lignocellulosic crops. Daraus ergibt sich wiederum ein **nicht berücksichtigtes Methanopotenzial**. Hintergrund ist die Revision der Erneuerbare-Energien-Direktive (RED II), insbesondere die Neufassung des Anhang IX (Delegierte Richtlinie 2024/1405), welche Auswirkung auf die energetische Nutzbarkeit holzartiger Biomasse und Forstbiomasse hat. Das Kaskadenprinzip priorisiert für holzartige Biomasse eine stoffliche Nutzung. Für diese Priorisierung existieren gewisse Ausnahmen (z. B. falls die Wirtschaftlichkeit einer stofflichen Nutzung nicht gegeben ist), welche im Rahmen dieser Studie jedoch nicht quantifizierbar sind. (Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union 2023a) Zudem werden gemäß der Anpassung des Anhang IX durch die EU-Kommission perspektivisch jene nicht als Nahrungs- und Futtermittel geeignete Pflanzen nur dann für fortschrittliche Biokraftstoffe nutzbar sein, wenn sie und auf marginalen bzw. stark degradierten Flächen angebaut. Das in Tabelle 2 bis Tabelle 5 nicht berücksichtigte Methanopotenzial beläuft sich beispielsweise für Deutschland auf insgesamt 2,7 Mtoe (BioRest), 3,4 bis 9,1 Mtoe (Concawe) bzw. 5,1 bis 6,7 Mtoe (ENSPRESO). Auch weitere Fraktionen wie beispielsweise Waldrestholz sind gemäß EU-Vorgaben möglicherweise ausgeschlossen oder nur anteilig nutzbar.

8 ANHANG

METHODISCHES VORGEHEN

A | VERGLEICHSANALYSE DER BIOMASSEPOTENZIALE

Für die Vergleichbarkeit der Biomassepotenziale ist es erforderlich, die Biomassen, die Einheiten, die Szenarien und die Potenzialebenen zu vereinheitlichen. Für die Vereinheitlichung der Biomassen wurden die einzelnen Biomassen aus den Studien übergeordneten **Biomassekategorien** zugeordnet. Die Kategorien orientieren sich an der Logik der DBFZ-ResDB (Brosowski et al. 2019) . In Tabelle 6 sind die Biomassekategorien gelistet, die in der Analyse verwendet werden.




Tabelle 6 DBFZ-Biomassekategorien zur Vereinheitlichung der Biomassen

DBFZ-Kategorien	Vereinheitlichte Kategorien
Landwirtschaftliche Nebenprodukte	Agrarreststoffe
Stroh	Agrarreststoffe
Tierische Exkrememente	Agrarreststoffe
Primär - Holz- und forstwirt. Nebenprodukte	Forstreststoffe
Sekundär - Holz- und forstwirt. Nebenprodukte	Forstreststoffe
Siedlungsabfälle	Abfälle
Klärschlämme	Abfälle
Reststoffe aus der Nahrungsmittelindustrie	Industrielle Reststoffe
Sonstige Industrielle Reststoffe	Industrielle Reststoffe
Reststoffe von sonstigen Flächen	Reststoffe von sonstigen Flächen
NawaRo	Agrar
Stammholz/Derbholz	Forst


Bei der Zuordnung wurden die Biomassen aggregiert, wenn in einer Studie mehrere Biomassen einer DBFZ-Kategorie zugeordnet wurden. Gab es hingegen in einer Studie eine Biomasse, die mehrere DBFZ-Kategorien umfasste, wurde die Biomasse der DBFZ-Kategorie zugeordnet, die nach Einschätzung der Autor:innen die relevanteste DBFZ-Kategorie für diese Biomasse darstellt. Um die zugrundeliegenden Methodiken zwischen den Studien zu verstehen und zu untersuchen, wurden in der Analyse für die Gegenüberstellung der Studienannahmen exemplarisch vier Biomassen ausgewählt (Stroh, tierische Exkrememente, primäres Waldrestholz und

Siedlungsabfälle) und im Detail betrachtet. Tabelle 7 zeigt die Annahmen zu Entnahmeraten bzw. zur Mobilisierung, die innerhalb der einzelnen Studien genutzt wurden.

Tabelle 7 Entnahmeraten der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall), Bezug Deutschland


	BioRest	Concawe	DBFZ-ResDB	ENSPRESO	Searle & Malins
Entnahmerate Stroh (Bezug theoretisches Potenzial)	20 % / 27–43 %	45 %	36 %	30 %	38 %
Mobilisierungsgrenze Gülle/Mist (GVE)	keine	gering \geq 200 GVE; mittel 20 % Steigerung; hoch \geq 100 GVE	keine	Betrieb \geq 200 GVE	
Entnahmerate Waldrestholz	keine Entnahme	Entnahme (Stümpfe), Entnahmerate unbekannt	19 % (Stümpfe und Wurzeln)	gering (Stümpfe und Wurzeln) mittel (Restholz- entnahme)	32 %
Biogener Anteil Siedlungsabfall	92-95 %	Keine Angabe k.A.	99 %		63 %

GVE = Großvieheinheiten

 keine Angaben

In Tabelle 8 werden die zugrunde liegenden Nutzungsannahmen der vier Biomassen gelistet.

Tabelle 8 Nutzungsannahmen der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall), Bezug Deutschland

		BioRest	Concawe	DBFZ-ResDB	ENSPRESO	Searle & Malins
Stoffliche Nutzung	Stroh	⊘	8 %	39 %	50-60 %	22 %
Energetische Nutzung	Stroh	⊘	92 % ^a	0,9 % ^b	40-50 % ^a	8 % ^b
Stoffliche Nutzung	Gülle/Mist,	⊘	Mist=50 % Gülle= 0 %	0 %	Mist=50 % Gülle=0 %	⊘
Energetische Nutzung	Gülle/Mist	100 %	Mist=50 % Gülle=100 %	29 % ^b	Mist=50 % Gülle=100 %	⊘
Stoffliche Nutzung	Restholz	0 % alles	50 %	1,2 %	50-60 %	⊘
Energetische Nutzung	Restholz	verbleibt im Wald	50 % ^a	42 % ^b	40-50 % ^a	57 % ^b
Stoffliche Nutzung	Siedlungs- abfall ^c	⊘	50-55 %	29 %	abhängig von Recycling- quote	⊘
Energetische Nutzung	Siedlungs- abfall	⊘	45-50 %	44 % ^b		⊘

^a Anteil entspricht Bioenergiepotenzial >> bestehende energetische Nutzungen sind nicht berücksichtigt,


^b Anteil entspricht bestehender energetischer Nutzung >> nicht mehr verfügbar als zusätzliches Potenzial für energetische Nutzung,

^c Siedlungsabfall genannt in den Studien: BioRest = Biogut; Concawe = Biowaste; DBFZ-ResDB = Biogut aus privaten Haushalten; ENSPRESO = Biodegradable waste; Searle = biogenic waste

⊘ keine Angaben

Tabelle 9 zeigt die Datenbasis, auf deren Grundlage die Biomassepotenziale berechnet wurden. Alle dargestellten Werte in den drei Tabellen beziehen sich zum einen nur auf die Annahmen für Deutschland sodass auf europäischer Ebene die Annahmen bzw. Nutzungsanteile variieren können. Außerdem beziehen sich die Angaben auf das mittlere Szenario bzw. die Mittelwerte, falls Szenarien bzw. Spannbreiten für die Potenziale enthalten waren.

Tabelle 9 Datenbasis der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall) - Bezug DE

	BioRest	Concawe	DBFZ-ResDB	ENSPRESO	Searle & Malins
Datenbasis Stroh	Anbaufläche & Ertrag (Destatis)	Anbaufläche & Ertrag (FADN EU-28, EUROSTAT, EU Agr. Outlook, Soilassociation)	Produktion (Destatis)	Anbaufläche & Ertrag (CAPRI)	Produktion (FAO)
Datenbasis Gülle	Viehbestand (Destatis)	Viehbestand (CAPRI, FSS)	Viehbestand (Destatis)	Viehbestand (CAPRI)	Gülmengende (EUROSTAT)
Datenbasis Waldrestholz	Zuwachs, Bestand, Holzeinschlag, Holzverwendungsszenarien (WEHAM/BWI/BfN)	gemäß (Waldinventur, Elbersen et al.) ^a	Theoretisches Restholzpotenzial * Anteil Entnahme (BWI unter Verwendung ITOC Modell, WEHAM)	Bestand + Zuwachs - Sterblichkeit (Waldinventur + EFISCEN-Modell)	Produktion (FAO)
Datenbasis Siedlungsabfälle	Abfallstatistik (Destatis)	Abfallstatistik (EUROSTAT)	Abfallstatistik (Destatis)	Abfallstatistik (EUROSTAT)	Abfallstatistik (EUROSTAT)

^a $\frac{\text{Einschlag}}{1-\text{Ernteverlust}} * \text{Faktor}_{\text{Nichtderholz}} + \frac{\text{technStammholzpot.}}{1-\text{Ernteverlust}} * \text{Faktor}_{\text{Nichtderholz}}$ (Nichtderholz: Durchmesser < 7 cm)

Die Potenziale der DBFZ-ResDB und von Searle & Malins sind in Tonnen Trockenmasse (t[DM]) angegeben, sodass diese in **energiespezifische Einheiten** überführt werden mussten. Da die DBFZ-ResDB mit 77 Reststoffen die meisten Biomassen beinhaltet, wurden im ersten Schritt für die Top-15-Biomassen die unteren Heizwerte aus der Phylis-Datenbank recherchiert. Im zweiten Schritt wurden für die fehlenden Biomassen, die in Searle & Malins enthalten sind, aber nicht zu den Top 15 der DBFZ-ResDB zählen, ebenfalls Heizwerte aus der Phylis-Datenbank und weiteren Quellen recherchiert (Bidingmaier et al. 2017; Bauforumstahl e.V. o.A.; Roskosch und Heidecke 2018; Kaltschmitt et al. 2016). Die zusätzlichen Heizwerte wurden auch für die jeweiligen Biomassen aus der DBFZ-ResDB angenommen. Für die restlichen Biomassen aus der DBFZ-ResDB, für die in Schritt eins und zwei noch keine Heizwerte recherchiert wurden, wurden die Heizwerte aus BioRest angenommen. Für Biomassen, die nicht bereits in Schritt eins oder zwei sowie BioRest enthalten waren, wurde der einheitliche Heizwert aus der Concawe-Studie von 16,75 GJ/t[DM] angenommen (Panoutsou und Maniatis 2021). Abschließend wurden die mengerspezifischen Potenziale (t[DM]) anhand der zugeordneten biomassespezifischen Heizwerte in energiespezifische Potenziale umgerechnet. Die Zieleinheit ist PJ.

In Ergänzung zur Vereinheitlichung der Einheiten wurde für BioRest das Biomassepotenzial für die feuchten Biomassen angepasst. In der Originalstudie waren Potenziale für die feuchten Biomassen bereits als Biomethanpotenziale ausgewiesen. Um diese Biomethanpotenziale in Primärenergiepotenziale (mit Ziel der Vergleichbarkeit zu den anderen Studien) zu überführen, wurden die Biomethanpotenziale anhand der in der Studie angegebenen Heizwerte in massespezifische Einheiten zurückgerechnet. Zusätzlich wurden die massespezifischen Einheiten mit Hilfe der angegebenen Wassergehalte in t [DM] überführt. Anschließend wurden die trockenmassespezifischen Potenziale anhand der oben biomassespezifischen zugeordneten Heizwerte in energiespezifische Einheiten umgerechnet, die das Primärenergiepotenzial darstellen.

Bei der Betrachtung von Biomassepotenzialen wurden in den analysierten Studien **unterschiedliche Potenzialebenen** betrachtet. Diese wurden eindeutigen Potenzialebenen zugeordnet, die wie folgt definiert sind:

- Das **theoretische Biomassepotenzial** ist die physikalische Obergrenze des zur Verfügung stehenden Biomasseangebots in einem definierten zeitlichen und räumlichen Rahmen. Dieses Potenzial beschreibt ausschließlich die theoretisch nutzbare Menge an Biomasse und berücksichtigt dabei keinerlei Restriktionen. (Thrän und Pfeiffer 2021)
- Das **technische Biomassepotenzial** leitet sich von dem theoretischen Biomassepotenzial unter der Berücksichtigung von technischen, physikalischen und sozio-ökologischen Faktoren ab. Zu technischen und physikalischen Einschränkungen gehören Faktoren wie Bergungsrate und Lagerverluste. Die ebenfalls „unüberwindbaren“ sozio-ökologischen Faktoren beinhalten gesetzlich oder gesellschaftlich verankerte Restriktionen wie (Natur-) Schutzgebiete oder Erhalt der natürlichen Bodenfruchtbarkeit. (Kaltschmitt et al. 2016)
- Die **stoffliche Nutzung** beschreibt den Anteil des technischen Potenzials, welches bereits stofflich genutzt wird.
- Das **Bioenergiepotenzial** umfasst das technische Biomassepotenzial, welches nicht stofflich genutzt wird und somit theoretisch der energetischen Nutzung zur Verfügung steht. Energetische Nutzungen werden nicht explizit quantifiziert und sind Bestandteil des Bioenergiepotenzials.
- Die **energetische Nutzung** stellt den Anteil dar, der vom technischen Biomassepotenzial bereits energetisch genutzt wird.
- Das **mobilisierbare technische Biomassepotenzial** ergibt sich aus dem technischen Biomassepotenzial, welches aktuell weder in einer energetischen noch stofflichen Nutzung gebunden ist. Somit ist es das Biomassepotenzial, welches für neue Nutzungsoptionen mobilisiert werden kann.

Einen Überblick über die unterschiedlichen Potenzialebenen bietet Abbildung 8.

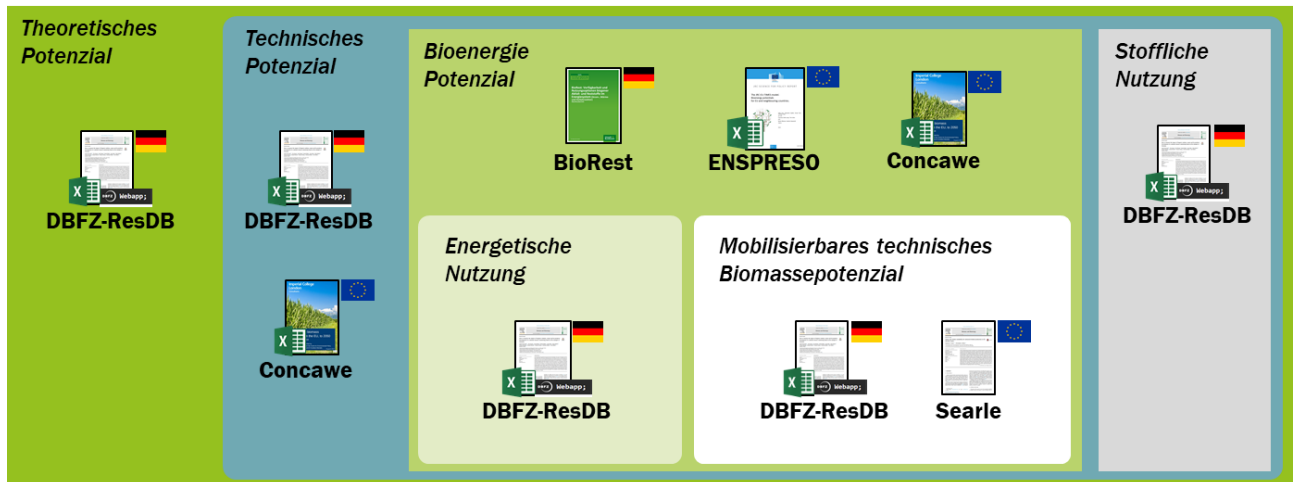


Abbildung 8 Potenzialebenen

In den Studien werden zum Teil **Szenarien** für die Zukunft angenommen, die zu unterschiedlichen Potenziale führen. Dies betrifft BioRest, Concawe und ENSPRESO. Die Werte aus der DBFZ-ResDB variieren zwischen einem minimalen und maximalen Potenzial. Searle & Malins haben weder Szenarien noch Minima und Maxima in ihren Potenzialen angegeben. Auf Grundlage von Experteneinschätzungen am DBFZ wurden aus den Studien die Szenarien bzw. Werte ausgewählt, welche sich für die vergleichende Analyse am besten eignen. Ziel ist es, die mittleren Szenarien und Werte zu vergleichen. In Tabelle 10 sind die gewählten Szenarien gelistet. In den grafischen Auswertungen werden die Spannen zwischen den Szenarien bzw. Werten mit Hilfe von Spannbreiten abgebildet.

Tabelle 10 Szenarienzuordnung und -auswahl

Studie		Szenariename
BioRest	(Fehrenbach et al. 2018)	Business as usual (BAU) = Mittel
Concawe	(Panoutsou und Maniatis 2021)	Medium = Mittel
DBFZ-ResDB	(DBFZ Ressourcendatenbank)	Durchschnitt = Mittel
ENSPRESO	(Ruiz et al. 2015)	ENS_Med = Mittel
Searle & Malins	(Searle und Malins 2016)	keine Szenarien -> Wert = Mittel

B | ABSCHÄTZUNG DES SUBSTITUTIONSPOTENZIALS FÜR MINERALÖLPRODUKTE

Die Übertragung der Biomassepotenziale in Produktmengen- bzw. Substitutionspotenziale erfolgte wie folgt:

1. Auswahl der Prozesspfade zur Bereitstellung biobasierter Kraftstoffe (Abbildung 9),
Kriterien:
 - Reifegrad der Technologie mindestens bei TRL 8, was der Marktreife entspricht. Technology Readiness Level (TRL): etabliertes System für eine Klassifizierung der Technologiereife, ursprünglich neunstufig und durch die IEA auf elf Stufen erweitert. (Hauschild et al. 2022)
 - Konversionseffizienz
$$\eta = \frac{E_{Produkt}}{E_{Biomasse}}$$
 - Eignung möglichst für Flug- oder Schiffsverkehr (und ggf. Schwerlastverkehr)
2. Zuordnung der Einzelbiomassen zu den Ressourcengruppen
 - Zucker- und stärkehaltige Biomassen (Zuckerrübe, Getreide)
 - Öl- und fetthaltige Biomassen (Pflanzenöl, Used cooking oil)
 - Halmgutartige lignocellulosehaltige Biomasse (z. B. Stroh und sonstige landwirtschaftliche Nebenprodukte, halmgutartiges Grüngut und Landschaftspflegematerial)
 - Mischressourcen (z. B. biogene Siedlungsabfälle, tierische Exkrememente, Reststoffe der Nahrungsmittelindustrie, Klärschlamm)
 - Holzartige lignocellulosehaltige Biomasse (z. B. Altholz, Industrierestholz, holziges Grüngut), Papier, Schwarzlauge

Ergebnis ist eine eindeutige Zuweisung von Technologierouten zu den Einzelbiomassen.

Die Ressourcengruppen sind nicht identisch mit den Biomassekategorien aus der Potenzialanalyse, sondern orientieren sich vielmehr an deren Eignung für bestimmte Konversionstechnologien (Abbildung 2).

3. Umrechnung der Biomassemenge in Produktmenge (energetisch) durch Konversionseffizienzen, spezifisch nach Prozesspfad und ggf. Zeithorizont (Tabelle 11).

$$E_{Produkt} = E_{Biomasse} \times \eta$$

Tabelle 11 Konversionseffizienzen η (Annahmen, u. a. gemäß (Meisel et al. 2023) der ausgewählten Technologierouten

Produkt	Ressourcengruppe	2010, 2015, 2020	2030	2050
Diesel [HEFA]	Used cooking oil, Pflanzenöl	10 %	10 %	10 %
Kerosin [HEFA]		55 %	55 %	55 %
Naphtha [HEFA]		30 %	30 %	30 %
Ethanol	Zuckerrübe	60 %	61,5-63 %	64-66 %
Ethanol	Getreide	48 %	49,5-50 %	51,5-53 %
Methan	Halmgutartige lignocellulosehaltige Biomasse und Mischressourcen	56 %	59-62 %	65-70 %
Methanol	Holzartige lignocellulosehaltige Biomasse, Papier, Schwarzlauge	53 %	55-57 %	60-62 %
CO ₂ (als Nebenprodukt)		36 t CO ₂ / TJ Ethanol 56 t CO ₂ / TJ Methan		

4. Ermittlung des (energetischen) Substitutionspotenzials gegenüber dem Status quo:
- Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland 2022 (BAFA 2022)
 - Raffinerieausstoß in der Europäischen Union 2021 (Eurostat 2023)

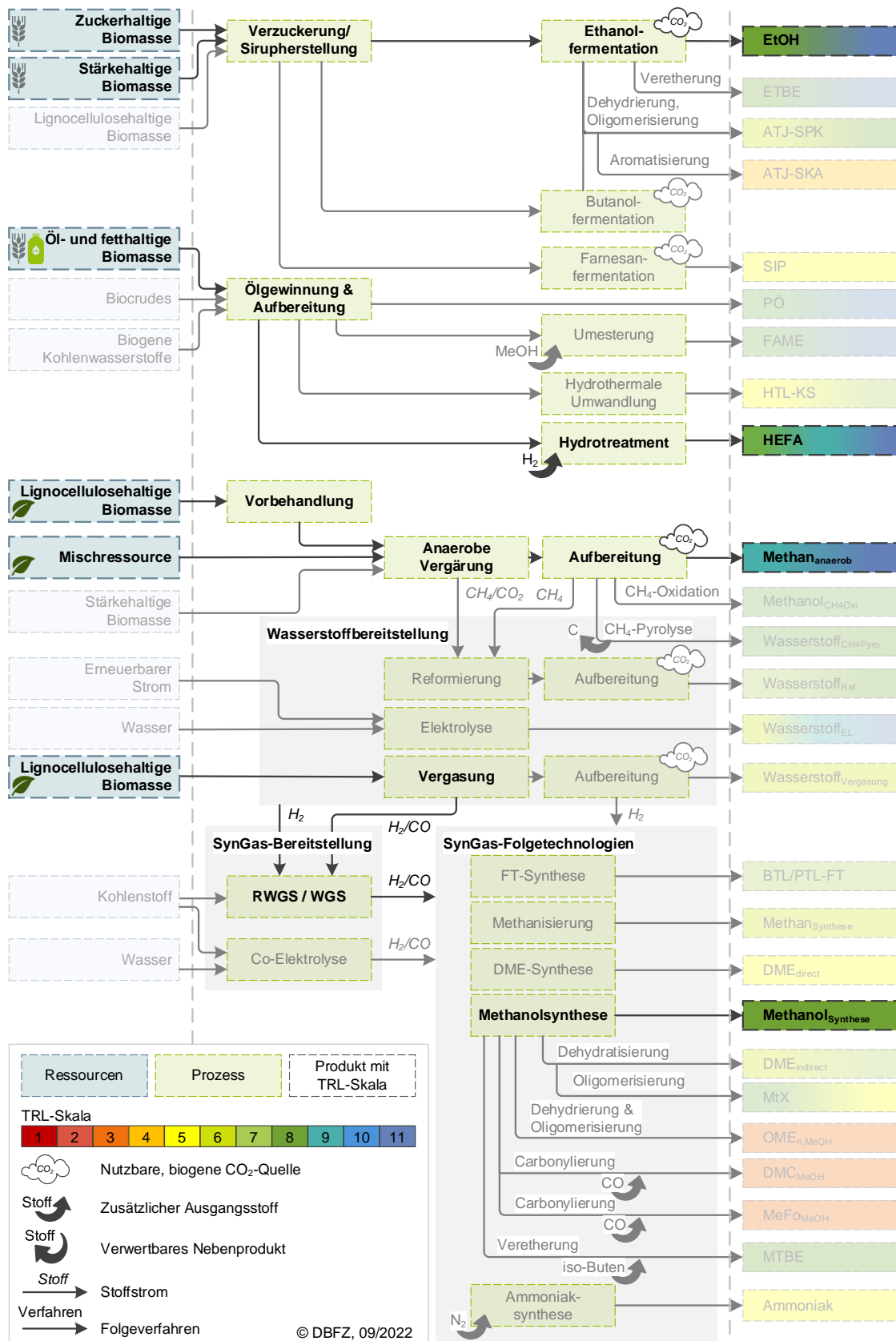


Abbildung ohne Anspruch auf Vollständigkeit. ATJ: Alcohol-to-Jet | BTL: Biomass-to-Liquid | CH₄Ox: Methanoxidation | CH₄Pyro: Methanpyrolyse | DMC: Dimethylcarbonat | DME: Dimethylether | EL: Wasserelektrolyse | ETBE: Ethyltertiärbutylether | EtOH: Ethanol | FAME: Fettsäuremethylester bzw. Biodiesel | FT: Fischer-Tropsch | HEFA: Hydroprozessierte Ester und Fettsäuren | HTL-KS: Kraftstoff der Hydrothermalen Verflüssigung | MeFo: Methylformiat | MeOH: Methanol | MTBE: Methyltertiärbutylether | MTX: Methanol-to-X (hier X = Kraftstoff) | OME: Oxymethylenether | PTL: Power-to-Liquid | Ref: Reformierung | PÖ: Pflanzenölkraftstoff | RWGS: Reverse Wassergas-Shift | SIP: synthetisierte iso-Paraffine von hydroprozessierten fermentierten Zuckern bzw. Farnesan | SKA: synthetisches Kerosin mit Aromaten | SPK: synthetisches paraffinisches Kerosin | TRL: Technology Readiness Level | WGS: Wassergas-Shift

Abbildung 9 Bereitstellungsoptionen erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehr, geänderte Darstellung auf Basis (Hauschild et al. 2022)

9 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

[BIO]	Bioenergiepotenzial
BTX	Biomass to X
CCU	Carbon Capture and Utilization
CO₂-eq	CO ₂ -Äquivalent, Kohlendioxid-Äquivalent
DBFZ-ResDB	DBFZ Ressourcendatenbank
<i>E_{Biomasse}</i>	Energiegehalt der Bioasse
<i>E_{Produkt}</i>	Energiegehalt des Produktes/ der Produkte
EU	Europäische Union
GVE	Großvieheinheiten
HVO/HEFA	Hydrotreated vegetable oil/ Hydrotreated esters and fatty acids
iLUC	Indirekte Landnutzungsänderungen
LULUCF	EU-Verordnung für Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
[MOB]	Mobilisierbares Potenzial
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
Pkw	Personenkraftwagen
PTX	Power to X
RED	EU Renewable Energy Directive (Erneuerbare Energien Richtlinie)
t[DM]	Tonnen Trockenmasse (DM = dry matter)
[TECH]	Technisches Potenzial
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level
UCO	Gebrauchtes Speiseöl, Altspeisefett (used cooking oil)
η	Konversionseffizienz

10 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Abbildung 1	Biobasiertes Substitutionspotenzial für Produkte aus Mineralölraffinerien für Deutschland und Europa.....	3
Abbildung 2	Ressourcen zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, kategorisiert gemäß rechtlichen Vorgaben.....	11
Abbildung 3	Bereitstellungs- und Nutzungskette erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehr	13
Abbildung 4	Biomassepotenziale für Deutschland, mittleres Szenario	16
Abbildung 5	Biomassepotenziale für EU-28, mittleres Szenario	16
Abbildung 6	Heutige Mineralölverarbeitung und zukünftige Veränderungen in verschiedenen Sektoren	17
Abbildung 7	Optionen angepasster biomassebasierter Bereitstellungsketten	19
Abbildung 8	Potenzialebenen	28
Abbildung 9	Bereitstellungsoptionen erneuerbarer Kraftstoffe für den Verkehr, geänderte Darstellung auf Basis (Hauschild et al. 2022).....	31
Tabelle 1	Übersicht der analysierten Studien	14
Tabelle 2	Mengen- (in Millionen Tonnen Öleinheiten, Mtoe) und Substitutionspotenzial (in %) biomassebasierter (Zwischen-) Produkte gegenüber Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland 2022.....	19
Tabelle 3	Gesamtsubstitutionspotenzial biomassebasierter (Zwischen-)Produkte gegenüber Inlandsablieferungen von Mineralölprodukten in Deutschland (Referenzjahr 2022)	20
Tabelle 4	Mengen- (in Millionen Tonnen Öleinheiten, Mtoe) und Substitutionspotenzial (in %) biomassebasierter (Zwischen-) Produkte gegenüber Raffinerieoutput von Mineralölprodukten in der Europäischen Union (Referenzjahr 2021).....	21
Tabelle 5	Gesamtsubstitutionspotenzial biomassebasierter (Zwischen-) Produkte bezogen auf erzeugte Raffinerieprodukte in der Europäischen Union (Referenzjahr 2021)	21
Tabelle 6	DBFZ-Biomassekategorien zur Vereinheitlichung der Biomassen	23
Tabelle 7	Entnahmeraten der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall), Bezug Deutschland	24
Tabelle 8	Nutzungsannahmen der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall), Bezug Deutschland	25
Tabelle 9	Datenbasis der vier ausgewählten Biomassen (Stroh, primäres Waldrestholz, Gülle/Mist, Siedlungsabfall) - Bezug DE.....	26
Tabelle 10	Szenarienzuordnung und -auswahl	28
Tabelle 11	Konversionseffizienzen η (Annahmen, u. a. gemäß (Meisel et al. 2023) der ausgewählten Technologierouten.....	30

11 LITERATURVERZEICHNIS

Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Bierau-Delpont, Frauke; Franßen, Gregor, Gabriel, Kimberly; Geres, Roland; Grobe, Antje et al. (2023): Chemistry4Climate. Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht 2023. Hg. v. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf>.

BAFA (2022): Amtliche Mineralöl Daten für die Bundesrepublik Deutschland. Monat: Dezember 2022. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Eschborn. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/Mineraloel/moel_amtliche_daten_2022_12.html.

BAFA (2023): Amtliche Mineralöl Daten für die Bundesrepublik Deutschland. Monat: Dezember 2023. Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Eschborn, zuletzt aktualisiert am https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/Mineraloel/moel_amtliche_daten_2023_12.xlsx?__blob=publicationFile&v=2.

Bauforumstahl e.V. (o.A.): Heizwerte in alphabetischer Reihenfolge. Wissen/Planungsgrundlagen/Brandschutz. Düsseldorf. Online verfügbar unter <https://bauforumstahl.de/wp-content/uploads/2024/02/Heizwertalpha.pdf>.

Bidlingmaier, Werner; Springer; Christian (2017): Formelsammlung Abfallwirtschaft. Heizwertberechnung. Projekt Orbit. Online verfügbar unter https://www.orbit-online.net/images/orbit-downloads/3_Formula/3_3_Verbrennung/de/3_3_01-Formel-Heizwert-Brennwert.pdf.

BLE (2024a): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022. Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung, Biokraftstoff-Nachhaltigkeitsverordnung. Hg. v. Bundesministerium für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf;jsessionid=C457A859E3B69763F9FBE0D2E7EAD2EA.internet012?__blob=publicationFile&v=4.

BLE (2024b): Kraftstoff Nabisy-Biomassearten. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Nabisy/Biomassearten.xlsx;jsessionid=4B9D69F00680AB6BBBEE06BF1EDADD2A.internet991?__blob=publicationFile&v=10.

BMWK, BMEL, BMUV (2022): Eckpunkte für eine Nationale Biomassestrategie (NABIS). Online verfügbar unter https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/nabis-eckpunktepapier-nationale-biomassestrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

Böttcher, Hannes; Hennenberg, Klaus; Hünecke, Katja; Fehrenbach, Horst; Rettenmaier, Nils; Bischoff, Mascha; Reise, Judith (2020): Naturschutz und fortschrittliche Biokraftstoffe. BfN-Skripten 580. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz. Bonn. Online verfügbar unter <https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript580.pdf>.

Brosowski, André (2021): National Resource Monitoring for Biogenic Residues, By-products and Waste. Development of a Systematic Data Collection, Management and Assessment for Germany. Dissertationsschrift. Universität Leipzig, Leipzig. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_41.pdf.

Brosowski, André; Krause, Tim; Mantau, Udo; Mahro, Bernd; Noke, Anja; Richter, Felix et al. (2019): Arbeitsgruppe Biomassereststoffmonitoring (AG BioRestMon). Schlussbericht. Hg. v. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22019215.pdf>.

Bundesregierung (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31576_Nationale_Biooekonomiestrategie_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=6.

DBFZ Ressourcendatenbank: Version 2.0. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig. Online verfügbar unter webapp.dbfz.de, zuletzt geprüft am 11.12.2023.

DeFAF (2023): Pro und Contra Agroforst. Was spricht für und gegen Agroforst. Hg. v. Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft e.V. Cottbus. Online verfügbar unter <https://agroforst-info.de/chancen/>.

E3Modeling (2018): PRIMES model. Version 2018. Detailed model description. Online verfügbar unter <https://e3modelling.com/wp-content/uploads/2018/10/The-PRIMES-MODEL-2018.pdf>.

Europäische Kommission (2020): IMPACT ASSESSMENT - Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people, vom SWD(2020) 176 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:749e04bb-f8c5-11ea-991b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission (2021a): IMPACT ASSESSMENT - the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport - Table 5, vom SWD(2021) 635 final. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021SC0635>.

Europäische Kommission (2021b): IMPACT ASSESSMENT - ensuring a level playing field for sustainable air transport - Table 6 | Table 7, vom SWD(2021) 633 final. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021SC0633>.

Europäische Kommission; Rat der Europäischen Union (2020): EU-Biodiversitätsstrategie für 2030. Mehr Raum für die Natur in unserem Leben. COM(2020) 380 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:a3c806a6-9ab3-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.

Europäische Kommission; Rat der Europäischen Union (2021): Änderung der Verordnung (EU) 2018/841 hinsichtlich des Geltungsbereichs, der Vereinfachung der Compliance-Vorschriften, der Festlegung der Zielwerte der Mitgliedstaaten für 2030 und der Verpflichtung, bis 2035 gemeinsam Klimaneutralität im Sektor Landnutzung, Forstwirtschaft und Landwirtschaft zu erreichen. LULUCF-Verordnung, vom COM(2021) 554 final. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea67fbc9-e4ec-11eb-a1a5-01aa75ed71a1.0005.02/DOC_1&format=PDF.

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2023a): amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. RED II Revision, vom DIRECTIVE (EU) 2023/2413. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202302413.

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2023b): Verordnung (EU) 2023/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32023R0851>.

Europäisches Parlament; Rat der Europäischen Union (2024): Verordnung (EU) 2024/1610 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Mai 2024 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1610>.

Eurostat (2023): Komplette Energiebilanzen. Tabellencode: nrg_bal_c. Hg. v. Eurostat. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_c/default/table?lang=de.

Fehrenbach, Horst; Giegrich, Jürgen; Köppen, Susanne; Wern, Bernhard; Pertagnol, Joachim; Baur, Frank et al. (2018): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem. (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (ifeu); Institut für Zukunftsenergie- und Stoffstromsysteme (IZES); Öko - Institut e.V. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf.

Fehrenbach, Horst; Köppen, Susanne; Kauertz, Benedikt; Detzel, Andreas; Wellenreuther, Frank; Breitmayer, Elke et al. (2017): BIOMASSEKASKADEN. Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Endbericht. Hg. v. Umwelt Bundesamt. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6872/file/6872_Biomassekaskaden.pdf.

Hauschild, Stephanie; Costa de Paiva, Gabriel; Neuling, Ulf; Zitscher, Tjerk; Köchermann, Jakob; Görsch, Kati (2022): Produktionstechnologien zur Bereitstellung von erneuerbaren Kraftstoffen. In: Jörg Schröder und Karin Naumann (Hg.): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. 1. korrigierte Aufl. Leipzig: DBFZ (DBFZ-Report, 44), S. 67–105.

IPCC (Hg.) (2021): Klimawandel 2021 - Naturwissenschaftliche Grundlagen. Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung. Online verfügbar unter https://www.de-ipcc.de/media/content/AR6-WGI-SPM_deutsch_barrierefrei.pdf.

Kaltschmitt, Martin; Hartmann, Hans; Hofbauer, Hermann (2016): Energie aus Biomasse. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Meisel, Kathleen; Jordan, Matthias; Dotzauer, Martin; Schröder, Jörg; Cyffka, Karl-Friedrich; Dögnitz, Niels et al. (2023): SoBio - Szenarien einer optimalen Biomassenutzung im deutschen Energiesystem. Eine Langfristperspektive. SoBio - Abschlussveranstaltung. Deutsches Biomasseforschungszentrum

(DBFZ). Leipzig, 2023. Online verfügbar unter

https://www.dbfz.de/fileadmin/SoBio/docs/Block1_Szenarien_in_der_Langfristperspektive.pdf.

NLL (2024): Standorte für das LKW-Schnellladenetz an Rastanlagen mit benötigten Netzanschlussleistungen. Hg. v. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur. Online verfügbar unter https://nationale-leitstelle.de/wp-content/uploads/2024/08/20240710_Standortliste_Lkw-Schnellladenetz.pdf.

Panoutsou, Calliope; Maniatis, Kyriakos (2021): Sustainable biomass availability in the EU, to 2050. Ref: RED II Annex IX A/B. Hg. v. Concawe. Imperial Consultants, Imperial Collage London. London. Online verfügbar unter <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Sustainable-Biomass-Availability-in-the-EU-Part-I-and-II-final-version.pdf>.

Pfeiffer, Diana; Thrän, Daniela (2018): One Century of Bioenergy in Germany: Wildcard and Advanced Technology. In: *Chemie Ingenieur Technik* 90 (11), S. 1676–1698. DOI: 10.1002/cite.201800154.

Prognos (2021): Technische CO₂-Senken – Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO₂-Negativemissionstechnologien. Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Hg. v. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf.

Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende, Agora Verkehrswende. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_01_DE_KNDE2045/KNDE2045_Langfassung.pdf.

Roskosch, Andrea; Heidecke, Patric (2018): Klärschlamm Entsorgung. in der Bundesrepublik Deutschland. Hg. v. Umweltbundesamt. Fachgebiete III 2.4 – Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer; Fachgebiete III 2.5 – Überwachungsverfahren, Abwasserentsorgung. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschamm_bf_low.pdf.

Ruiz, Pablo; Sgobbi, Alessandra; Nijs, Wouter Nijs; Thiel, Christian; Dalla Longa, Francesco; Kober, Tom et al. (2015): The JRC-EU-TIMES model. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries. Luxembourg: Publications Office (EUR, Scientific and technical research series, 27575).

Searle, Stephanie Y.; Malins, Christopher J. (2016): Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. In: *Biomass and Bioenergy* 89, S. 2–10. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.01.008.

Thrän, Daniela; Pfeiffer, Diana (2021): Methodenhandbuch. Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagasemissionen. Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ). Leipzig.

Vera, Ivan; Hoefnagels, Ric; Junginger, Martin; van der Hilst, Floor (2021): Supply potential of lignocellulosic energy crops grown on marginal land and greenhouse gas footprint of advanced biofuels—A spatially explicit assessment under the sustainability criteria of the Renewable Energy Directive Recast. In: *GCB Bioenergy* 13 (9), S. 1425–1447. DOI: 10.1111/gcbb.12867.