

Vom Rohstoff zur fossilfreien Mobilität: Europas Potenzial für einen erneuerbaren Kraftstoffmarkt



Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)
Institut für Katalyseforschung und -entwicklung (IKFT)



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH



FREYBERGER engineering GmbH



Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (BMW AG)

Karlsruhe, Februar 2026

Diese Studie ist eine Zusammenarbeit von:

Institut für Kolbenmaschinen (IFKM)	Prof. Dr. Thomas Koch Dr. Olaf Toedter Alexander Heinz
Institut für Katalyseforschung und -entwicklung (IKFT)	Prof. Dr. Nicolaus Dahmen Manuel Glaser
DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH	Karl-Friedrich Cyffka Tom Karras Dr. Kati Görsch
FREYBERGER engineering GmbH	Dr. Christoph Lentjes Dr. Jan-Hubert Wittmann Dr. Benjamin Rausch
BMW AG	Dr. Lars Menger

unter der Beauftragung von:

Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (BMW AG)

Version 01

Disclaimer

Es wurden erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Richtigkeit und Zuverlässigkeit der in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen zu gewährleisten. Dennoch kann keines der beteiligten Unternehmen Haftung für Verluste, Schäden oder Verletzungen übernehmen, die sich aus der Verwendung dieser Informationen ergeben.

Für diese Studie wurden die in Kapitel 3 und im Anhang 7.1 dargestellten Biomassepotenzialdatensätze auf Basis unterschiedlicher Studien für Deutschland, die EU und global vom DBFZ bereitgestellt. Entscheidungen zur fokussierten Auswahl von Studien und annahmebasierten Szenarien für die Allokation in bestimmte Nutzungspfade wurden vom Auftraggeber vorgegeben. Auf die nicht vollumfängliche Berücksichtigung derzeit bzw. zukünftig geltender regulatorischer Rahmenbedingungen sowie möglicher Nutzungskonkurrenzen in den Biomassepotenzialdaten wurde hingewiesen. Im Bericht sind die vom DBFZ getätigten Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse im Abschnitt 3.2.5 aufgeführt. Weitergehende Rückschlüsse aus den Ergebnissen und Aussagen zur möglichen Nutzung sowie Erreichung von Klimaneutralität im Verkehr wurden ohne Beteiligung des DBFZ erstellt.

Executive Summary

Die Transformation des gesamten Verkehrssektors hin zu erdölfreien Energieträgern stellt eine Herausforderung dar, die nicht allein durch die Elektrifizierung von Antrieben bewältigt werden kann. Daher ist es unabdingbar die CO₂-Einsparungspotenziale aller Energieträger zu heben. Der Fokus liegt hierbei - neben z.B. Wasserstoff - vor allem auf flüssigen Kraftstoffen, die ohne technische Anpassungen in die Versorgungsinfrastruktur integriert werden können. Bei erneuerbaren Kraftstoffen - sogenannten Carbon Neutral Fuels, kurz CNF - handelt es sich um einen Sammelbegriff, der alle Kraftstoffe einschließt, die gegenüber fossilem Kraftstoff einen geringeren CO₂-Wert aufweisen. In dieser Studie wird das Substitutionspotenzial von fortschrittlichen, erneuerbaren Kraftstoffen aus biologischen Feedstocks gegenüber fossilen Energieträgern in allen Sektoren der EU beleuchtet.

Diese Studie analysiert dabei auf Basis aktueller wissenschaftlicher Literatur und verschiedener Szenarien die Verfügbarkeit fortschrittlicher Rohstoffe, die Umwandlung zu erneuerbaren Kraftstoffen sowie die Entwicklung des Kraftstoffbedarfs im Straßenverkehr der Europäischen Union für die Zieljahre 2030, 2035 und 2040. Es wird hierbei ein marktwirtschaftlicher Ansatz gewählt. Die Sektoren Schifffahrt, Flugverkehr und andere schwer zu elektrifizierende Fahrzeuge und Maschinen stellen hierbei eine langfristige Nachfrage nach CNF sicher. Die Einführung einer neuen Fahrzeugklasse vCNF (Carbon Neutral Fuels Vehicle) ist jedoch entscheidend für den Markthochlauf und die langfristige Verfügbarkeit dieser Kraftstoffe.

Ziel ist es perspektivisch durch CNF eine Mobilität ohne die Emission von fossilem CO₂ als komplementären Pfad zur Elektrifizierung im Straßenverkehr zu etablieren und deren Realisierbarkeit quantitativ und qualitativ zu bewerten. Und dies nicht nur, um den Bedarf einer vCNF-Flotte zu bedienen, sondern die Chance zu bewerten den gesamten Kraftstoffmarkt, einschließlich der Volumina für die Bestandsflotte, mit erneuerbaren Kraftstoffen abzulösen.

Zentrale Ergebnisse zur Rohstoffverfügbarkeit

Die Auswertung mehrerer Studien zeigt, dass selbst unter Ausschluss jeglicher Importe in der EU ausreichend fortschrittliche Rohstoffe zur Verfügung stehen, um CNF in relevanten Mengen herzustellen. Bedarfe anderer Sektoren wie Industrie, Energie, Luft- und Schifffahrt wurden dabei bereits berücksichtigt. In dieser Studie werden primär fortschrittliche Rohstoffe herangezogen, die im Anhang IX A und B der aktuellen Renewable Energy Directive (RED) zu finden sind und bezüglich der Potenzialhebung ein Mid- und High-Szenario betrachtet, die sich in der Mobilisierungsrate der Feedstocks unterscheiden. Um das Potenzial fortschrittlicher Biokraftstoffe umfänglich bewerten zu können, werden

weitere Feedstocks, wie Agroforst, Zwischen- und Deckfrüchte sowie NawaRo (Nachwachsende Rohstoffe, Non-Food Crops) von marginalen Flächen ergänzt. Hierbei werden die Beschränkungen im Annex IX B teilweise aufgehoben und zusätzliche potenzielle Feedstocks berücksichtigt.

Dabei ist die Vielfalt wesentlich größer als es weitläufig in der öffentlichen Diskussion dargestellt wird, wo teilweise ein singulärer Fokus auf HVO und die dafür verfügbaren Rohstoffe wie z.B. Alt- und Speisefette/-öle (UCO - Used Cooking Oil) gelegt wird, welche hier nur 1% des verfügbaren Rohstoffportfolios ausmachen. Abbildung 1 zeigt diese Aufschlüsselung nach unterschiedlichen fortschrittlichen Rohstoffen für das Jahr 2030 im Mid-Szenario für das Bioenergiepotenzial, also das Potenzial, welches bereits ausschließlich die energetisch verwertbaren Mengen betrachtet, von denen die stoffliche Nutzung, wie z.B. Stallnutzung von Stroh, abgezogen wurden. Aus diesen Mengen werden in der vorliegenden Studie sowohl erneuerbare Diesel- als auch Ottokraftstoffe rechnerisch hergestellt.

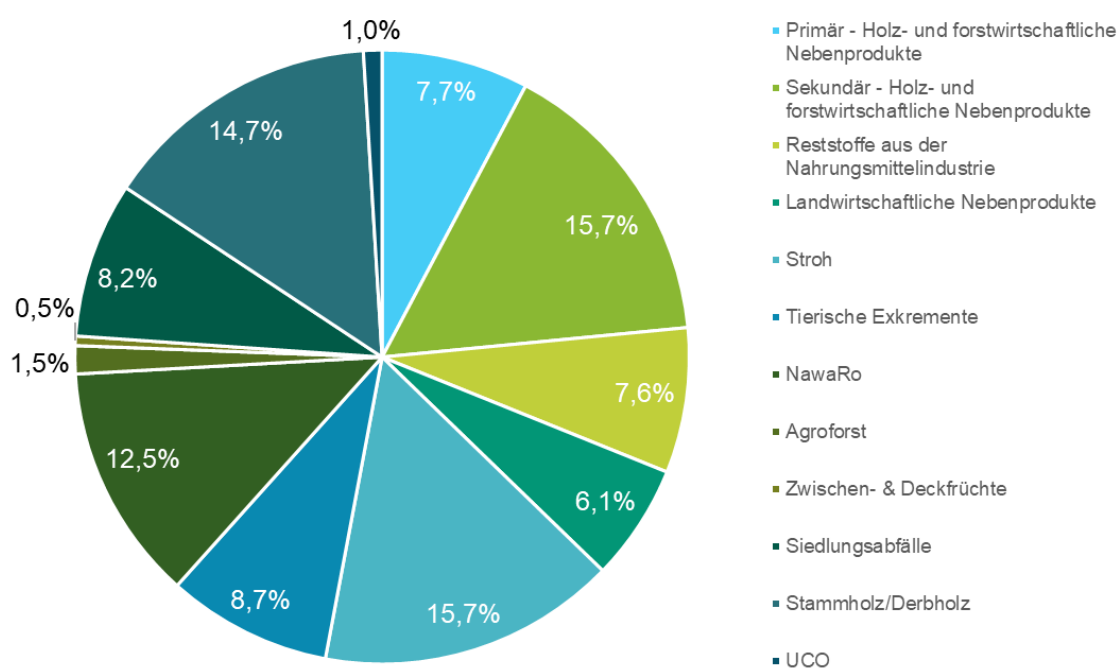


Abbildung 1: Anteile der Feedstock-Kategorien am Bioenergiepotenzial im Mid-Szenario für 2030.

In den Jahren 2030 und 2035 ist die Rohstoffbasis in der EU bereits ausreichend, um nach Abzug der Bedarfe der zuvor genannten Sektoren sowie den Bedarfen der stofflichen Nutzung über 50% des gesamten Bedarfes an Kraftstoff für den Straßenverkehr mit erneuerbaren Alternativen abzudecken. So können im Jahr 2030 38 - 55% und im Jahr 2035 44 - 67% des gesamten EU-Kraftstoffbedarfs des Straßenverkehrs gedeckt werden, wie Tabelle 1 und Abbildung 2 zeigen. Sollte eine hundertprozentige Substituierung des

gesamten Marktes inkl. Schiff- und Flugverkehr politisch angestrebt sein, könnten die fehlenden Bedarfe für die Jahre 2030 - 2035 ohne Weiteres durch Rohstoffimporte ergänzt werden, um die Markthochlaufphase von CNF und damit die Transformation zu erdölfreien Energieträgern auch über ein Maß der Absicherung hinaus voranzutreiben. Das globale Rohstoffpotenzial ist bis zu Faktor 43 größer als der maximale Importbedarf der EU, sodass aus der Perspektive globaler Potenziale eine Versorgung der EU gewährleistet ist.

Tabelle 1: Potenzieller Anteil an fortschrittlichen Biokraftstoffen am Gesamtkraftstoffmarkt des Straßenverkehrs in der EU.

	2030	2035	2040
Rohstoffe Bioenergie Potenzial [Mtoe]	280 - 361	279 - 371	285 - 380
Verfügbare CNF* [Mtoe]	89 - 135	71 - 127	64 - 137
Kraftstoffbedarf Gesamtflotte Straße [Mtoe]	238 - 247	162 - 188	95 - 128
Anteil CNF an Bedarf Gesamtflotte	38 - 55%	44 - 67%	67 - 107%

* inkl. 1st Gen gem. RED und RFNBO gem. dt. Gesetzesentwurfs zur Umsetzung der RED III [8]

Ab 2040 kann im High-Szenario mit 107% sogar mehr als der gesamte, prognostizierte Kraftstoffbedarf des EU-Straßenverkehrs durch CNF aus europäisch verfügbaren Rohstoffen gedeckt werden (Abbildung 2).

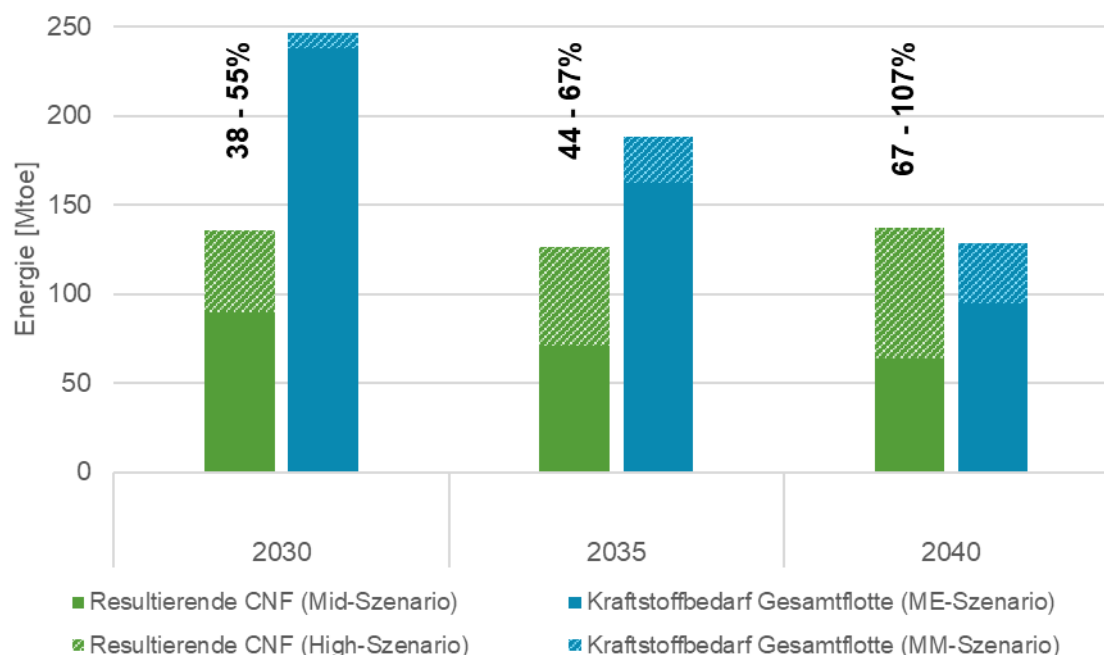


Abbildung 2: Abdeckung des gesamten Kraftstoffbedarfs des Straßenverkehrs durch erneuerbare Kraftstoffe.

Dies setzt voraus, dass Nachhaltigkeitspotenziale konsequent erschlossen, Nutzungskonkurrenzen koordiniert und technologische Skaleneffekte realisiert werden. Die Ergebnisse unterstreichen, dass CNF langfristig keine strukturelle Importabhängigkeit erfordern, sondern ein hohes Maß an energie- und klimapolitischer Resilienz ermöglichen.

Fazit

Die Studie kommt zu dem klaren Ergebnis, dass erneuerbare Kraftstoffe (CNF) eine tragfähige und skalierbare Säule für einen Straßenverkehr ohne fossiles CO₂ in der EU darstellen. Kurzfristig sind moderate Rohstoff- oder Produktimporte für eine 100%-Substitution aller fossiler Kraftstoffe in der EU noch notwendig. Mittelfristig – spätestens ab 2040 – ist jedoch eine vollständige Deckung des Kraftstoffbedarfs aus in Europa verfügbaren erneuerbaren Rohstoffen möglich. Voraussetzung hierfür sind verlässliche politische Rahmenbedingungen, Investitionssicherheit und ein koordinierter Hochlauf der CNF-Wertschöpfungsketten.

Inhalt

1	Einleitung.....	9
2	Methodik	11
2.1	Feedstockpotenzial EU.....	11
2.2	Konversion zu flüssigen Kraftstoffen.....	12
2.3	Bedarf flüssiger Kraftstoffe EU	12
2.4	Vergleichende Analyse.....	13
3	Feedstockpotenzial.....	14
3.1	Methodik & Vorgehen	14
3.1.1	<i>Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen der EU</i>	<i>14</i>
3.1.2	<i>Globale Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen</i>	<i>15</i>
3.1.3	<i>Potenzial-Szenarien für Non-Food Crops von marginalen Flächen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchten sowie Agroforst in der EU</i>	<i>16</i>
3.2	Ergebnisse	19
3.2.1	<i>Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen in der EU</i>	<i>19</i>
3.2.2	<i>Globale Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen</i>	<i>20</i>
3.2.3	<i>Potenziale von Non-Food Crops von marginalen Flächen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchten sowie Agroforst in der EU</i>	<i>21</i>
3.2.4	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse.....</i>	<i>22</i>
3.2.5	<i>Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse</i>	<i>24</i>
4	Konversion zu Biokraftstoffen	26
4.1	Technischer Hintergrund	26
4.2	Bestimmung der Konversionsfaktoren	26
4.2.1	<i>Datengrundlage</i>	<i>26</i>
4.2.2	<i>Konversionsfaktoren.....</i>	<i>27</i>
4.3	Berechnung der Kraftstoffpotenziale.....	28
4.3.1	<i>HVO-Feedstocks</i>	<i>28</i>
4.3.2	<i>MtG- und MtX-Feedstocks.....</i>	<i>29</i>
4.3.3	<i>Abzüge für andere Sektoren.....</i>	<i>29</i>
4.3.4	<i>Aufschläge für RFNBOs und konventionelle Biokraftstoffe</i>	<i>30</i>
4.4	Ergebnisse	30
4.4.1	<i>Effektive Biomassepotenziale.....</i>	<i>30</i>
4.4.2	<i>Kraftstoffpotenziale</i>	<i>31</i>
4.5	Schlussfolgerungen	34
5	Bedarfe der zukünftigen Fahrzeugflotte	35
5.1	Berechnung der Zwischenjahre	35

5.2	Aufschlüsselung in Benzin- und Diesel-Fahrzeuge und Verbrauchsabschätzung	36
5.3	Gesamtbedarf	37
6	Gesamtergebnis	39
7	Anhang	44
7.1	Feedstockpotenzial	44
7.1.1	<i>Allgemeine regulatorische Einordnung von biogenen Ressourcen zur Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen</i>	44
7.1.2	<i>Perspektivische Nutzungskonkurrenzen</i>	45
7.1.3	<i>Weitere globale Potenzialstudien</i>	46
7.2	Konversion zu Biokraftstoffen	48
7.2.1	<i>Abzüge Bioenergiepotenzial für andere Sektoren</i>	48
7.2.2	<i>Aufschläge bei den potenziellen Kraftstoffmengen</i>	54
	Literaturverzeichnis	56
	Abbildungsverzeichnis	60

1 Einleitung

Die Reduktion der Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor ist eine zentrale Voraussetzung für das Erreichen der europäischen Klimaschutzziele. Neben Effizienzsteigerungen der Antriebstechnologien und einer veränderten Verkehrsnachfrage kommt dabei der Transformation der eingesetzten Energieträger eine entscheidende Rolle zu. Während die fortschreitende Elektrifizierung als zentraler Hebel zur Senkung des Endenergiebedarfs und zur langfristigen Senkung der Treibhausgasemissionen gilt, wird zunehmend deutlich, dass sie allein nicht ausreicht um alle Verkehrssegmente zeitnah und vollständig zu defossilisieren. Vor diesem Hintergrund gewinnen fortschrittliche erneuerbare Kraftstoffe aus biogenen Feedstocks an Bedeutung. Im Fokus stehen Rohstoffe, die sich nach RED in die Anhänge IX A (Advanced Bio) und IX B (Waste & Residue) klassifizieren lassen. [17, 18] Um das erweiterte Potenzial fortschrittlicher Biokraftstoffe bewerten zu können, müssen weitere Feedstocks, wie z.B. Agroforst, berücksichtigt und die Deckelung für Annex IX B Feedstocks aufgehoben werden.

In der öffentlichen Debatte wird häufig gefordert, nachhaltige Kraftstoffe ausschließlich für Sektoren zu nutzen, in denen batterieelektrische Lösungen an technische, wirtschaftliche oder infrastrukturelle Grenzen stoßen, wie Luft- und Schifffahrt. Jedoch ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für den Markthochlauf die Skalierung erneuerbarer Kraftstoffe in der Produktion aber auch in der Mobilisierung von potenziellen Feedstocks sowie einer hohen und verlässlichen Nachfrage. Hierzu müssen alle Sektoren aber insbesondere der Straßenverkehr eingebunden werden. Gemeinsame, verkehrsträgerübergreifende Nachfrage ermöglicht die Bildung von Märkten, in denen Skaleneffekte realisiert und Produktionskosten gesenkt werden können. Dies ist auch aus technologischer Sicht sinnvoll: Anlagen zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen produzieren in der Regel ein Spektrum unterschiedlicher Kraftstofffraktionen, die in verschiedenen Antriebstechnologien eingesetzt werden können. Dedizierte Anlagen, die z.B. ausschließlich Sustainable Aviation Fuels (SAF) herstellen, existieren nicht. Skaleneffekte führen zu einer Kostendegression für alle Sektoren und nicht zu einem Verteilungswettkampf.

Über den Klimaschutz hinaus leisten lokal hergestellte erneuerbare Kraftstoffe einen Beitrag zur energiepolitischen Unabhängigkeit. Die Erschließung von Biomassepotenzialen in Europa kann Importabhängigkeiten reduzieren und regionale Wertschöpfungsketten stärken. Der Aufbau dezentraler Produktionskapazitäten erhöht die Versorgungssicherheit und die Anpassungsfähigkeit des Energie- und Ressourcensystems gegenüber klimatischen und geopolitischen Risiken. Neben Kraftstoffen werden durch die erhöhte

Mobilisierung von erneuerbaren Feedstocks unverzichtbare Rohstoffe und Energieträger bereitgestellt, die flexibel in den Sektoren Wärme und Industrie eingesetzt werden können.

Ziel dieser Studie ist es, ein klares Bild davon zu vermitteln, wie fortschrittliche Rohstoffe aus der EU zur Produktion unterschiedlicher Kraftstofftypen genutzt werden können und welchen Beitrag sie zur Bedarfsabdeckung der Bestandsflotte und einer neuen Fahrzeugkategorie CO₂-reduzierter Verbrennungsmotoren (vCNF) leisten können. Voraussetzung für die Erschließung der beschriebenen Potenziale ist ein verlässlicher politischer und regulatorischer Rahmen, der langfristige Investitions- und Planungssicherheit bietet und den Markthochlauf erneuerbarer Kraftstofftechnologien gezielt unterstützt.

2 Methodik

Die vorliegende Studie schafft einen umfanglichen Vergleich zwischen dem Kraftstoffbedarf des europäischen Straßenverkehrs (EU27 + Norwegen, Schweiz und UK) und den potenziellen Produktionsmengen fortschrittlicher Kraftstoffe aus europäisch gehobenen Feedstocks (EU27 + UK). Die Methodik wird in Abbildung 3 dargestellt.

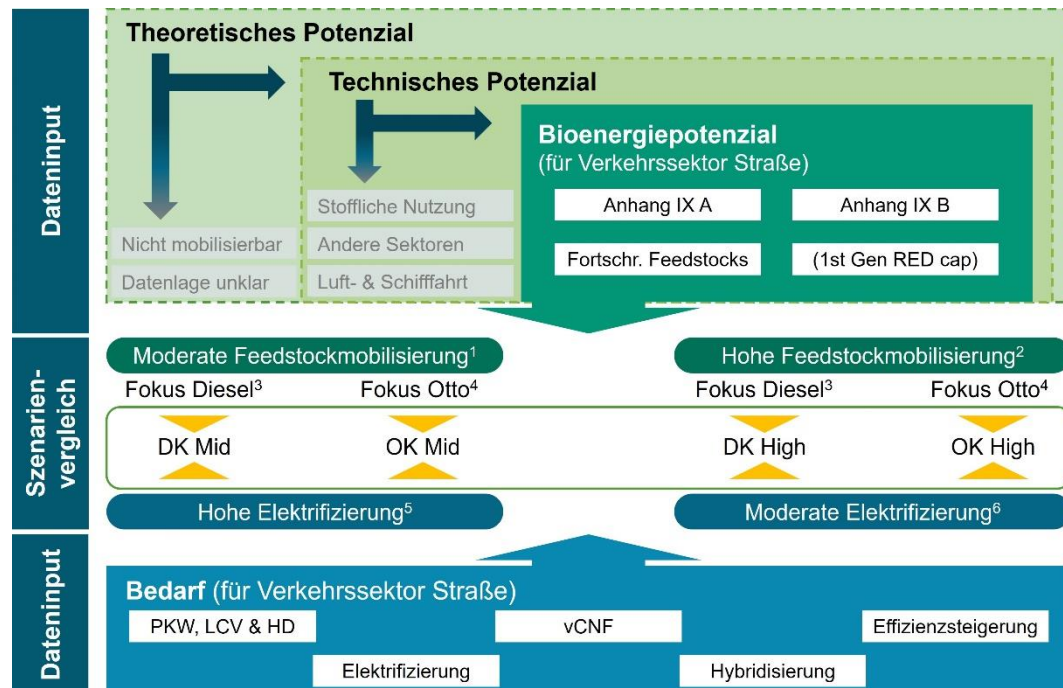


Abbildung 3: Übersicht der Methodik für die abschließende vergleichende Analyse zwischen verfügbaren Mengen an fortschrittlichen, flüssigen Kraftstoffen und dem Bedarf im Straßenverkehr. DK = Dieselmotorkraftstoff, OK = Ottomotorkraftstoff. 1 = Feedstockpotenzial Mid-Szenario, 2 = Feedstockpotenzial High-Szenario, 3 = Max-Mitteldestillat, 4 = Mehr-Naphtha, 5 = Max-Electron, 6 = More-Molecule.

2.1 Feedstockpotenzial EU

Es werden mehrere Studien genutzt, um das Bioenergiepotenzial aus europäischen Feedstocks zur Herstellung fortschrittlicher Kraftstoffe inkl. der Potenziale von marginalen Flächen, Zwischen- und Deckfrüchten sowie Agroforst zusammenzutragen. Es wird dabei vom regulatorischen Rahmen der RED abgewichen und die Begrenzungen für Annex IX A und B Feedstocks erweitert sowie die zuvor genannten Feedstocks ergänzt, um das erweiterte europäische Feedstockpotenzial aufzeigen zu können. Hieraus ergeben sich ein Mid- und ein High-Szenario, welche sich im Wesentlichen in der Mobilisierungsrate der Feedstocks unterscheiden.

2.2 Konversion zu flüssigen Kraftstoffen

Von den zuvor genannten beiden Bioenergiepotenzialen werden die Bedarfe anderer Sektoren (Industrie, Energie, Haushalte, Landwirtschaft, Luft- und Schifffahrt) subtrahiert (Kapitel 4.3.3) und anschließend verschiedenen Umwandlungspfaden zugeordnet. Die gewählten Umwandlungspfade sind hinsichtlich der Eigenschaften der verfügbaren Feedstocks optimiert, z.B. folgt UCO dem HVO-Pfad. Die den Umwandlungspfaden zugrundeliegenden Effizienzen entsprechen aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen. Hierbei werden zwei Szenarien aufgebaut:

- *Max-Mitteldestillat-Szenario (Max-MD)*: Umwandlungspfade sind so gewählt, dass rechnerisch ein möglichst hoher energetischer Anteil Mitteldestillat (Diesel) anfällt.
- *Mehr-Naphtha-Szenario*: Basiert auf Max-Mitteldestillat-Szenario, steuert jedoch die Umwandlung so, dass der Gesamtbedarf flüssiger Kraftstoffe im Bereich Diesel und Otto bestmöglich ausgeglichen bedient werden kann.

2.3 Bedarf flüssiger Kraftstoffe EU

Auf der Seite des europäischen Kraftstoffbedarfs stellen die Szenarien More-Molecule (MM) und Max-Electron (ME) der Studie von S&P Global [47] die Basis, jedoch werden hier nur die Bedarfe an flüssigen Kraftstoffen betrachtet. Diese Szenarien beschreiben den Bedarf der gesamten Flotte des Straßenverkehrs, wobei das MM-Szenario von einem moderaten, das ME-Szenario von einem sehr ambitionierten Anstieg der Elektrifizierung ausgeht. Ebenfalls wird im Rahmen der vorliegenden Studie zusätzlich eine vCNF-Flotte für Diesel- und Otto-Verbrenner simuliert, die ab dem 2. Halbjahr 2027 (Diesel) bzw. dem 2. Halbjahr 2030 (Otto) rechnerisch eingeführt wird.

2.4 Vergleichende Analyse

Die so ermittelten Bedarfe und Kraftstoffmengen aus den Feedstockpotenzialen werden gegenübergestellt. Dabei werden die Konversions-Szenarien aus dem Mid-Szenario des Feedstockpotenzials mit dem höher elektrifizierten ME-Szenario gepaart (DK Mid bzw. OK Mid). Dem höheren Bedarf flüssiger Kraftstoffe im MM-Szenario wird durch die höhere Mobilisierungsrate des High-Szenarios und den daraus resultierenden Kraftstoffmengen der Konversions-Szenarien Rechnung getragen (DK High bzw. OK High). In Abbildung 4 ist die Methodik bezüglich des Aufbaus der genutzten Szenarien schematisch dargestellt.

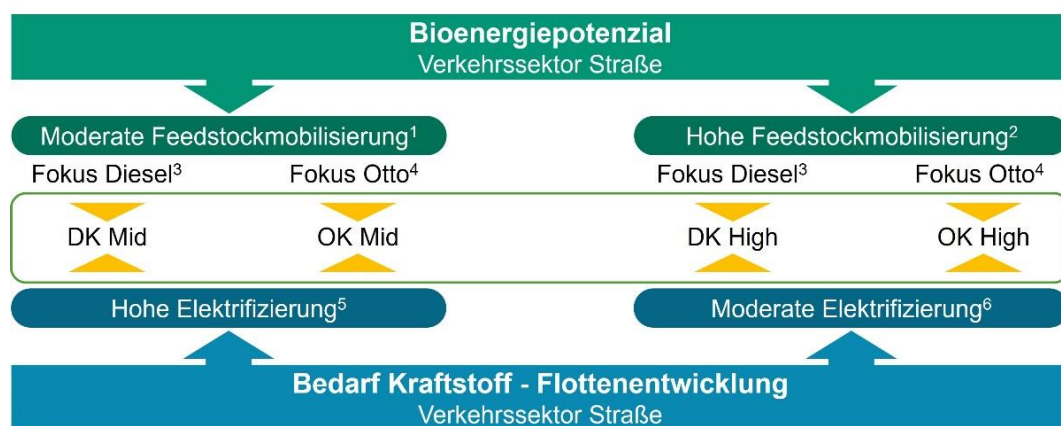


Abbildung 4: Schematische Darstellung der genutzten Szenarien und wie sie in der vergleichenden Analyse gepaart werden. DK = Dieselmkraftstoff, OK = Ottokraftstoff. 1 = Feedstockpotenzial Mid-Szenario, 2 = Feedstockpotenzial High-Szenario, 3 = Max-Mitteldestillat, 4 = Mehr-Naphtha, 5 = Max-Electron, 6 = More-Molecule.

3 Feedstockpotenzial

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick zu Biomassepotenzialen für Europa und einen Blick auf die globale Situation. Eine regulatorische Einordnung der biogenen Ressourcen zur Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen erfolgt im Anhang 7.1.1. Im Fokus stehen dabei biogene Rest- und Abfallstoffe. Ergänzt wird die Analyse durch eine qualitative Einschätzung sowie annahmebasierte Potenzial-Szenarien für Non-Food Crops von marginalen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchte sowie Agroforst mit Fokus auf die EU. Nicht Teil der Potenzialanalyse sind dagegen Nahrungs- und Futtermittelpflanzen.

3.1 Methodik & Vorgehen

3.1.1 Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen der EU

Die in die Analyse einbezogenen Potenzialstudien für die EU sind auf Grundlage bestimmter Auswahlkriterien festgelegt, wobei insbesondere die Betrachtung der Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe, die methodische Transparenz sowie die Aktualität der Studien ausschlaggebend sind. Die folgenden Potenzialstudien werden berücksichtigt: ENSPRESO [46], Concawe [43] sowie Searle [48]. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit werden bevorzugt Szenarien mit ähnlicher Ausprägung herangezogen, wobei der Schwerpunkt auf mittleren und hohen Szenarien liegt. Darüber hinaus werden die in den Studien verwendeten Biomassen in übergeordnete Biomassekategorien und Potenzialebenen zusammengeführt, um eine einheitliche Darstellung zu ermöglichen. Abbildung 5 gibt einen Überblick zu den in den einzelnen Studien enthaltenen Biomassepotenzialebenen.

- Das technische Potenzial ist definiert als der Anteil des theoretischen Potenzials, der unter technischen Restriktionen (z. B. Bergungsrate) und gewisser Nachhaltigkeitsanforderungen (z. B. Humusbilanz) genutzt werden kann [7]. Dieses könnte auch als Aufkommen beschrieben werden.
- Das mobilisierbare technische Biomassepotenzial ist der bilanziell ungenutzte Anteil des technischen Potenzials. Es entspricht dem technischen Potenzial abzüglich der energetischen Nutzung, der stofflichen Nutzung sowie ggf. sonstiger Nutzungen [40].

- Das Bioenergiepotenzial umfasst das technische Biomassepotenzial, das nicht stofflich genutzt wird und somit theoretisch der energetischen Nutzung zur Verfügung steht. Bestehende energetische Nutzungen sowie das mobilisierbare Potenzial sind Bestandteil des Bioenergiepotenzials [40].

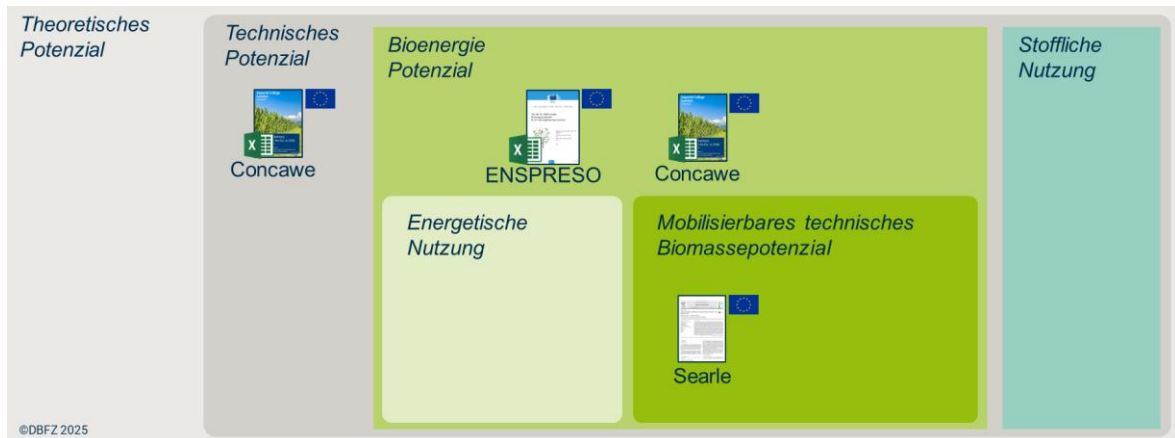


Abbildung 5: Hierarchie und Überschneidung unterschiedlicher Biomassepotenzialebenen sowie Zuordnung der untersuchten Studien für die EU; Abbildung basierend auf Naumann et al. [40, 41].

Die in den Studien angegebenen Größenordnungen und Einheiten, wie etwa Tonnen Trockenmasse oder Petajoule, sind unter Anwendung geeigneter Heizwerte und Umrechnungsfaktoren (Trocken- bzw. Frischmasse) in der Einheit Millionen Tonnen Öläquivalent (Mtoe) dargelegt. Für Zeitpunkte, die in den zugrunde liegenden Studien nicht explizit ausgewiesen werden (z.B. 2027, 2035 und 2040), erfolgt eine Abschätzung auf Basis einer linearen Interpolation der jeweiligen Biomasse-Unterkategorien. Zudem sind ölhaltige Rest- und Abfallstoffe gesondert ausgewiesen, sofern sie zuvor in übergeordneten Biomassekategorien explizit enthalten sind, um ihre spezifische Relevanz für bestimmte Konversionsrouten adäquat abzubilden.

3.1.2 Globale Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen

Die Auswahl relevanter Potenzialstudien für den globalen Kontext erfolgt auf Grundlage festgelegter Kriterien mit dem Ziel, eine möglichst umfassende Abdeckung der Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe zu gewährleisten. Um eine breite Datenbasis zu erzielen, liegt der Schwerpunkt auf globalen Meta-Studien für Biomassepotenziale. Hierzu wird insbesondere die Meta-Studie von IRENA [31], die globale Biomassepotenzialstudien aus dem Zeitraum 2003 bis 2014 auswertet, berücksichtigt. Weitere Studien zum globalen Kontext sind in Anhang 7.1.3 zu finden. Die Biomassepotenziale der unterschiedlichen Studien, welche in IRENA [31] enthalten sind, beziehen sich nicht auf eine einheitliche Potenzialebene. So bezieht sich diese Meta-Studie von IRENA auf insgesamt 35 Studien

mit unterschiedlichen Potenzialebenen (theoretisch, technisch, ökonomisch, nachhaltig, sonstige). Um das maximale, globale Biomassepotenzial abschätzen und einen möglichen europäischen Importbedarf in einem globalen Kontext darstellen zu können, beschränkt sich die weitere Analyse auf das Max-Szenario. Sämtliche in den globalen Potenzialstudien verwendeten Einheiten sind unter Anwendung geeigneter Umrechnungsfaktoren in die Einheit Mtoe dargelegt. Für die Studie [31] werden die Potenziale für gewisse Zeitabschnitte (z. B. 2025 - 2035) einheitlich den anvisierten Zieljahren (2025, 2027, 2030 und 2035) zugeordnet. Eine separate Ausweisung ölhaltiger Rest- und Abfallstoffe für spezifische Konversionsrouten ist für die Studien der globalen Biomassepotenziale nicht möglich, da diese aufgrund des hohen Aggregationsgrades der Biomassen in den zugrunde liegenden Studien nicht einzeln ausgewiesen werden.

3.1.3 Potenzial-Szenarien für Non-Food Crops von marginalen Flächen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchten sowie Agroforst in der EU

Die Daten für Zwischen¹- und Deckfrüchte² basieren auf einem Bericht für die Europäische Kommission zum Hochlauf der Produktionsinfrastruktur von fortschrittlichen Biokraftstoffen [52]. Darin werden Szenarien, wobei im Folgenden das mittlere und hohe Szenario genutzt wird, für den Anbau von Zwischen- und Deckfrüchten in der EU dargelegt. Diese berücksichtigen verschiedene Flächen-, Ertrags- und Mobilisierungsannahmen. Zudem werden für einen möglichen Anbau von Zwischen- und Deckfrüchten in der zitierten Studie entsprechende Vegetationszonen basierend auf der Veröffentlichung von Metzger [39] in Betracht gezogen (siehe Abbildung 6).

1 Frucht, die nach der Anbauperiode der Hauptfrucht angebaut wird. D. h., Vegetationszeitraum muss für Hauptfrucht und kurze Zwischenfrucht reichen [52].

2 Frucht, die nach der Hauptfrucht über den Winter angebaut wird, um Bodenverlusten vorzubeugen. D. h., Vegetationszeitraum nur für die Hauptfrucht [52].

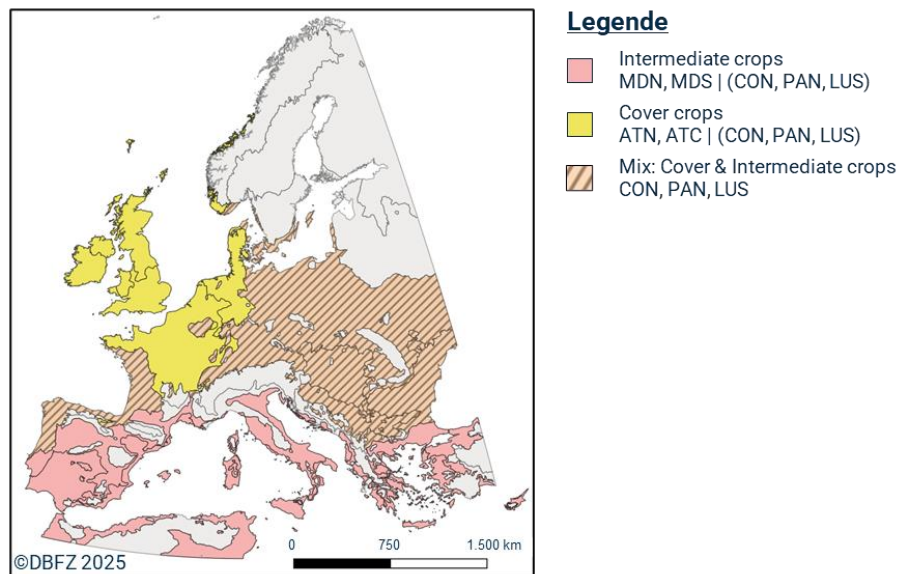


Abbildung 6: Annahmen für Vegetationszonen für Zwischen- und Deckfrüchte; Eigene Abbildung basierend auf [39, 52].

Die Erweiterung der Rohstoffliste für fortschrittliche und abfallbasierte Biokraftstoffe[23] beinhaltet Non-Food Crops von schwer degradierten Flächen. Diese sind gemäß RED II definiert als Flächen, die „während eines längeren Zeitraums entweder in hohem Maße versalzt wurden oder die einen besonders niedrigen Gehalt an organischen Stoffen aufweisen und stark erodiert sind“ [17]. Bislang fehlen jedoch genaue Grenzwerte für diese Anforderungen, welche perspektivisch mutmaßlich im Rahmen der Durchführungsverordnung (EU) 2022/996 umgesetzt werden [22]. Um dennoch Daten ausweisen zu können, basieren die genutzten Daten auf dem mittleren und hohen Szenario zu Non-Food Crops von schwer degradierten Flächen von Wageningen [52]. Die dort geschätzten Flächen basieren auf der Methodik von Conservation International [9]. Die anbaubaren Non-Food Crops und entsprechenden Erträge basieren im Rahmen der Studie von Wageningen [52] auf den EU-Projekten MAGIC und BIKE [45, 15, 52].

Wenngleich Non-Food Crops von marginalen Flächen bislang nicht in der Rohstoffliste der EU geführt werden [23], könnten sich diese jedoch auch als low ILUC-Feedstocks (Indirect Land-Use-Change, ILUC) qualifizieren [13]. Daher werden weitere Daten für Non-Food Crops von marginalen Flächen gemäß Vera et al. [51] als Szenario berücksichtigt. Im Rahmen der Studie von Vera et al. [51] werden für einen möglichen Anbau von Non-Food Crops entsprechende Landnutzungs- und Landbedeckungsdaten [24, 36], marginale Flächen basierend auf MAGIC [14] sowie Flächen-Ausschlusskriterien basierend auf Anforderungen der RED II Artikel 29 [17] berücksichtigt. Des Weiteren wird zwischen einem mittleren (75%) und einem hohen (100%) Mobilisierungsszenario aufbauend auf Hoefnagels et al. [30] und bezogen auf die Mobilisierung der ausgewiesenen Potenziale

gemäß Vera et al. [51] unterschieden. Da die Potenziale keine ölhaltigen Non-Food Crops beinhalten, wird zudem ein geringer Anteil von 2,4 - 2,5% in 2030 bis 2040 basierend auf dem Anteil bezogen auf das aus ölhaltigen Non-Food Crops gewonnene Pflanzenöl von degradierten Flächen gemäß Wageningen [52] angenommen. Es ist darauf hinzuweisen, dass nach den neuen Anforderungen der revidierten RED II zusätzlich auch Heideflächen ausgeschlossen sind [18] und zudem Anteile der durch Vera et al. [51] ausgewiesenen Flächen bereits in Nutzung sind [53], was in den Daten keine Berücksichtigung findet. Zudem werden die Daten der Szenarien für schwer degradierte und marginale Flächen nicht gleichzeitig für eine Nutzung bzw. Konversion in Kapitel 4 angenommen, da gewisse Überschneidungen der Flächen wahrscheinlich sind.

Abschließend wird ein Szenario für den Anbau von Agroforst in der EU gebildet. Hintergrund ist, dass gemäß Untersuchungen Agroforstsysteme insbesondere bei trockenen Böden einen positiven Einfluss (z.B. durch Verschattung und Windreduktion) auf Ackerfruchterträge leisten können. Bei Böden mit hoher Wasserversorgung ist der positive Einfluss auf Ackerfruchterträge gemäß Böhm et. al. [6] dagegen eher gering bzw. nicht vorhanden. Die mögliche Steigerung der Produktivität von Agroforstsystemen im Vergleich zu Reinkulturf Flächen wird mit dem Land-Äquivalent-Verhältnis (Land Equivalent Ratio, LER) beschrieben. Wird die Gesamtproduktivität in Bezug auf die Ackerfruchtproduktion gesteigert, sodass die Steigerungen der Ackerfruchterträge die Flächenverluste (durch Gehölzstreifen) zum Teil bis fast ausgleichen, könnte Agroforstholz bei Nachweis dieser positiven Ackerfruchtertragseffekte perspektivisch möglicherweise als Low-ILUC-Feedstock bewertet werden. Quantitativ wird Agroforst als annahmebasiertes Potenzial-Szenario bezogen auf politische Zielsetzungen für Deutschland (200.000 ha in 2027) berücksichtigt [37]. Dies entspricht einem Anteil von rund 1,7% der Ackerfläche in Deutschland. Für die gesamte EU gibt es keine genauen Zielsetzungen und die Bestrebungen der einzelnen Mitgliedsstaaten in Bezug auf Agroforst sind sehr unterschiedlich. Es wird daher die Annahme getroffen, die deutsche Zielsetzung von 1,7% auf die Ackerfläche der EU ab 2030 anzuwenden, was insgesamt einer Fläche von rund 1,7 Mio. ha entspricht. Die Annahmen für Erträge ($\sim 5 - 7 \text{ t}_{\text{TM}}/\text{ha}/\text{a}$) und die Annahme für entsprechende Heizwerte ($18,65 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{TM}}$) basieren auf Wageningen und Kaltschmitt et al. [52, 32]. Nicht ausgeschlossen werden kann dabei, dass es potenzielle Überschneidungen dieser Flächen und der zuvor genannten marginalen bzw. schwer degradierten Flächen gibt, wenngleich allgemein bei diesem Agroforst-Szenario eher trockene Ackerflächen im Vordergrund stehen. Daher sind diese Daten mit hohen Unsicherheiten behaftet und bezogen auf eine ambitionierte Umsetzung von Agroforstsystemen stark annahmebasiert.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen in der EU

Die Biomassepotenziale der EU (Mittelwerte und Min-/Max-Werte, siehe Abbildung 7) zeigen große Bandbreiten, was vor allem durch die jeweils betrachteten Potenzialebenen, die berücksichtigten Einzelbiomassen, die betrachteten Nutzungskonkurrenzen und Nachhaltigkeitskriterien, die Datengrundlage sowie den Zeithorizont und eventuell damit verbundene Annahmen der Szenarien begründet ist [40, 41]. Das Bioenergiepotenzial basierend auf Concawe umfasst im Mittelwert 314 - 321 Mtoe für den Zeitraum von 2030 bis 2040. Die Bioenergiepotenziale biogener Rest- und Abfallstoffe (ohne Stammholz/Derbholz, NawaRo³ und Importe) machen davon im Mittel 197 Mtoe für diesen Zeitraum aus. Die Datenbasis von ENSPRESO beschreibt ein Bioenergiepotenzial von 259 - 270 Mtoe für die Jahre 2020 bis 2040. Biogene Rest- und Abfallstoffe (ohne Stammholz/Derbholz und NawaRo) belaufen sich in dieser Studie auf 142 - 131 Mtoe (rückläufig). Die Daten für die Potenzialebene des mobilisierbaren technischen Biomassepotenzials (ausschließlich biogene Rest- und Abfallstoffe) von Searle liegen zwischen 71 - 70 Mtoe in den Jahren 2020 und 2030. Die hohen Szenarien für die Bioenergiepotenziale sind gegenüber den zuvor genannten Szenarien und Potenzialebenen weitaus größer. Das hohe Szenario für das Bioenergiepotenzial von Concawe beläuft sich auf 395 - 412 Mtoe (Rest- und Abfallstoffe: 236 - 244 Mtoe) für den Zeitraum von 2030 bis 2040. Das hohe Szenario von ENSPRESO umfasst 414 - 461 Mtoe für die Jahre 2020 bis 2040.

3 Nachwachsende Rohstoffe

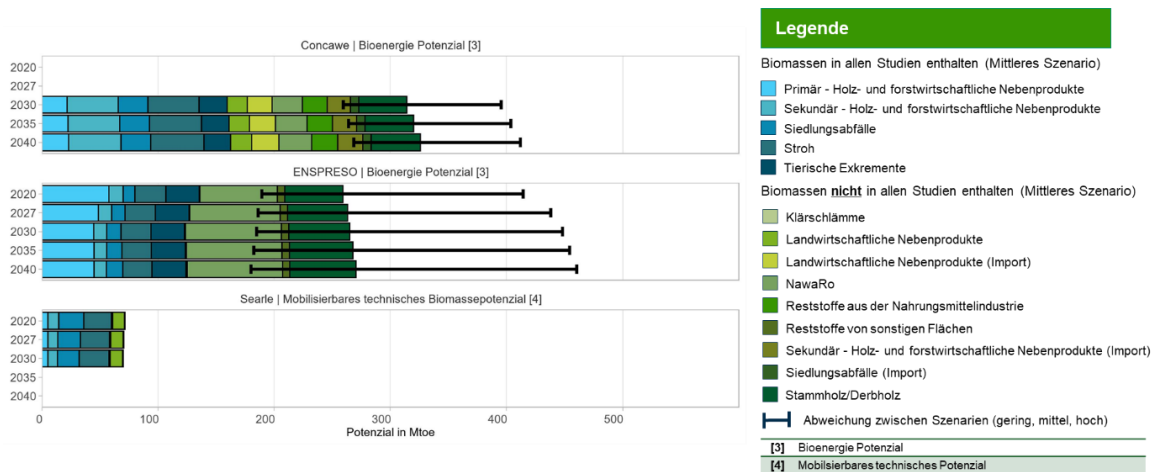


Abbildung 7: Biomassepotenziale (Mittelwerte und Szenario-Bandbreiten) unterschiedlicher Studien für die EU.

Wie bereits in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, verwenden nur Concawe und ENSPRESO die gleiche Potenzialebene, weshalb die Ergebnisse der Searle-Studie nicht weiter in Kapitel 4 betrachtet werden. Dort konzentrieren sich die weiteren Berechnungen auf die Daten von Concawe [43], da sich die Studie auf Rohstoffe im Kontext der RED II [17] und insbesondere auf biogene Rest- und Abfallstoffe fokussiert. Zudem weist die Studie einen höheren Detailgrad in Bezug auf ölhaltige Rest- und Abfallstoffe auf, welche sich besonders für eine Nutzung als HVO eignen. Des Weiteren fokussiert sich Kapitel 4 bzw. die Verwendung für eine Konversion in erneuerbare Kraftstoffe auf das mittlere und hohe Szenario, da eine marktwirtschaftliche Betrachtungsweise aufgezeigt werden soll. Diese soll darlegen welche möglichen Nutzungsmengen der Potenziale sich ergeben könnten, wenn es hypothetisch eine entsprechende Nachfrage am Markt gibt.

3.2.2 Globale Potenziale von biogenen Rest- und Abfallstoffen

Die Biomassepotenziale der Studien für den globalen Kontext weisen noch größere Unterschiede und damit verbundene Unsicherheiten im Vergleich zum europäischen Kontext auf. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine vergleichende Darstellung verzichtet und lediglich die Meta-Studie von IRENA [31] betrachtet und in Abbildung 8 visualisiert. Ergebnisse der weiteren globalen Biomassepotenzialstudien sind im Anhang 7.1.3 zu finden. Die Studie [31] zeigt im Max-Szenario Biomassepotenziale von bis zu rund 9.000 Mtoe (arithm. Mittelwert 3.342 Mtoe) für den Zeitraum 2025 bis 2035 und von bis zu fast 28.000 Mtoe (arithm. Mittelwert 5.780 Mtoe) für den Zeitraum 2040 bis 2050 auf. Die Potenziale setzen sich jedoch nicht nur aus Rest- und Abfallstoffen zusammen, sondern auch aus NawaRo (Energiepflanzen) sowie Algen. Der Anteil von NawaRo (Energiepflanzen) liegt im mittleren Szenario bei 35% für den Zeitraum 2025 bis 2035 und bei 44% für den Zeitraum 2040 bis 2050. Im hohen Szenario liegt deren Anteil dagegen bei

25% (2025 bis 2035) bis 59% (2040 bis 2050). Weiterhin ist zu erwähnen, dass über die gezeigten globalen Rohstoffmengen hinaus, ein signifikant hohes, aber unbekanntes Potenzial besteht, das auf Grund der schlechten Datenlage nicht berücksichtigt werden konnte.

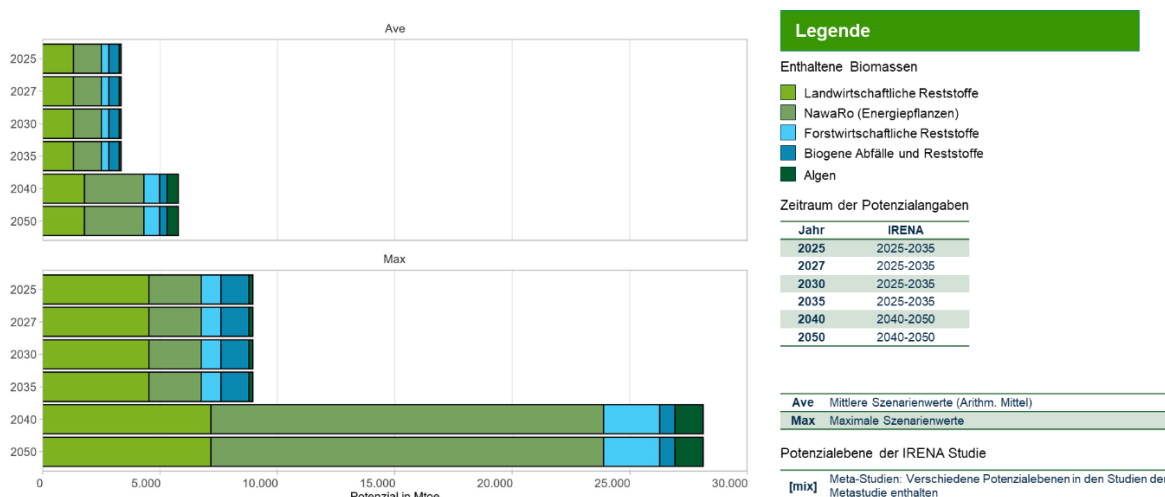


Abbildung 8: Globale Biomassepotenziale (Mittelwert und Max-Wert) [31].

3.2.3 Potenziale von Non-Food Crops von marginalen Flächen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchten sowie Agroforst in der EU

In Abbildung 9 werden die Potenziale gemäß den Szenarien von Wageningen [52] für Zwischen- bzw. Deckfrüchte sowie Non-Food Crops von degradierten Flächen in der EU ausgewiesen. Die Anbau-Szenarien treffen Annahmen zu Mobilisierungsraten, also dem Anteil der Fläche, welcher bezogen auf die maximal ausgewiesene Fläche genutzt bzw. mobilisiert wird. Bei Zwischen- und Deckfrüchten belaufen sich diese auf 0,5 - 5% in 2030 und 1 - 10% in 2050. Bei degradierten Flächen betragen diese 2 - 10% in 2030 und 5 - 20% in 2050. Im Mittelwert betragen die Potenziale der ausgewiesenen Anbau-Szenarien für Zwischen- bzw. Deckfrüchte 1,4 Mtoe in 2030, 1,8 Mtoe in 2035 und 2,2 Mtoe in 2040. Die Min- und Max-Bandbreiten stellen die Szenarien bzw. die entsprechenden Annahmen zur Anbaufläche sowie den entsprechenden Mobilisierungsraten dar. Im hohen Szenario belaufen sich die Zwischen- bzw. Deckfrüchte auf 3,7 Mtoe in 2030, 5,1 Mtoe in 2035 und 6,4 Mtoe in 2040. Die Potenziale der Anbau-Szenarien für Non-Food Crops von degradierten Flächen betragen im Mittelwert 0,9 Mtoe (Hoch: 1,6 Mtoe) in 2030, 2,5 Mtoe (Hoch: 5,6 Mtoe) in 2035 und 4,1 Mtoe (Hoch: 9,6 Mtoe) in 2040.

Die Potenziale von Non-Food Crops von marginalen Flächen basierend auf Vera et al. [51] sind dagegen weitaus größer. Das liegt primär an den in der Studie getroffenen Annahmen. Gemäß der Studie qualifizieren sich rund 21 Mha als marginale Flächen gemäß RED II. Im

mittleren Szenario, welches eine Mobilisierungsrate von 75% berücksichtigt, betragen die Potenziale 35 Mtoe in 2030, 37 Mtoe in 2035 und 38 Mtoe in 2040. Im hohen Szenario wird eine Mobilisierungsrate von 100% angenommen, daher belaufen sich die Potenziale auf 47 Mtoe in 2030, 49 Mtoe in 2035 und 51 Mtoe in 2040.

Die Anbau-Szenarien für Agroforst basieren auf einer konstanten Flächenannahme ab 2030 für die EU, wobei hier die Mobilisierungsrate für diese ausgewiesene Fläche bei 100% liegt. Der Anstieg der Potenziale aus Agroforst basiert daher im Wesentlichen auf den Bandbreiten der Ertragsannahmen, welche basierend auf Durchschnittswerten sowie Interpolation gemäß [52] unter Verwendung von Heizwerten gemäß [32] errechnet wurden. In Summe ergeben sich daraus Agroforst-Potenziale (Mittelwert und Hoch) von 4,1 - 4,7 Mtoe in 2030, 4,2 - 4,8 Mtoe in 2035 und 4,3 - 5,0 Mtoe in 2040.

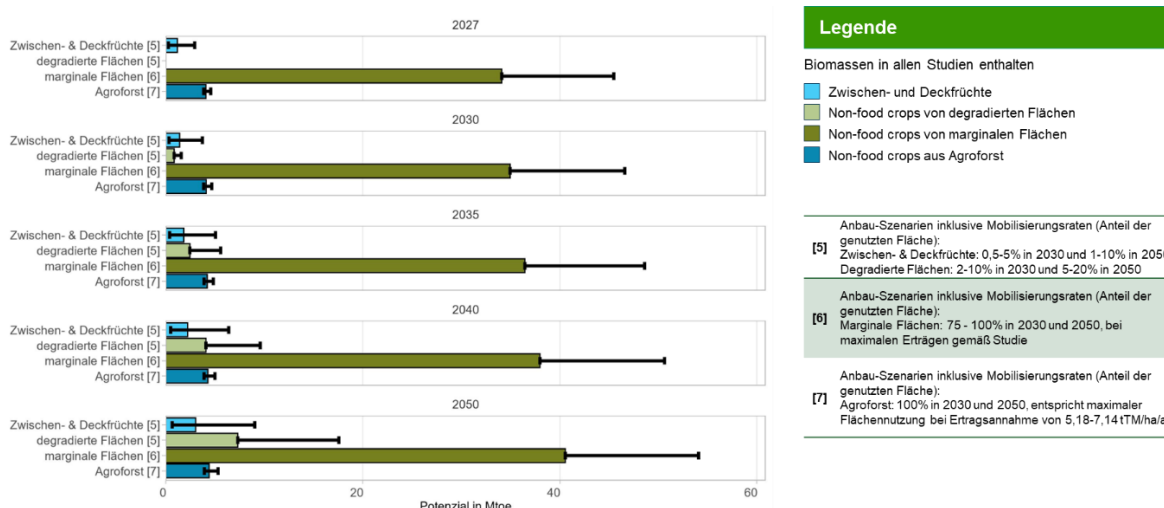


Abbildung 9: Biomassepotenziale (Mittelwerte und Szenario-Bandbreiten) von Zwischen- und Deckfrüchten, Non-Food Crops von degradierten und marginalen Flächen sowie von Agroforst; basierend auf [52, 51].

3.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

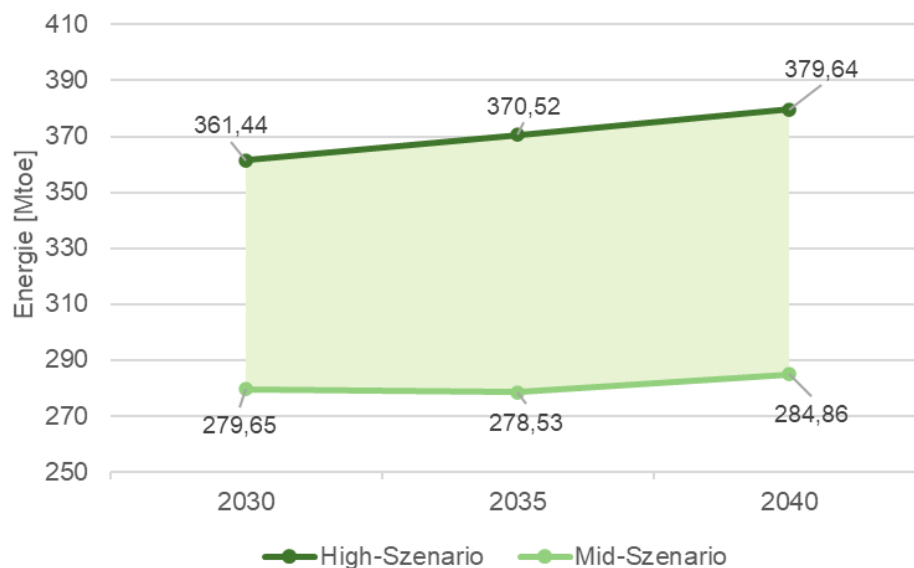
Abschließend sind in Tabelle 2 die im weiteren Verlauf der Studie bzw. für den Konversionsschritt in Kapitel 4 verwendeten Biomassepotenzial-Szenarien der EU nach Biomassekategorie und zeitlichem Verlauf zusammengefasst. Dabei basieren die Daten für Rest- und Abfallstoffe sowie für Stammholz/Derbholz auf dem mittleren und hohen Bioenergieszenario von Concawe [43] gemäß Abbildung 7. Die Potenzialdaten für Non-Food Crops von marginalen Flächen [51], Zwischen- und Deckfrüchten [52] sowie Agroforst (eigenes Szenario) basieren auf den mittleren und hohen Werten der jeweiligen Biomassekategorien gemäß Abbildung 9.

Tabelle 2: EU-Biomassepotenzial-Szenarien nach Biomassekategorie im zeitlichen Verlauf.

Biomasse	Quelle	Bioenergie EU - Mid-Szenario -			Bioenergie EU - High-Szenario -		
		2030	2035	2040	2030	2035	2040
Rest- und Abfallstoffe	Concawe	198,1	194,4	198,1	236,0	239,8	243,7
Stammholz/Derbholz	Concawe	41,2	41,7	42,2	70,4	72,2	73,9
Non-food crops von marginalen Flächen	Vera et al.	34,9	36,5	38,0	46,6	48,6	50,6
Zwischen- und Deckfrüchte	Wageningen	1,4	1,8	2,2	3,7	5,1	6,4
Agroforst	eigenes Szenario	4,1	4,2	4,3	4,7	4,8	5,0
Summe		279,7	278,6	284,8	361,4	370,5	379,6

Hinweis: Die in der Concawe-Studie [43] ausgewiesenen Biomassepotenzialdaten zu Importen und NawaRo sind hier nicht berücksichtigt

In Abbildung 10 sind die in diesem Kapitel ausgewählten Potenziale gemäß den Angaben in Tabelle 2 in Summe visualisiert.

**Abbildung 10:** Bioenergiepotenzial im Mid- und High-Szenario, das für die weiteren Analysen der vorliegenden Studie verwendet wird.

Es werden die Daten aus dem Mid- und High-Szenario der Bioenergiepotenziale der Concawe-Studie genutzt, und sowohl die oben dargestellten Potenzial-Szenarien der Zwischen- und Deckfrüchte als auch des Agroforsts berücksichtigt. Die Potenziale für NawaRo gemäß Concawe-Studie werden dabei durch die Potenziale für Non-Food Crops von marginalen Flächen nach Vera et al. [51] ersetzt, da hier eine weitaus detailliertere und weitreichendere Analyse enthalten ist. Die Potenziale zu degradierten Flächen gemäß Wageningen [52] sind hier nicht berücksichtigt. Eine Veranschaulichung welchen

prozentualen Anteil die einzelnen Rohstoffe an den beiden Szenarien über die Jahre 2030 - 2040 aufweisen, findet sich in Abbildung 11.

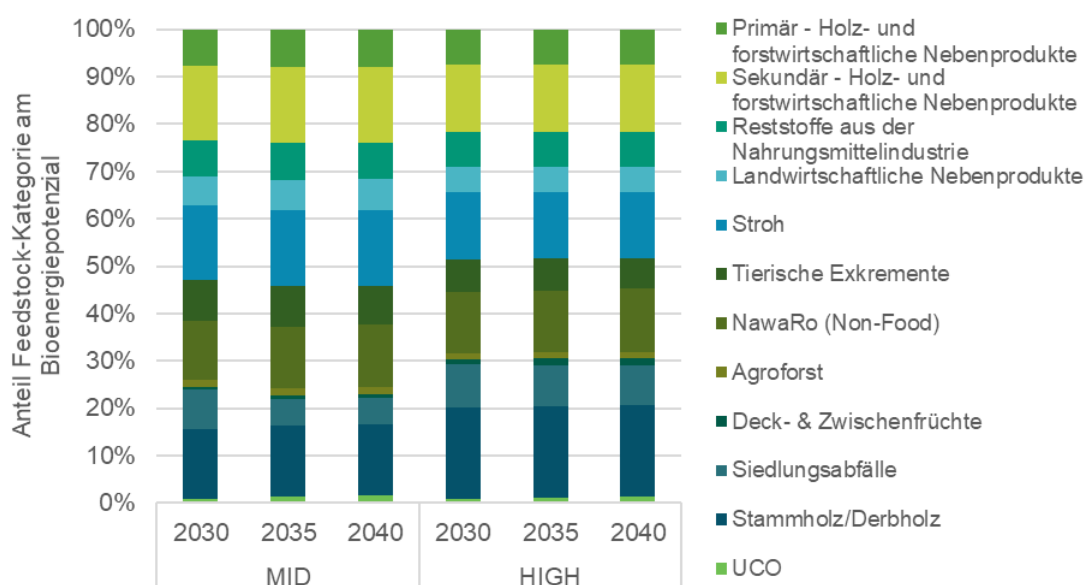


Abbildung 11: Anteil der Feedstock-Kategorien am Bioenergiepotenzial im Mid- und High-Szenario über die Jahre 2030 - 2040.

3.2.5 Hinweise zur Interpretation der Ergebnisse

Die dargelegten Ergebnisse stellen einen Ausschnitt des Forschungsstandes zu Biomassepotenzialen biogener Rest- und Abfallstoffe mit Blick auf Europa und Global, sowie zu Potenzial-Szenarien für Non-Food Crops von marginalen bzw. degradierten Flächen, Zwischen- und Deckfrüchte und Agroforst mit Fokus auf die EU dar. Die vergleichende Analyse der beschriebenen Biomassepotenzialstudien kann vor allem die Bandbreiten und damit verbundenen Unsicherheiten der zukünftigen Biomassepotenziale aufzeigen. Deshalb wurden mehrere Veröffentlichungen gesichtet, sich aber im Fortlauf auf die Studie [43] für die EU fokussiert, die den Schwerpunkt auf fortschrittliche Rest- und Abfallstoffe sowie als Kontext die RED II legt. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die analysierten Studien etwaige Vorgaben der RED II/RED III [17, 18] sowie sonstige Nachhaltigkeitsanforderungen (EU Biodiversitäts-Strategie, LULUCF-VO) bislang nicht in Gänze berücksichtigen. Wenngleich die Studien verschiedene Annahmen zu konkurrierenden Nutzungen (im Rahmen der Szenarien) treffen, sind zukünftige Nutzungskonkurrenzen aufgrund zunehmender Bedarfe in verschiedenen Sektoren der Bioökonomie (stofflich und energetisch) nicht vollumfänglich adressiert. Mögliche Bedarfe für andere energetische Sektoren werden in der vorliegenden Studie jedoch unter Zuhilfenahme von EU Impact Assessments zu Fit-for-55 sowie zur Revision der RED II [19, 20] inklusive prognostizierten Bedarfen für den Schiffs- und Flugverkehrssektor

berücksichtigt und von den hier aufgezeigten Potenzialen subtrahiert. Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass sich gewisse Flächen der Potenzialszenarien für Non-Food Crops von marginalen bzw. degradierten Flächen sowie Agroforst überschneiden könnten. Deshalb werden in der vorliegenden Studie nur die Mengen der marginalen Flächen genutzt und auf die Verwendung der Potenzialszenarien für Non-Food Crops von degradierten Flächen verzichtet, um eine Doppelanrechnung zu vermeiden.

4 Konversion zu Biokraftstoffen

4.1 Technischer Hintergrund

Biomasse kann durch verschiedene Technologien zu unterschiedlichen fortschrittlichen erneuerbaren Kraftstoffen gemäß der RED umgesetzt werden. In der vorliegenden Studie werden die auf Basis von prognostizierten Biomassepotenzialen erzeugbaren Kraftstoffmengen errechnet. Dabei werden insbesondere folgende Technologien betrachtet:

- 1.) Die Hydrierung von Fetten und Fettsäuren zu Kohlenwasserstoffen, hier als HVO- bzw. HEFA-Verfahren oder kurz HVO bezeichnet.
- 2.) Partielle Oxidation von Biomasse zu Synthesegas und anschließende (mehrstufige) Synthese von Kohlenwasserstoffen, hier insbesondere durch
 - a.) Methanolsynthese und anschließende Oligomerisierung unter Wasserabspaltung zu Kohlenwasserstoffen mit Kettenlängen im Bereich typischer Benzin-Fractionen, im Folgenden als Methanol-to-Gasoline-Verfahren oder kurz MtG bezeichnet
 - b.) Methanolsynthese mit anschließender Dehydrierung zu kurzkettigen Olefinen, gefolgt von deren Oligomerisierung und Hydrierung zu Kohlenwasserstoffen, überwiegend mit Kettenlängen im Bereich typischer Mitteldestillate (Diesel- und Kerosin-Fractionen), hier als Methanol-to-X-Verfahren oder kurz MtX bezeichnet

Darüber hinaus existieren weitere Technologien, die hier aufgrund einer niedriger zu erwartenden Konversionseffizienz und Ausbeute nicht betrachtet werden, prinzipiell aber zur Herstellung fortschrittlicher Biokraftstoffe geeignet sind.

4.2 Bestimmung der Konversionsfaktoren

Zur Berechnung der aus den prognostizierten Rohstoffpotenzialen erzeugbaren Kraftstoffmengen werden für die oben beschriebene Prozessketten energetische Konversionsfaktoren bestimmt. Mit diesen können die Rohstoffpotenziale nach Zuordnung zu den geeigneten Verfahren in Kraftstoffmengen umgerechnet werden.

4.2.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage zur Bestimmung der Konversionsfaktoren für die synthesegasbasierten Verfahren (MtG und MtX) dienen hauptsächlich Auswertungen von Betriebsdaten der

bioliq®-Pilotanlage [16, 33] am KIT Campus Nord und verschiedene Designstudien zu methanolbasierten Kraftstoffsynthesen [42], die im Rahmen von Forschungsprojekten durch Anlagenbauunternehmen und Technologiegeber (als Auftragnehmer) sowie das KIT-IKFT erstellt wurden. Dabei handelt es sich um praxisnahe Daten, die aber nicht veröffentlicht wurden.

Für die Bestimmung des Konversionsfaktors zur HVO-Herstellung wird auf verfügbare Literatur zurückgegriffen und um eigene Überschlagsrechnungen ergänzt. [50]

4.2.2 Konversionsfaktoren

Zunächst werden aus den vorliegenden Daten für die einzelnen Verfahrensschritte Massen- und Elementbilanzen erstellt. Aus diesen werden (kohlenstoff- und massebezogene) Konversionsfaktoren für den jeweiligen Block berechnet, wobei hier nur die relevanten, kohlenstoffhaltigen Stoffströme ins Verhältnis gesetzt werden. Durch Multiplikation der Konversionsfaktoren der für das Gesamtverfahren relevanten Blöcke wird ein Gesamtkonversionsfaktor berechnet. Aus dem massebezogenen Konversionsfaktor für das Gesamtverfahren kann dann mittels aus der Literatur [49] bekannter oder durch eigene Messungen bestimmter Heizwerte der energetische Konversionsfaktor berechnet werden.

In der Standard-Prozesskette für die synthetischen Kraftstoffe wird das H_2/CO -Verhältnis im Synthesegas durch eine Wasser-Gas-Shift-Reaktion (WGS) angepasst, wobei CO_2 entsteht, das nicht weiter für die Synthese zur Verfügung steht. Alternativ kann, sofern verfügbar, Wasserstoff zugegeben werden, wodurch insbesondere die Kohlenstoff- und damit Kraftstoffausbeute deutlich gesteigert wird. Dies wird als PBtL-Variante (Power-and-Biomass-to-Liquid, ggü. BtL - Biomass-to-Liquid) des jeweiligen Verfahrens bezeichnet. Für diesen Fall werden ebenfalls Konversionsfaktoren berechnet. Diese setzen analog zu den Standard-Faktoren nur die erzeugbare Kraftstoffmenge zu der dafür genutzten Biomasse-Menge in Relation, der zusätzliche Wasserstoff wird also energetisch nicht berücksichtigt. In den oben genannten Verfahren werden jeweils mehrere Kohlenwasserstofffraktionen erzeugt, wobei der Fokus der Designstudien auf der Erzeugung mindestens einer normgerechten Fraktion liegt. Diese unterscheiden sich allerdings zwischen den Veröffentlichungen und es werden auch für die vorliegende Studie nicht relevante Nebenprodukte und Kraftstofffraktionen betrachtet. Außerdem liegt der Fokus dieser Studie einerseits auf flüssigen Kraftstoffen für den Straßenverkehr und andererseits auf den maximal erzeugbaren Mengen ohne Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen. Die relevanten Stoffströme werden daher zu den Kategorien „Naphtha“ für benzinartige Fraktionen und „Mitteldestillat“ für dieselartige Fraktionen zusammengefasst.

Für die hier betrachteten Verfahren ergeben sich die in Tabelle 3 aufgelisteten Konversionsfaktoren. Die Faktoren werden dabei für die Naphtha- und die Mitteldestillat-Fractionen angegeben.

Tabelle 3: Konversionsfaktoren für die genutzten Umwandlungspfade.

Verfahren	Fraktion	BtL Konversionsfaktor	PBtL Konversionsfaktor	PBtL-H ₂ -Bedarf [Mtoe]
HVO	Naphtha	0,06	-	-
	Mitteldestillat	0,88	-	
MtX	Naphtha	0,09	0,16	0,56
	Mitteldestillat	0,43	0,77	
MtG	Naphtha	0,46	0,83	0,56
	Mitteldestillat	-	-	

4.3 Berechnung der Kraftstoffpotenziale

Zur Berechnung der Kraftstoffpotenziale werden die, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, zuvor unter entsprechenden Annahmen bestimmten Biomassepotenziale mit den Konversionsfaktoren multipliziert. Dabei werden die Biomassepotenziale den hier betrachteten Verfahren anteilig zugeordnet, wobei sich die Anteile insbesondere nach Eignung der Feedstocks für die jeweiligen Prozessketten und den prognostizierten Bedarfen richten.

Die vorliegenden Biomassepotenziale sind in umfangreiche Kategorien gegliedert und enthalten teils sehr verschiedene Biomassen, die unterschiedliche Charakteristika hinsichtlich ihrer Verarbeitung aufweisen. Da sich die Kategorien nicht sinnvoll noch weiter im Detail auflösen lassen, müssen hinsichtlich der Zusammensetzung und der sich daraus ergebenden Eignung für die jeweiligen Verfahren einige Annahmen getroffen werden. Neben der Zuteilung zu den hier betrachteten Konversionsverfahren werden auch Konkurrenznutzung durch andere Industriesektoren und andere Verkehrsträger beachtet.

4.3.1 HVO-Feedstocks

Feedstocks zur Herstellung von HVO sind stark begrenzt. HVO ist allerdings ein hochwertiger erneuerbarer Kraftstoff, der zu akzeptablen Kosten hergestellt wird und bereits am Markt etabliert ist. Daher wird auch unter marktwirtschaftlichen Gesichtspunkten angenommen, dass alle dafür geeigneten Feedstocks auch dafür genutzt werden, also keiner Konkurrenznutzung unterliegen.

4.3.2 MtG- und MtX-Feedstocks

Die beiden Verfahren teilen sich die Upstream-Prozesskette bis zum Methanol, daher kommen prinzipiell die gleichen Feedstocks in Frage. Die Verteilung der Feedstocks zwischen den MtG- und MtX-Prozessketten wird daher in Anlehnung an die Bedarfe an Otto- und Diesel-Kraftstoffen vorgenommen. Dazu werden zwei Szenarien konstruiert: ein ausgeglichenes Szenario in dem ca. 15 - 20% der genutzten Feedstocks dem MtG-Verfahren zugeordnet werden (Mehr-Naphtha-Szenario) und ein Szenario mit maximaler Mitteldestillatausbeute, in dem die zur Verfügung stehenden Feedstocks vollständig dem MtX-Verfahren zugeordnet werden (Max-Mitteldestillat-Szenario).

Beide Prozessketten beruhen auf der partiellen Oxidation von Biomasse nach einer vorhergehenden Pyrolyse der Biomasse zur Energieverdichtung. Hierfür eignen sich insbesondere trockene, lignocellulosehaltige Materialien wie Holz und Stroh. Dies sind auch die verwendeten Rohstoffe der hier kalkulatorisch zugrunde liegenden bioliq®-Pilotanlage. Prinzipiell lassen sich aber (nahezu) alle biogenen organische Materialien nach geeigneter Vorbehandlung einer Vergasung zuführen, wobei dafür eventuell auf andere Technologien zurückgegriffen werden muss. Vereinfachend wird die Annahme getroffen, dass die gleichen Konversionsfaktoren unabhängig der verwendeten Biomasse angewendet werden können.

4.3.3 Abzüge für andere Sektoren

Biomasse unterliegt grundsätzlich einer Nutzungskonkurrenz, sowohl auf der stofflich/materiellen als auch auf der energetischen Seite. Daher werden die Rohstoffpotenziale um gewisse Mengen reduziert, die der Literatur [19, 20] entnommen werden. Kapitel 7.2.1 im Anhang beschreibt die Methodik hinsichtlich der Abzüge je Feedstockkategorie.

Tabelle 4: Abzüge der Bedarfe anderer Sektoren von den Biomassepotenzialen.

	2030	2035	2040
Andere Industrien [Mtoe]	143	174	206
Andere Verkehrsträger [Mtoe]	6	14	22
Gesamt [Mtoe]	149	188	228

Für die Darstellung der Ergebnisse werden die Potenziale nicht separat dargestellt, sondern den Kategorien gemäß RED III, Annex IX zugeordnet.

4.3.4 Aufschläge für RFNBOs und konventionelle Biokraftstoffe

Basierend auf den Vorgaben der RED [17, 18] und des Gesetzentwurfs zur Überarbeitung der (deutschen) THG-Minderungs-Quote [8] werden die Mindestquoten (ohne Mehrfachanrechnung) für RFNBOs und die gedeckelten Maximalmengen an konventionellen Biokraftstoffen auf die sich hier ergebenden Mengen an fortschrittlichen Biokraftstoffen aufgeschlagen.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Effektive Biomassepotenziale

Die ursprünglichen Biomassepotenziale, wie in Kapitel 3 dargelegt, steigen im betrachteten Zeitraum leicht an, liegen aber auf vergleichbarem Niveau. Durch die über die Jahre ansteigenden Abzüge aufgrund konkurrierender Nutzung sinken die effektiv für die Konversion verfügbaren Biomassepotenziale allerdings deutlich.

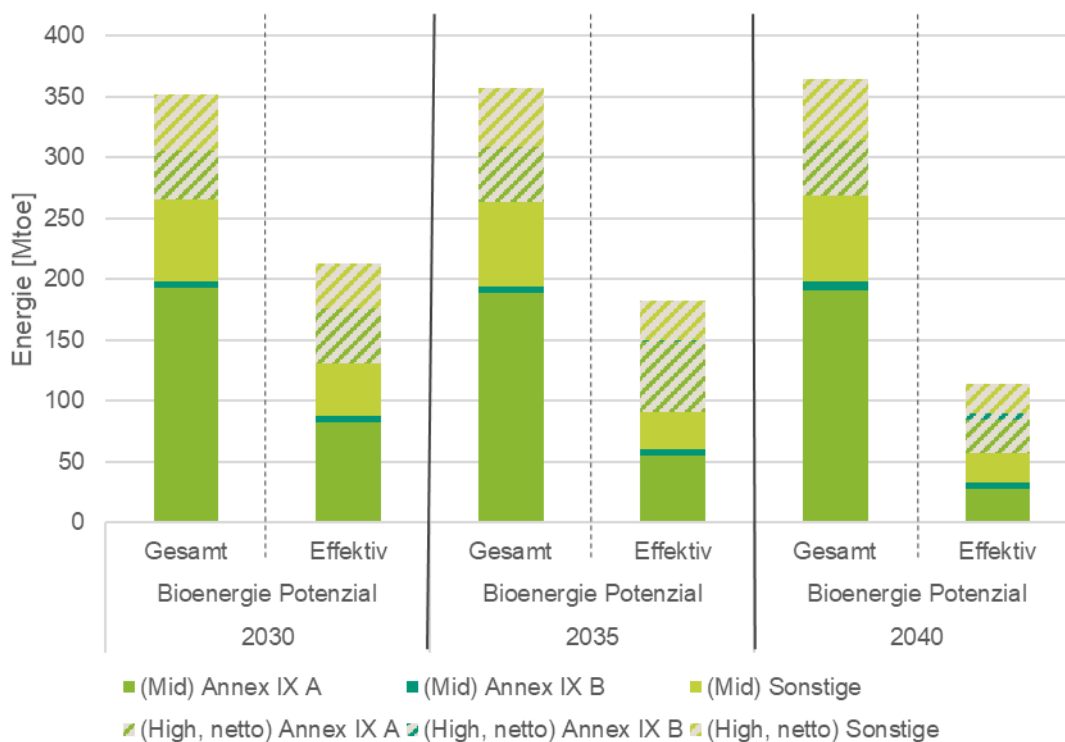


Abbildung 12: Gesamte und effektive Biomassepotenziale.

Im High-Szenario liegt das gesamte Bioenergiepotenzial entlang der Zeitachse zwischen 349 und 365 Mtoe und die effektiven Potenziale zwischen 212 und 114 Mtoe. Entsprechend sinkt der Anteil des effektiv verfügbaren Potenzials von 61 auf 31%. In Abbildung 12 werden hierbei die Bioenergiepotenziale aus nachwachsenden Rohstoffen (NawaRo), Zwischen-

und Deckfrüchte sowie Agroforst in der Kategorie „Sonstige“ zusammengefasst. Für das moderate Szenario (Mid) ergeben sich analog Werte zwischen 265 und 269 Mtoe für das ursprüngliche und 212 und 114 Mtoe für das effektive Bioenergiepotenzial. Der Anteil des effektiven Potenzials liegt dabei mit Werten zwischen 49 und 21% durchweg niedriger als im hohen Szenario.

4.4.2 Kraftstoffpotenziale

Durch Umrechnung der Biomassepotenziale (Szenarien Mid und High) mit den zuvor bestimmten energetischen Konversionsfaktoren in den beiden Konversionsszenarien (Max-Mitteldestillat und Mehr-Naphtha) ergeben sich insgesamt vier Szenarien (siehe Abbildung 3).

Zwischen den beiden Konversionsszenarien ergeben sich dabei einige Parallelen in den zeitlichen Verläufen. Durch den zunehmenden Anteil an Feedstocks, die den PBtL-Routen mit deutlich höheren Konversionsfaktoren zugewiesen werden, wird der Rückgang der effektiven Bioenergiepotenziale über die Zeit teilweise kompensiert. Im Szenario High liegt die Gesamtkraftstoffmenge so über den betrachteten Zeitraum auf dem gleichen Niveau, während im Szenario Mid nur der Rückgang der erzeugbaren Kraftstoffmengen abgedeckt wird. Dies zeigt sich auch in den effektiven Gesamtkonversionsfaktoren, die über den betrachteten Zeitraum deutlich ansteigen, wobei die Faktoren im Szenario High stets um 1 - 2 %-Punkte niedriger als im Mid-Szenario. Dies ist auf den aufgrund der zwischen den Szenarien ungefähr gleichbleibende Menge höheren Anteil an HVO-Feedstocks zurückzuführen.

Im Folgenden werden nur die Ergebnisse für das Max-Mitteldestillat-Szenario näher beleuchtet.

4.4.2.1 Max-Mitteldestillat-Szenario

Im Max-Mitteldestillat-Szenario werden nur die HVO- und MtX-Verfahrensrouten bedient, Naphtha entsteht dabei nur als Nebenprodukt, allerdings in relevanten Mengen.

Die Kraftstoffpotenziale liegen im zeitlichen Verlauf im High-Szenario zwischen 117 und 113 Mtoe sowie 73 und 43 Mtoe im Mid-Szenario (Abbildung 13). Die effektiven Gesamtkonversionsfaktoren, steigen im Mittel von 56 auf 75%. Durch den von ca. 5% auf ca. 50% steigenden Anteil an Feedstocks der den PBtL-Varianten zugewiesen wird, ergibt sich ein steigender PBtL-Wasserstoffbedarf von 5,4 bis 38,7 Mtoe im High-Szenario sowie 3,3 bis 14,3 Mtoe im Mid-Szenario.

Der Anteil der Naphtha-Fraktion am Gesamtkraftstoffpotenzial liegt um 17% im Mid- und High-Szenario. Im High-Szenario zeigt sich ebenfalls ein geringfügiger Rückgang des Naphtha-Anteils, allerdings nur im Bereich der Nachkommastellen.

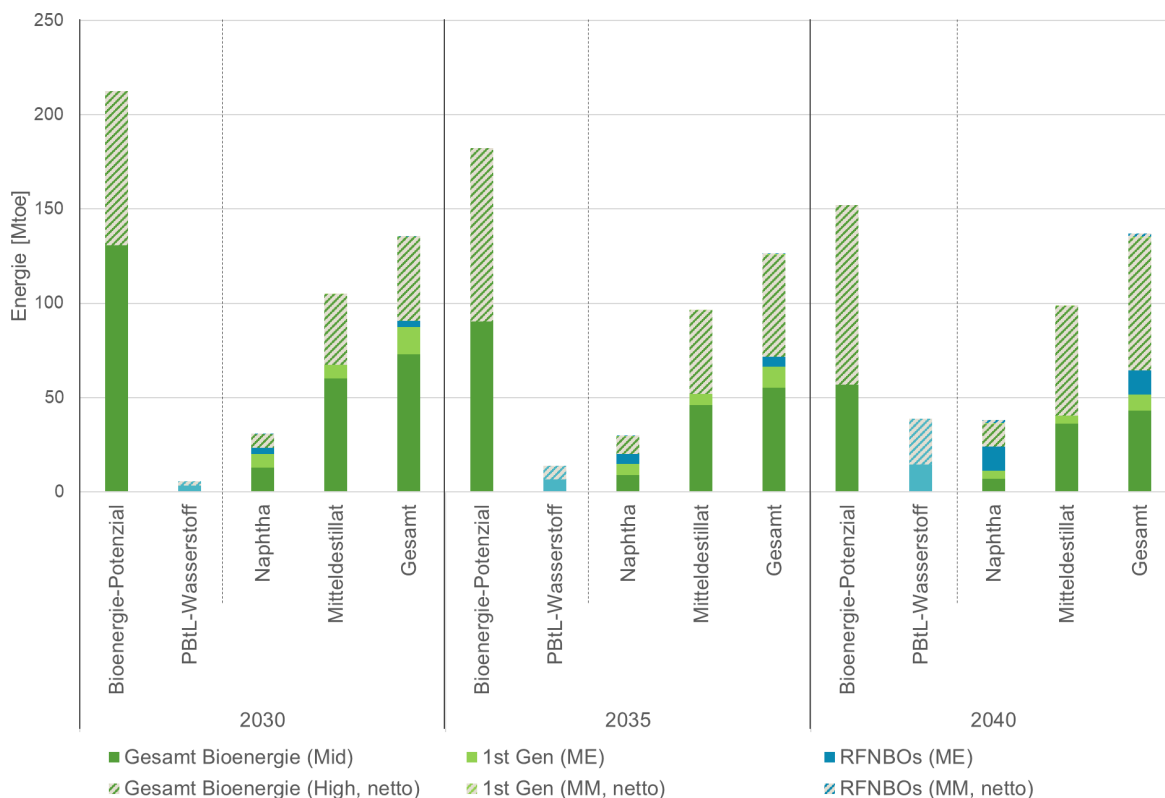


Abbildung 13: Kraftstoffpotenziale EU inklusive Aufschläge, Max-Mitteldestillat-Szenario.

Zur Berechnung der potenziell verfügbaren Mengen erneuerbarer Kraftstoffe werden, wie in Kapitel 7.2.2 beschrieben, Aufschläge für konventionelle Biokraftstoffe und RFNBOs angenommen. Dadurch ergeben sich um 18 bis 24 Mtoe höhere Gesamtkraftstoffpotenziale im High-Szenario, respektive 18 bis 21 Mtoe im Szenario Mid. Diese liegen damit bei 137 (2030 und 2040) bis 127 Mtoe (2035) im High bzw. 91 bis 64 Mtoe im Mid-Szenario.

4.4.2.2 Mehr-Naphtha-Szenario

Im Mehr-Naphtha-Szenario wird neben der HVO- und MtX-Route auch die MtG-Route bedient, wodurch sich höhere Mengen an Naphtha aber geringere Mitteldestillatmengen ergeben. Hierdurch soll ein ausgeglichenes Szenario geschaffen werden, das eine möglichst ähnliche Deckung der Benzin- und Dieselbedarfe erreicht. Dabei wird - auf einen 100% Ausgleich bezogen - auf die prozentualen Substitutionspotenziale verzichtet, da davon ausgegangen wird, dass die Mengen an Naphtha spätestens 2040 zu einer zu geringen Produktionsauslastung führen könnten. Die Gesamtmenge an Kraftstoff liegt geringfügig niedriger als im Max-Mitteldestillat-Szenario, da die MtG-Route einen etwas

geringeren Gesamt-Konversionsfaktor aufweist. Bezüglich der HVO-Route ergeben sich aufgrund der spezifischen Feedstocks keine Unterschiede.

Die erzeugbaren Kraftstoffmengen liegen über den zeitlichen Verlauf zwischen 133 und 136 Mtoe im High-Szenario sowie 89 und 64 Mtoe im Mid-Szenario. Die effektiven Gesamtkonversionsfaktoren steigen im Mittel von 55 auf 73%. Durch den von ca. 5% auf ca. 50% steigenden Anteil an Feedstocks der den PBtL-Varianten zugewiesen wird, ergibt sich ein steigender PBtL-Wasserstoffbedarf von 5,7 bis 41,4 Mtoe im High- sowie 3,5 bis 14,3 Mtoe im Mid-Szenario.

Der Anteil der Naphtha-Fraktion am Gesamtkraftstoffpotenzial steigt von 23 auf 34% im High-Szenario und von 26 auf 36% im Mid-Szenario. Dies ist wie gewünscht, durchweg höher als im Max-Mitteldestillat-Szenario, sorgt aber auch für ein ausgeglicheneres Ergebnis.

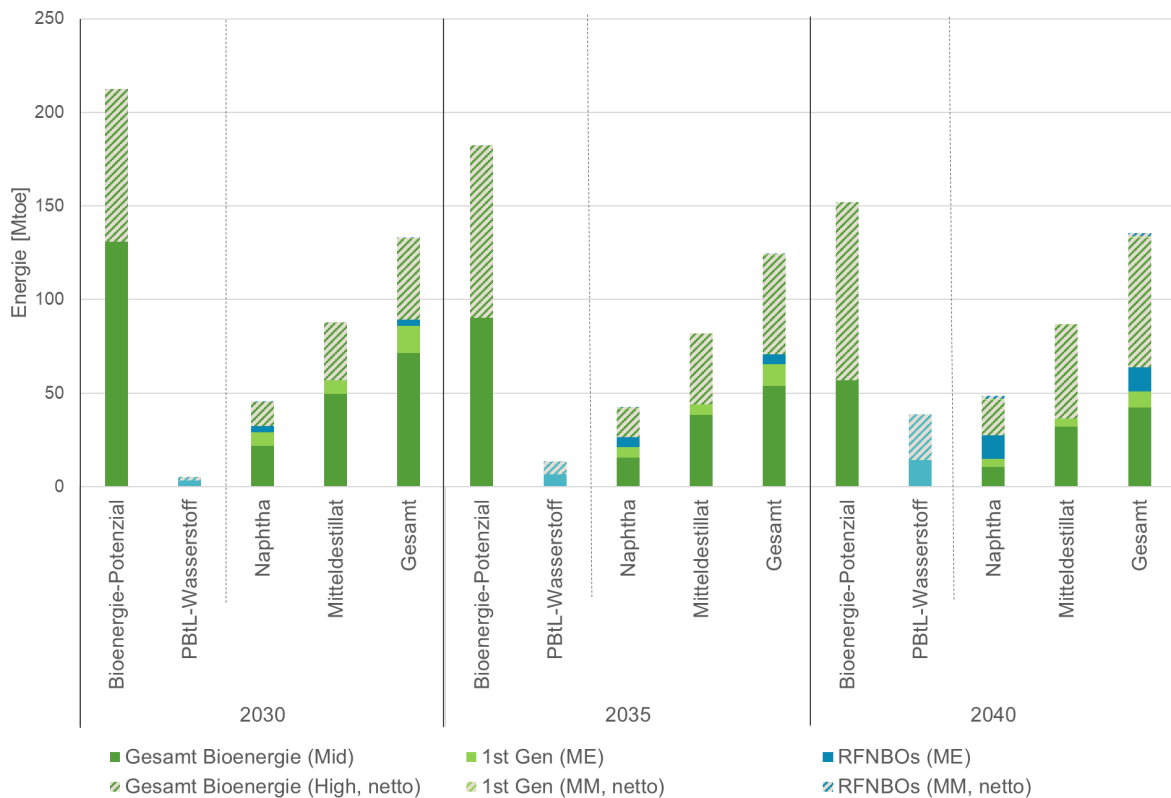


Abbildung 14: Kraftstoffpotenziale EU inklusive Aufschläge, Mehr-Naphtha-Szenario.

Inklusive der angenommenen Aufschläge für konventionelle Biokraftstoffe und RFNBOs ergeben sich um 18 bis 24 Mtoe im High-Szenario, respektive 18 bis 20 Mtoe im Mid-Szenario, höhere Gesamtkraftstoffpotenziale. Diese liegen damit bei 133 Mtoe (2030), 125 Mtoe (2035) und 136 Mtoe (2040) im High-Szenario und 89 Mtoe (2030), 71 Mtoe (2035) und 64 Mtoe (2040) im Mid-Szenario.

4.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass relevante Mengen fortschrittlicher Biokraftstoffe erzeugt werden können. Neben der grundlegenden Unsicherheit bei der Abschätzung der zukünftigen Biomassepotenziale unterliegt die tatsächliche Umsetzung aber einer Reihe von Voraussetzungen und damit verbundener Einschränkungen, die in den hier verwendeten Szenarien nur exemplarisch angedacht werden können.

Einerseits betrifft dies die tatsächliche Hebung der prognostizierten Biomassepotenziale, die mit steigendem Aufwand verbunden ist, insbesondere wenn die Potenziale vollständig genutzt werden sollen. Andererseits ist ein beschleunigter Hochlauf entsprechender Produktionskapazitäten notwendig, der von zahlreichen Rahmenbedingungen abhängig und verschiedenen technischen und ökonomischen Herausforderungen unterlegen ist. Diese zu überwinden, um die angepeilte disruptive Transformation des Energiesystems zu erreichen, erfordert große Anstrengungen und ein koordiniertes Vorgehen aller Beteiligten. Wie ein solcher Markthochlauf gelingen kann, welche Rahmendbedingungen notwendig sind und welche konkreten Schritte unternommen werden können, wird derzeit in zahlreichen Forschungsvorhaben, auch unter Beteiligung des KIT, untersucht.

5 Bedarfe der zukünftigen Fahrzeugflotte

Um die ermittelten Kraftstoffpotenziale in Relation zu denen im Mobilitätsbereich benötigten Mengen zu stellen, wird der zugehörige Bedarf anhand von Modellen zur Flottenentwicklung ermittelt und gegenübergestellt. Für diese Studie wird die Betrachtung dafür auf ein bestehendes Flottenmodell [47] gestützt. Die zitierte Studie stellt zwei Szenarien zur Verfügung. Ein Max-Electron-Szenario (ME) mit starker Elektrifizierung und ein More-Molecule-Szenario (MM) mit stärkerer Ausrichtung auf erneuerbare Kraftstoffe. Im Flottenszenario äußert sich letzteres in einer stärkeren Betonung von Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen bei einer reduzierten BEV-Flotte.

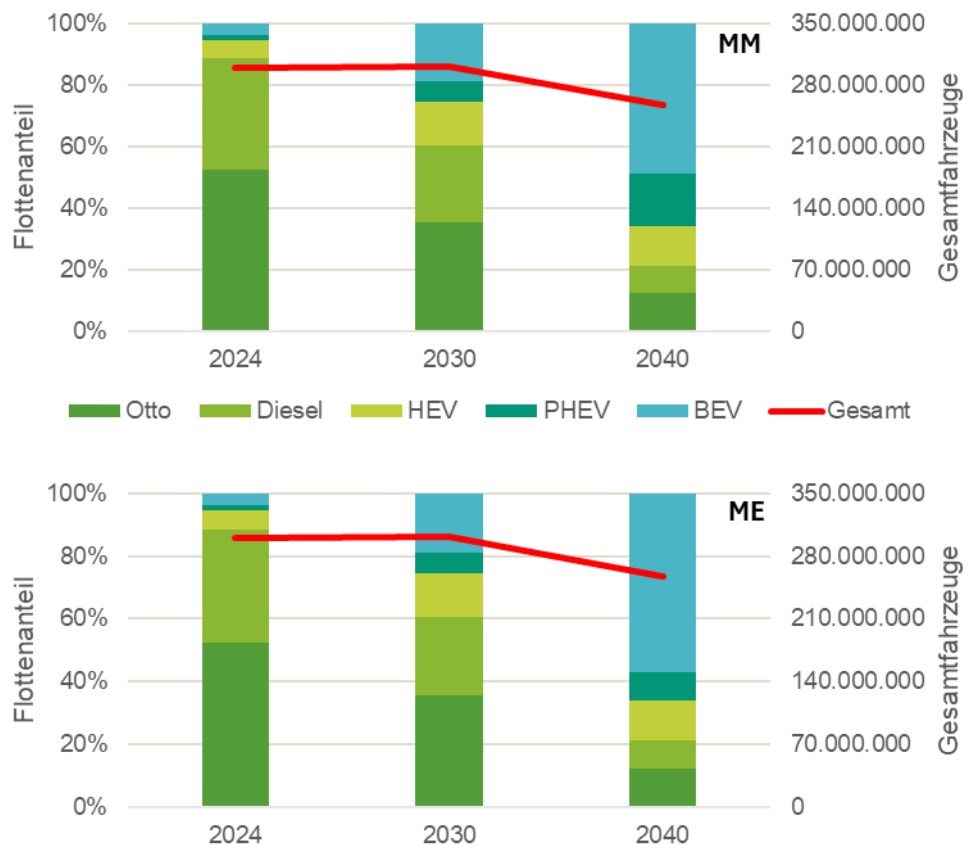


Abbildung 15: Flottenentwicklung nach MM- und ME-Flottenszenario.

5.1 Berechnung der Zwischenjahre

Teil der veröffentlichten Flottenszenarien der zugrunde gelegten Studien ist die Flottengröße in Ankerjahren, die auch mit der Betrachtung dieser Studie übereinstimmen. Zur weiteren eigenen Berechnung von Neufahrzeugen wird diese Datenbasis mittels

linearer Interpolation erweitert, um die entsprechenden Daten für alle Jahre im Zeitraum 2027 - 2040 zu erhalten. Die den Szenarien zugrundeliegende Annahmen hinsichtlich der Dynamik der Flottenentwicklung wird dabei nicht verändert.

5.2 Aufschlüsselung in Benzin- und Diesel-Fahrzeuge und Verbrauchsabschätzung

Beide Szenarien teilen bei den PKWs die Hybrid- und Plug-In-Hybrid-Fahrzeuge (HEV und PHEV) nicht weiter in die Motorentechnologien (otto- und dieselmotorische Antriebe) auf. Da die Betrachtung der Kraftstoffpotenziale getrennt nach Mitteldestillaten und Naphtha erfolgt, werden für die Bedarfsabschätzungen hier weitere Annahmen getroffen. Basierend auf der Verteilung des Jahres 2023 wird für diese Studie das Flottenszenario um eine statische Aufteilung von 16% Dieselanteil bei den Hybriden und 6% Dieselanteil bei den PHEV erweitert⁴.

Für die Abschätzung der Entwicklung der Neuwagenzulassungen wird, basierend auf der Flotte im jeweiligen Jahr, ein statischer Anteil für Neuwagen berechnet, der auf Zulassungsdaten von 2023 beruht. Der Anteil der jeweiligen Neuwagen an der Gesamtflotte betrug im Jahr 2023 für Benzinfahrzeuge 2,98% und für Dieselfahrzeuge 1,58%. Bei Hybridfahrzeugen gibt es eine vergleichsweise kleine Bestandsflotte, so dass aktuelle Neuwagenanteile deutlich überhöht sind (35% HEV und 15% für PHEV). Hier wird der Mittelwert der Anteile hybridisierter Fahrzeuge über alle Fahrzeugkategorien mit 4,29% verwendet⁵. Die entsprechende vCNF-Flotte wird für Dieselfahrzeuge ab dem zweiten Halbjahr 2027 und für Benzinfahrzeuge ab dem zweiten Halbjahr 2030 aus den berechneten Neuwagen-Verteilungen als 100% vCNF summiert. Zu den vCNF werden alle PKWs gezählt, die gänzlich oder zum Teil den Energieinhalt kohlenstoffbasierter Kraftstoffe nutzen. LPG-Fahrzeuge werden hier nicht gesondert betrachtet. Die Einteilung erfolgt analog der Verteilung der Gesamtflotte in Diesel- und Benzinfahrzeuge. Für die Ermittlung der benötigten Kraftstoffmengen wird von einer ausschließlichen Betankung der Fahrzeuge mit erneuerbaren Kraftstoffen ausgegangen.

Die Verbräuche der Fahrzeugneuzulassungen werden anhand der Datenbasis der S&P-Studie [47] in der Bedarfsrechnung berücksichtigt. Für die einzelnen Fahrzeugkategorien wird mittels einer jährlichen Fahrleistung und einem durchschnittlichen Verbrauch auf den Gesamtverbrauch der Fahrzeugflotte geschlossen. Die angenommenen Verbräuche für die

⁴ Eurostat Auswertung[29] basierend auf [27, 26, 28].

⁵ Eigene Auswertung von Zulassungsdaten 2023 basierend auf Neuwagen [27] und Bestandsflotte [1].

Hybridfahrzeuge sind dabei niedriger als 2024 in der Flottenüberwachung erreichten Verbräuche⁶. Insbesondere die verstärkte Nutzung von PHEV führt hier zu einer Unterschätzung der Verbräuche, sollten die avisierten Reduktionen im Durchschnittsverbrauch der PHEV nicht eintreten.

5.3 Gesamtbedarf

Für den Gesamtkraftstoffbedarf der Fahrzeugflotte wird dem Bedarf der PKW-Flotte der Kraftstoffbedarf der leichten und schweren Nutzfahrzeuge hinzugerechnet. Diese werden direkt dem Max-Electron (ME) bzw. More-Molecule (MM) Szenario entnommen.

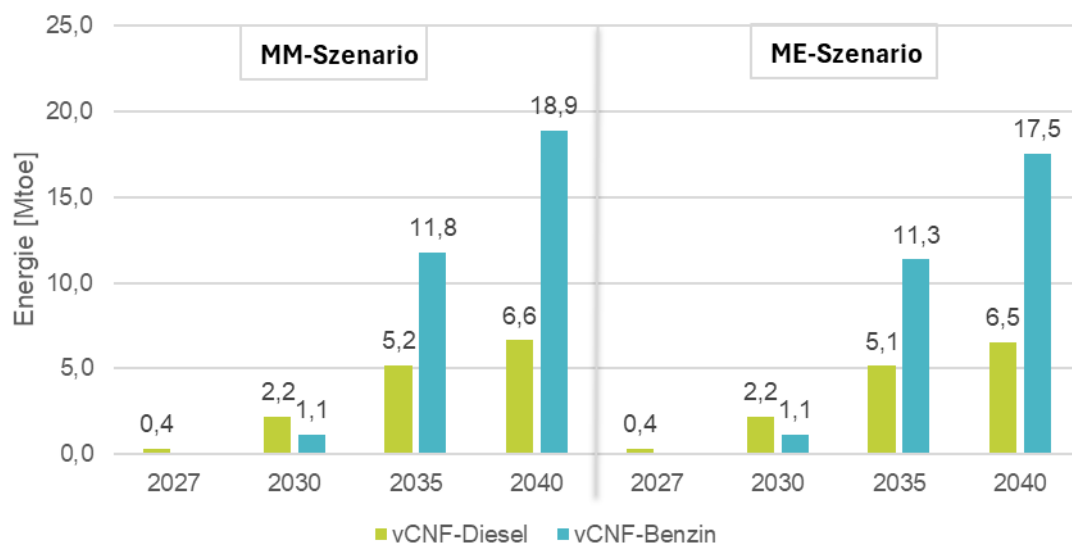


Abbildung 16: Benötigte Kraftstoffmengen für die vCNF-Flotte im MM-Szenario (links) und ME-Szenario (rechts).

Ergebnis

Abbildung 16 zeigt die Entwicklung der Bedarfe für vCNF-Fahrzeuge mit Diesel- bzw. Benzinmotor. Im Jahr 2040 ist der Unterschied im Bedarf an Dieselmotorkraftstoff für diese Fahrzeuge zwischen ME- und MM-Szenario nicht signifikant. Bei vCNF-Benzinfahrzeugen liegt der ermittelte Bedarf zwischen 17,5 und 18,9 Mtoe. Dieser Unterschied wird hauptsächlich durch eine unterschiedliche Anzahl an PHEV-Fahrzeugen getrieben, die in der S&P-Studie [47] überwiegend als Benzinfahrzeuge angenommen werden. Der stärkere Anstieg des Benzinbedarfs ist ebenso auf den höheren Anteil von Benzinantrieben bei der Neuwagenquote von Hybridfahrzeugen zurückzuführen, die wiederum eine höhere Neuwagenquote besitzen.

⁶ S&P rechnet für PHEV mit 3,97 L/100km; ermittelt wurden in 2024 6,1 L/100km [25].

Abbildung 17 zeigt zusätzlich die jeweiligen Gesamtbedarfe der Fahrzeugflotten im ME- und MM-Szenario inkl. Betrachtung des Fahrzeugbestandes. Im Jahr 2040 liegt der Bedarfsanteil im Dieselverbrauch der vCNF-Fahrzeugen zwischen 11 und 13%. Dabei wird der Gesamtbedarf besonders durch schwere Nutzfahrzeuge getrieben. Bei den Benzinfahrzeugen ist in 2040 der Anteil der vCNF-Flotte bereits auf 43 - 48% gestiegen.

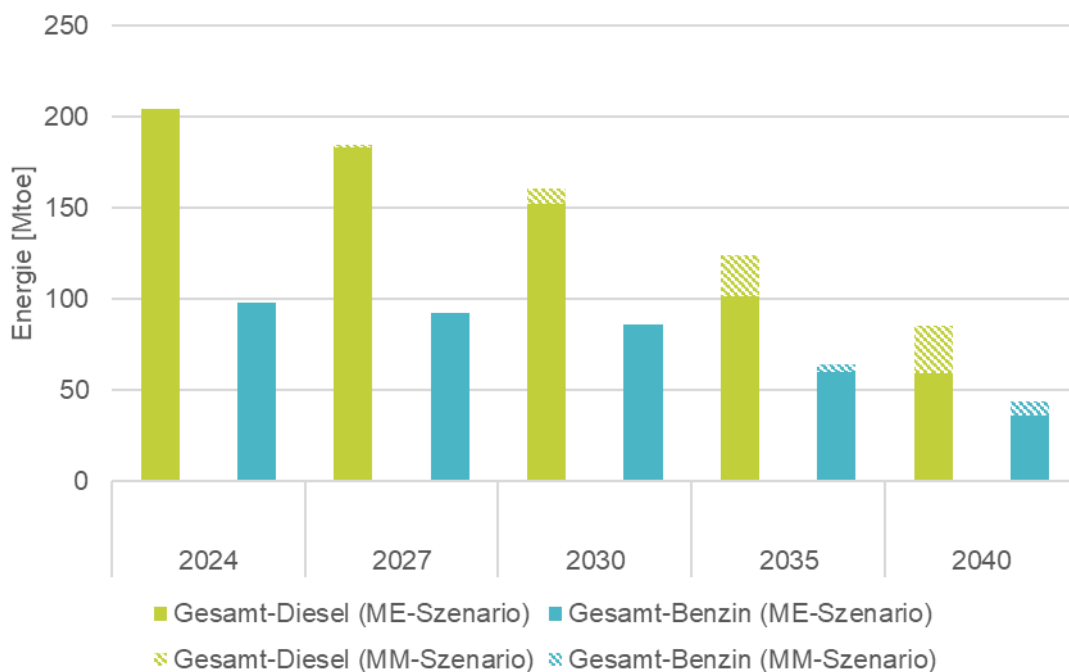


Abbildung 17: Bedarf der Gesamtflotte des ME- und MM-Szenarios über die Jahre 2024 - 2040.

Es sei darauf hingewiesen, dass zur Erzielung der Werte der S&P-Studie offensichtlich ein starker Flottentausch zugrunde gelegt wurde, der bei entsprechendem Käuferverhalten so nicht eintreten muss.

6 Gesamtergebnis

Im Folgenden werden die gesammelten Einzelergebnisse aus Kapitel 4 Umwandlung und Kapitel 5 Bedarf zusammengetragen und eine vergleichende Analyse angestellt. Hierzu werden, wie in Kapitel 2 Methodik erläutert, die resultierenden Mengen CNF aus dem Mid-Szenario dem Bedarf aus dem ME-Szenario gegenübergestellt (OK Mid und DK Mid). Die resultierenden Mengen CNF aus dem High-Szenario werden dem MM-Szenario gegenübergestellt (OK High und DK High). Zusätzlich werden Angaben gemacht, wie hoch das prozentuale Substitutionspotenzial des Gesamtbedarfs an den jeweiligen Einzelkraftstoffen Diesel und Otto ist.

DK-Mid- und OK-Mid-Szenario

Das DK-Mid-Szenario in Abbildung 18 zeigt auf, dass bis zum Jahr 2040 insgesamt 68% des Kraftstoffbedarfs der Gesamtflotte abgedeckt werden können. Die Substitution der Einzelkraftstoffe Diesel und Otto können mit 69% für die Diesel- und 66% für die Ottoseite beziffert werden.

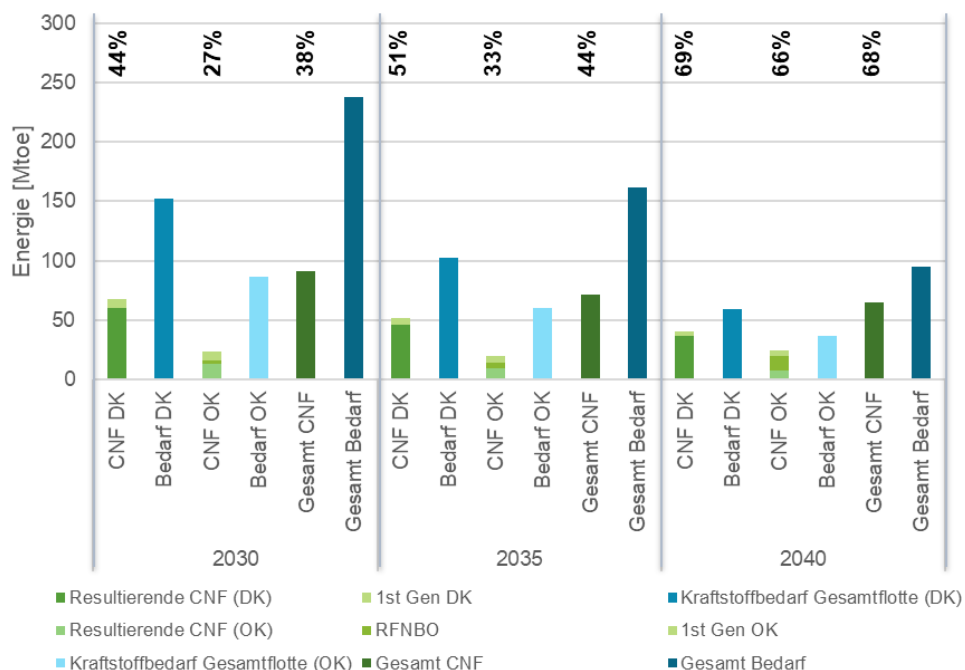


Abbildung 18: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im DK-Mid-Szenario.

Im OK-Mid-Szenario in Abbildung 19 können bis 2040 67% des Flottenbedarfs an flüssigen Kraftstoffen gedeckt werden. Hierbei können 61% des Dieselbedarfs und 76% des Ottobedarfs mit erneuerbaren Alternativen substituiert werden.

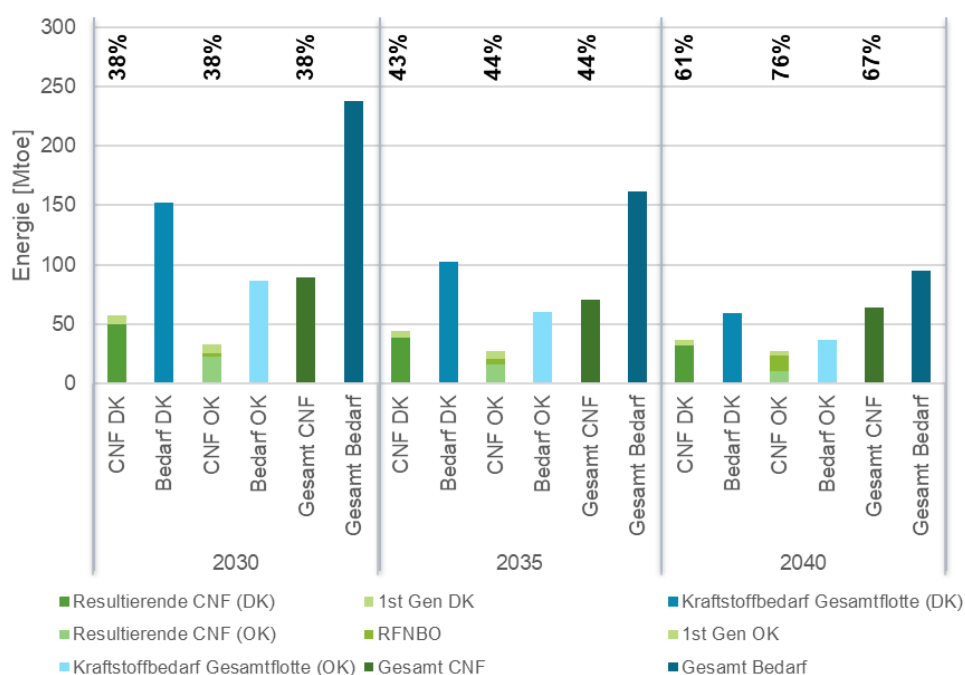


Abbildung 19: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im OK-Mid-Szenario.

DK-High- und OK-High-Szenario

Bei der Analyse der High-Szenarien wird deutlich, dass bis 2040 weitaus mehr als der Flottenbedarf mit CNF gedeckt werden kann.

Im DK-High-Szenario steigt das Substitutionspotenzial bezüglich des Gesamtbedarfs von 55% in 2030 über 67% in 2035 hin zu 107% im Jahr 2040. In der Kraftstoffeinzelanalyse ergibt sich hier für 2040, dass 116% des Dieselbedarfs gedeckt werden und 88% des Ottobedarfs (Abbildung 20).

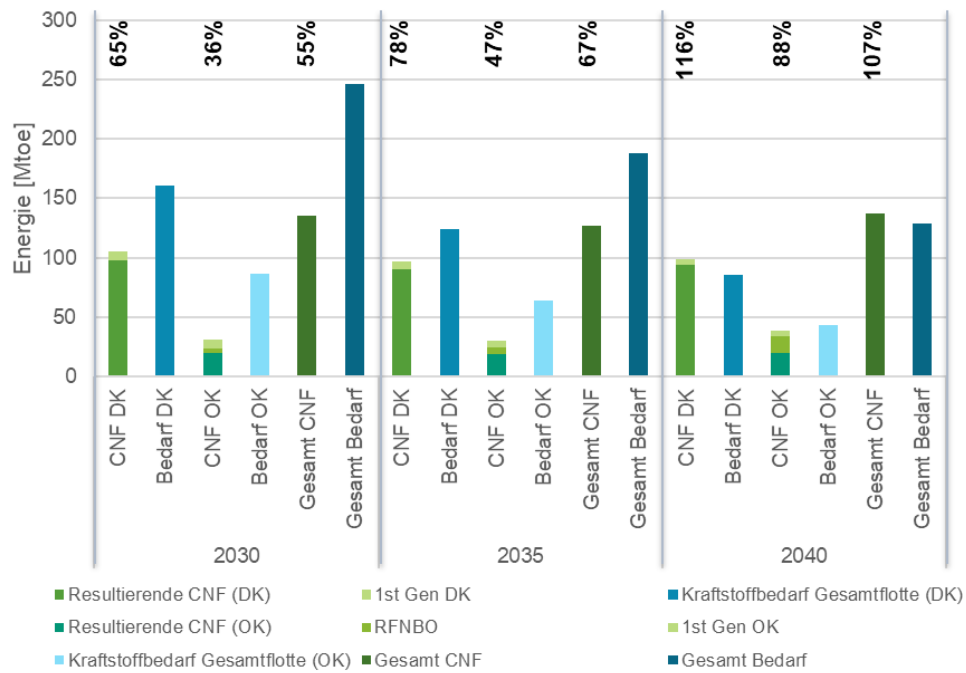


Abbildung 20: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im DK-High-Szenario.

Ein bezüglich des Substitutionspotenzials der Einzelkraftstoffe ausgeglicheneres Bild ergibt sich aus dem OK-High-Szenario in Abbildung 21. Hier sinkt der Gesamtsubstitutionsanteil leicht von 107 auf 106%, aber der Otto- und Dieselanteil kann mit 113 und 102% gleichermaßen und vollumfänglich bedient werden.

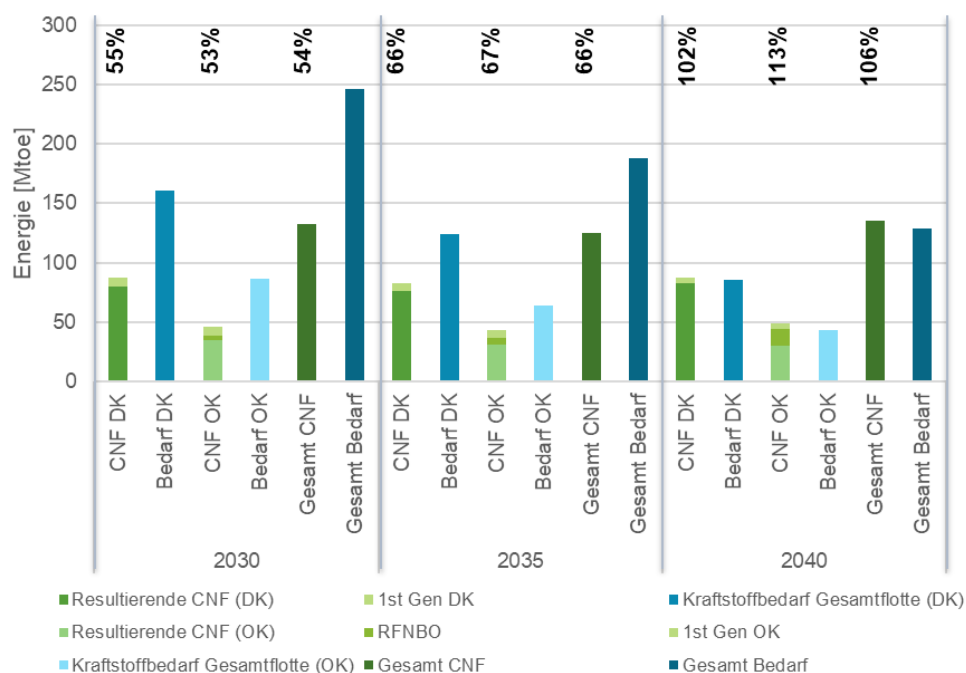


Abbildung 21: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im OK-High-Szenario.

Einen Überblick über das Verhältnis zwischen der Menge resultierender CNF und dem Flottenbedarf an flüssigen Kraftstoffen ergibt sich in Abbildung 22, wenn der Fokus in der Konversion der zur Verfügung stehenden Feedstocks auf den Dieselmotorkraftstoff gelegt wird.

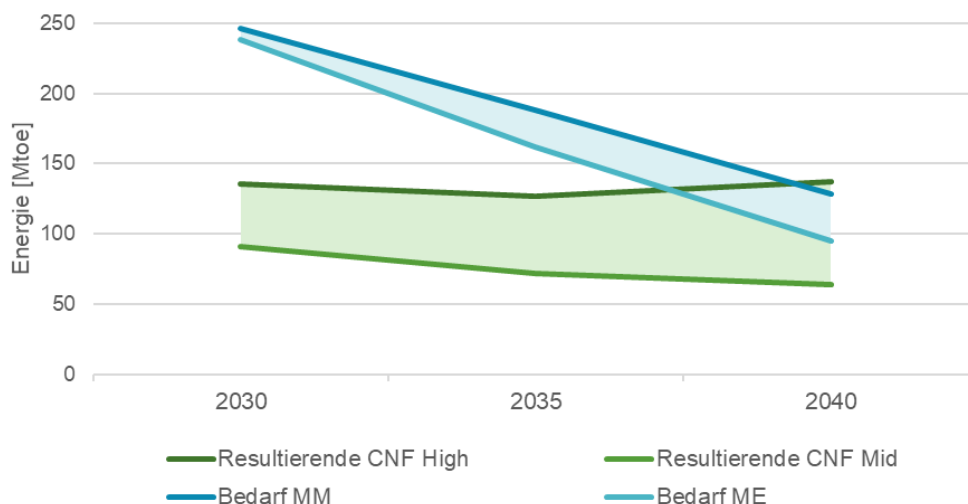


Abbildung 22: Überblick über den Zusammenhang zwischen den Mengen resultierender CNF und dem Bedarf in den verschiedenen Szenarien mit Fokus auf Diesel in der Konversion.

Die Analyse verdeutlicht, dass die Synergie aus einer ambitionierten Elektrifizierung (ME-Szenario) und dem High-Feedstock-Szenario eine vollständige Deckung des Flottenbedarfs weit vor dem Jahr 2040 erlaubt. Spätestens aber im Jahr 2040 führen beide Szenarien zu einer Übererfüllung des simulierten Bedarfs flüssiger Kraftstoffe im Straßenverkehr. Ein sehr ähnliches Bild zeigt die Abbildung 23, bei welcher der Fokus auf eine ausgeglichene Verteilung bzgl. Otto- und Dieselmengen in der Konversion gelegt wird.

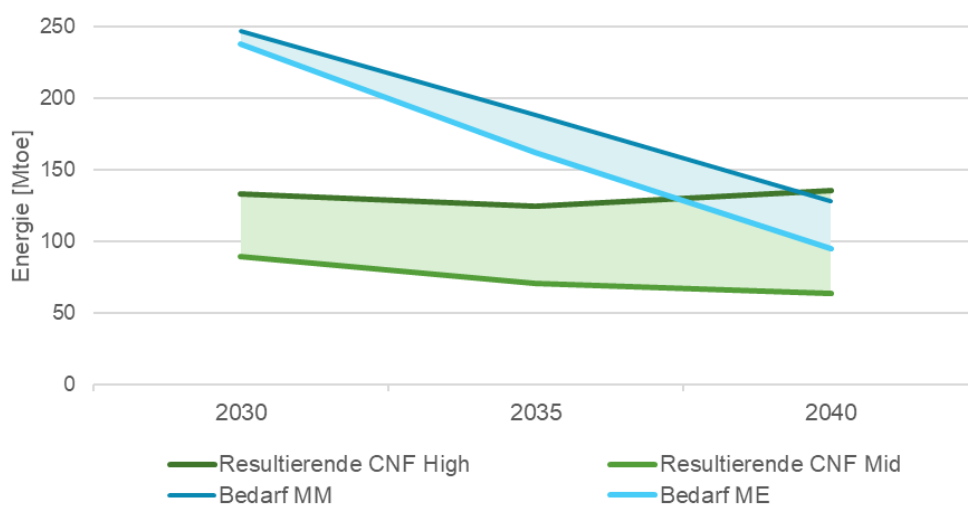


Abbildung 23: Überblick über den Zusammenhang zwischen den Mengen resultierender CNF und dem Bedarf in den verschiedenen Szenarien mit Fokus auf Otto in der Konversion.

Die Studie kommt zu dem klaren Ergebnis, dass erneuerbare Kraftstoffe (CNF) eine tragfähige und skalierbare Säule für einen Straßenverkehr ohne fossiles CO₂ in der EU darstellen und darüber hinaus langfristig keine strukturelle Importabhängigkeit erfordern, sondern ein hohes Maß an energie- und klimapolitischer Resilienz ermöglichen. Kurz- bis mittelfristig sind Rohstoffimporte für eine gesamthafte Substitution fossiler Kraftstoffe zwar notwendig, langfristig jedoch – spätestens ab 2040 – ist eine vollständige Deckung des gesamten Flottenbedarfs an flüssigen Kraftstoffen aus in Europa verfügbaren erneuerbaren Rohstoffen möglich. Voraussetzung hierfür sind verlässliche politische Rahmenbedingungen, Investitionssicherheit und ein koordinierter Hochlauf der CNF-Wertschöpfungsketten.

7 Anhang

7.1 Feedstockpotenzial

7.1.1 Allgemeine regulatorische Einordnung von biogenen Ressourcen zur Produktion von erneuerbaren Kraftstoffen

Die für die Kraftstoffproduktion geeigneten biogenen Ressourcen können anhand unterschiedlicher Kriterien systematisiert werden. Insbesondere aus dem regulatorischen Rahmen sowie aus ihrer Entstehungsweise ergibt sich eine grundlegende Differenzierung in biogene Hauptprodukte – vornehmlich Kultur- bzw. Nutzpflanzen –, biogene Nebenprodukte sowie biogene Abfälle (siehe Abbildung 24). Über ihren Ursprung hinaus werden biogene Ressourcen auch anhand ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften klassifiziert. Neben dieser primär technisch geprägten Zuordnung, ist insbesondere die Einordnung in die Rohstoffkategorien für Biokraftstoffe gemäß der Erneuerbare-Energien-Richtlinie der Europäischen Union (Renewable Energy Directive, RED II/RED III) sowie deren Erweiterung durch die Delegierte Richtlinie (EU) 2024/1405 von zentraler Bedeutung [17, 23, 18]. Vor diesem regulatorischen Hintergrund lassen sich die relevanten Biomassen fünf Biokraftstoffkategorien zuordnen:

- Biomassen für konventionelle Biokraftstoffe (insbesondere Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, sogenannte Food/Feed Crops)
- fortschrittliche Biokraftstoffe (Anhang IX Teil A)
- abfallbasierte Biokraftstoffe (Anhang IX Teil B)
- Biokraftstoffe mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen (ausgeschlossen, aus bestimmten Nahrungs- und Futtermittelpflanzen)
- sonstige Biokraftstoffe

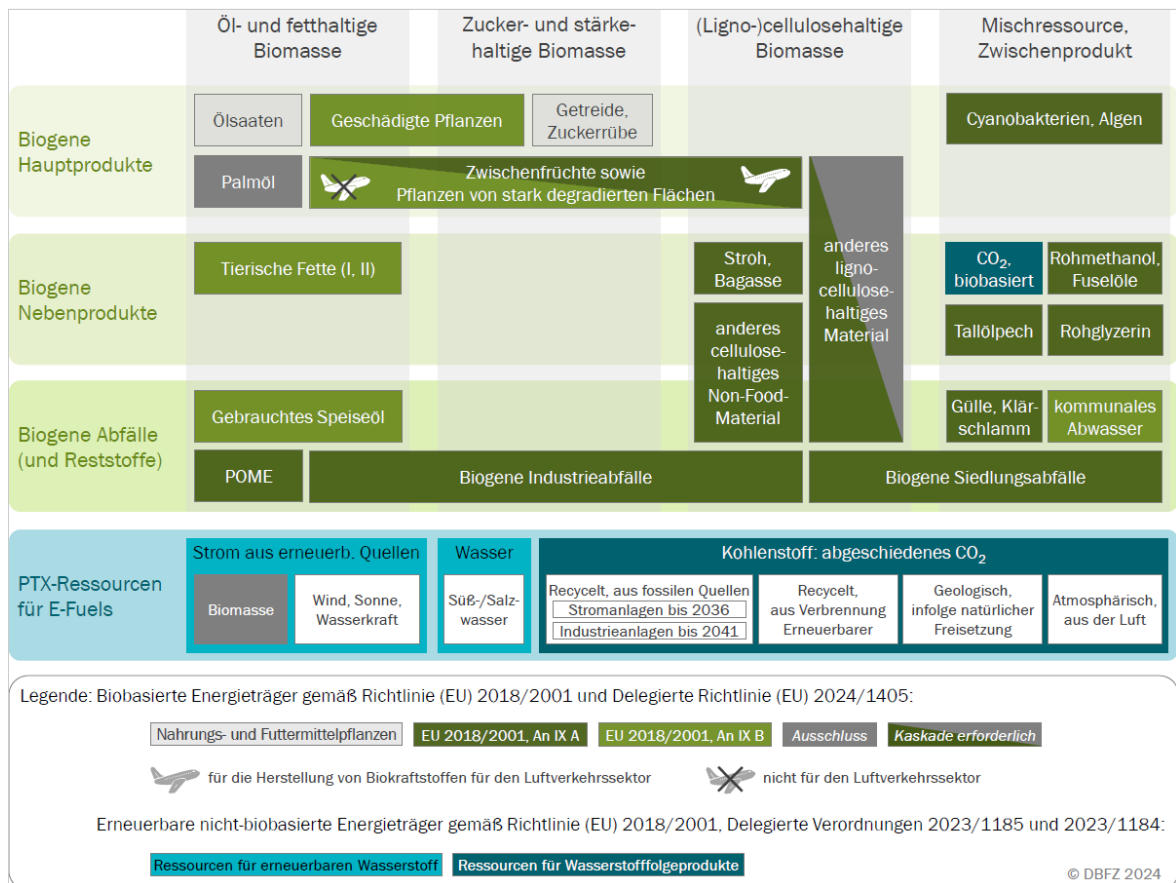


Abbildung 24: Ressourcen zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, kategorisiert gemäß rechtlichen Vorgaben. Quelle: Naumann et al. [40, 41].

7.1.2 Perspektivische Nutzungskonkurrenzen

Perspektivisch könnte es aufgrund von Nutzungskonkurrenzen zu verschiedenen sektoralen Bedarfsverschiebungen für Biomasse insgesamt und für bestimmte Einzelbiomassen (z. B. bestimmte Rest- und Abfallstoffe) kommen. Zu nennen sind u. a. folgende Beispiele:

- Wärme: Der Biomethanbedarf könnte perspektivisch aufgrund der Vorgaben gemäß Gebäudeenergiegesetz steigen [11].
- Strom: Durch die zunehmende Flexibilisierung von Biogasanlagen und die zukünftigen politischen Zielsetzungen sinkt die Biomassenutzung für Strom, gleichzeitig steigt der Anteil von biogenen Rest- und Abfallstoffen [2, 5].
- Verkehr: Gemäß den Impact Assessments der EU für ReFuel Aviation und FuelEU Maritime steigen die Bedarfe für Biomasse v. a. im Flugverkehr und der maritimen Schifffahrt [40].
- Bioenergie: Das Kaskadenprinzip der RED III könnte je nach nationaler Umsetzung die Nutzbarkeit holzartiger Biomasse für energetische Zwecke einschränken [18]. Derzeit wird holzartige Biomasse vor allem im Wärmesektor eingesetzt [2].

- Industrie (Hochtemperatur, z. B. Stahlindustrie): Die große Mehrheit der Klimaneutralitätsstudien (z. B. Ariadne, BDI, Agora) geht von steigenden Biomassebedarfen in der Industrie aus [12]. Beispielsweise weist die Studie Agora Klimaneutrales Deutschland steigende Bedarfe für den Stahlsektor aus [44].
- Chemie: Verschiedene Klimaneutralitätsstudien für den Chemiesektor zeigen wachsende Biomassebedarfe bzw. -anteile auf [34]. Zudem gibt es politische Zielsetzungen seitens der EU [21] zur Nutzungssteigerung von erneuerbarem Kohlenstoff (biogen und Direct Air Capture).
- Bau: Im Bausektor könnte der Bedarf für Holz aufgrund höherer Holzbauquoten perspektivisch zunehmen [4].
- Landwirtschaft/Pflanzenbau Torfersatz: In diesem Segment sind einerseits Bedarfe für Biokraftstoffe für land- und forstwirtschaftliche Maschinen zu berücksichtigen [35]. Zudem steigt der Bedarf für gewisse Reststoffe für die Verwendung als Torfersatzstoff aufgrund der Reduktion des Torfabbaus sowie der Torfnutzung [3].

7.1.3 Weitere globale Potenzialstudien

Methodik

Neben der globalen Meta-Potenzialstudie [31], sind zudem die Daten der globalen Meta-Potenzialstudie von MIT beziehungsweise Daehn et al. [10], mit Fokus auf Studien aus den Jahren 2011 bis 2023, dargelegt. Eine Einschränkung beider Meta-Studien besteht darin, dass keine Daten für die in dieser Analyse relevanten Zieljahre ausgewiesen werden. Aus diesem Grund wird ergänzend die Einzelstudie von Mensah et al. [38] berücksichtigt, welche globale Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe in Fünfjahresintervallen bis zum Jahr 2050 darstellt. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit wird aus den jeweiligen Studien vorzugsweise mittlere bzw. Business-As-Usual-Szenarien (BAU) ausgewählt, wobei vorhandene Bandbreiten in Form von Minimal- und Maximalwerten zusätzlich berücksichtigt werden. Die in den Studien ausgewiesenen Biomassen werden zudem zu übergeordneten Biomassekategorien zusammengeführt. Die zwei Meta-Studien zu globalen Biomassepotenzialen weisen keine einheitlichen Potenzialebenen aus, sondern einen Mix verschiedener Potenzialebenen. Für die Meta-Studie von Daehn et al. [10] wird die genaue Anzahl der berücksichtigten Studien nicht explizit ausgewiesen; die Potenzialebene für die analysierten Studien wird als Bioenergiepotenzial beschrieben, wobei es sich wahrscheinlich auch hier um einen Mix verschiedener Potenzialebenen handelt. Die Studie von Mensah et al. [38] weist Bioenergiepotenziale aus, wenngleich beschrieben wird, dass sich diese auf nachhaltige technische Potenziale beziehen. Zudem werden diese in zwei Szenarien dargelegt - für eine entsprechende Vergleichbarkeit mit den Daten von Irena et al. [31] und Daehn et al. [10] wird aus der Studie von Mensah et al.

[38] das BAU-Szenario verwendet. Für das Zieljahr 2027, das in den Studien nicht explizit ausgewiesen ist, erfolgt für Mensah et al. [38] eine Abschätzung auf Basis einer linearen Interpolation der jeweiligen Biomasse-Unterkategorien. Die Daten der Studie von Daehn et al. [10] beziehen sich dagegen vor allem auf das Jahr 2050.

Ergebnisse

Zusätzlich zu den Ausführungen in Kapitel 3.2.2, legt die Meta-Studie von Daehn et al. [10] Biomassepotenziale (Arithm. Mittelwert, Fokus Bioenergiepotenziale) von 3.509 Mtoe (ohne Energiepflanzen: 1.240 Mtoe) für 2050 dar (siehe Abbildung 25). Die Bioenergiepotenziale für biogene Rest- und Abfallstoffe der Studie von Mensah et al. [38] weisen im Zeitraum von 2020 bis 2050 rund 2.139 - 2.853 Mtoe im BAU-Szenario aus. Die Potenziale von tierischen und menschlichen Exkrementen wurden in dieser Studie nicht in Primärenergie, sondern in Biogaspotenzial inklusive Konversion ausgewiesen.

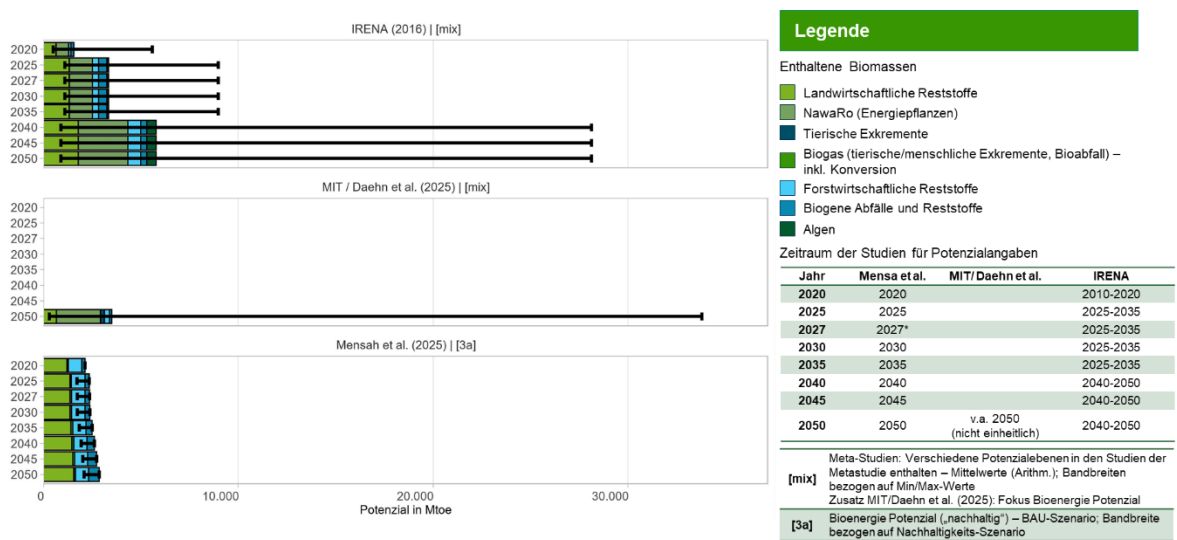


Abbildung 25: Globale Biomassepotenziale im zeitlichen Verlauf (Mittelwerte und Min-/Max-Werte) gemäß unterschiedlichen Studien.

Insbesondere die Meta-Studien von Irena et al. [31] und Daehn et al. [10] weisen extrem hohe Bandbreiten (Min-/Max-Werte) auf. Vor allem für Energiepflanzen sind diese Bandbreiten je nach den getroffenen Annahmen für entsprechende Anbauflächen sehr hoch. Die Bandbreiten der einzelnen Biomassekategorien der zitierten Studien sind in Abbildung 26 visualisiert.

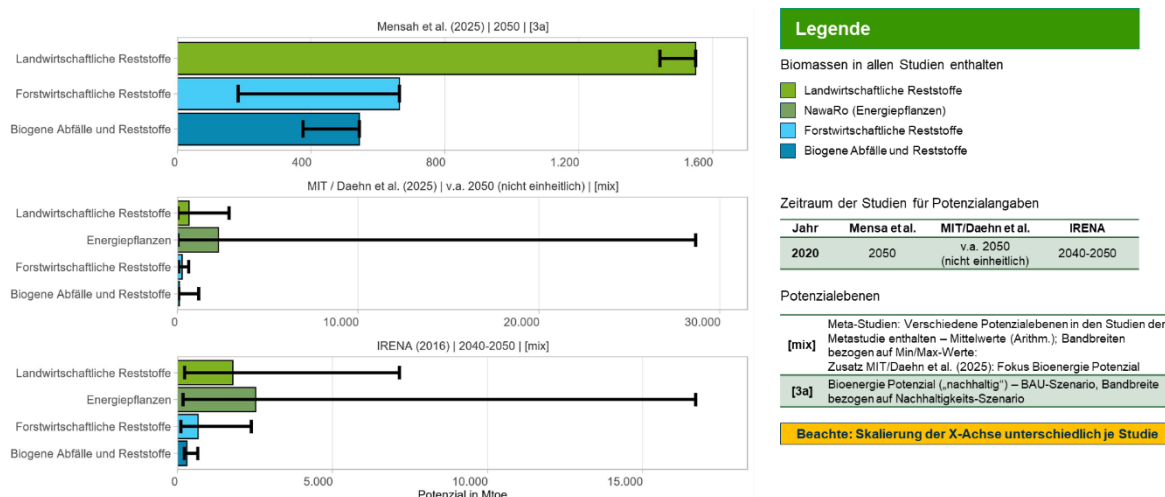


Abbildung 26: Globale Biomassepotenziale nach Biomassekategorien (Mittelwerte und Min-/Max-Werte) gemäß der unterschiedlichen Studien.

7.2 Konversion zu Biokraftstoffen

7.2.1 Abzüge Bioenergiepotenzial für andere Sektoren

Menge der Abzüge & Methodik

Nicht nur der Straßenverkehr steht vor der Herausforderung der Transformation hin zu erdölfreien Energieträgern. Auch andere Sektoren (Industrie, Energie, Haushalte, Landwirtschaft, Luft- und Schifffahrt) haben einen steigenden Bedarf an Bioenergie, der in dieser Studie berücksichtigt wird und das für den Straßenverkehr zur Verfügung stehende Bioenergiepotenzial entsprechend verringert. Zur Feststellung dieser Bedarfe an Rohstoffen zur Herstellung von Bioenergie – flüssig, fest, gasförmig - werden Impact Assessments der EU-Kommission herangezogen: Impact Assessment (2020) [19] bzgl. der Anpassung der RED I (Ergebnis = RED II) und Impact Assessment (2021) [20] zur Anpassung der RED II (Ergebnis = RED III). In Abbildung 27 sind diese Bedarfe im Mittelwert für die Jahre 2030, 2035 und 2040 dargestellt und zeigen Werte in Höhe von 149 Mtoe (2030), 188 Mtoe (2035) und 228 Mtoe (2040). Diese werden entsprechend vom jeweils ermittelten Bioenergiepotenzial, das für die Umwandlung zu fortschrittlichen Biokraftstoffen für den Straßenverkehr zur Verfügung stehen kann, subtrahiert.

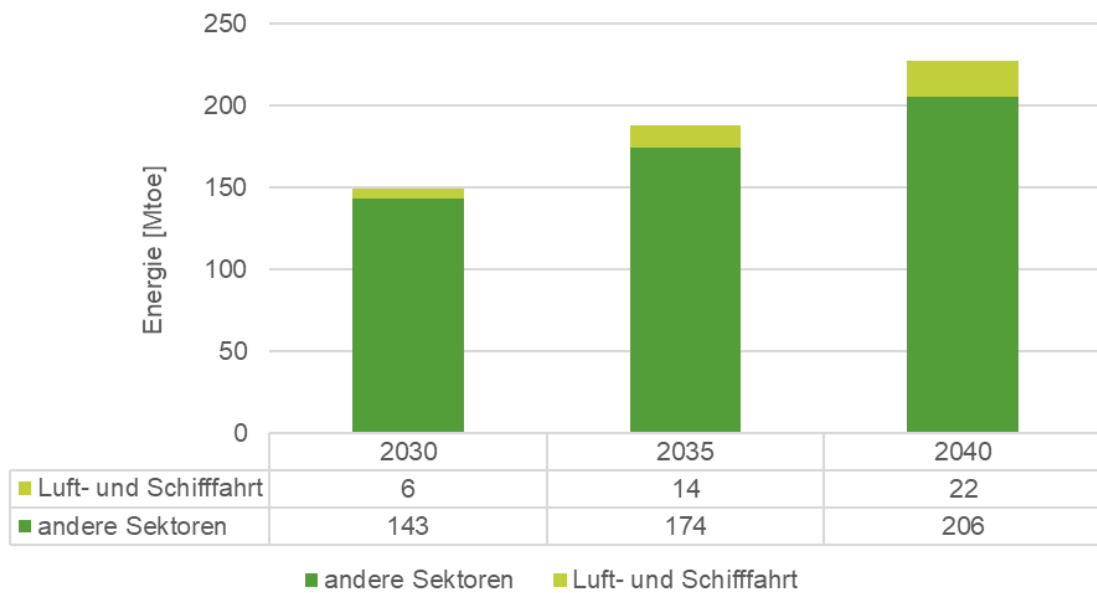


Abbildung 27: Bedarf an Rohstoffen zur Herstellung von fortschrittlicher Bioenergie - fest, flüssig, gasförmig - der anderen Sektoren (Industrie, Energie, Haushalte, Landwirtschaft) sowie Luft- und Schifffahrt.

Um diese Werte ermitteln zu können, müssen wie erwähnt zwei Impact Assessments unterschiedlichen Datums herangezogen werden. Die Graphen aus diesen Assessments werden für eine bessere Lesbarkeit und um die dahinterstehenden Zahlenwerte abschätzen zu können nachgebildet. Das Impact Assessment (2021) zeigt in Abbildung 28 eine Aufsplittung in die Bedarfe an finaler Bioenergie für den gesamten Transportsektor (Straße, Luft, Wasser) sowie den der anderen Sektoren. Diese Abbildung wird genutzt, um den aktuell von der EU-Kommission prognostizierten Bedarf des gesamten Transportsektors zu ermitteln. Hierzu wird der Mittelwert der verschiedenen Szenarien genutzt, wobei das Szenario REF2020 ausgeklammert wird, da es nur die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Assessments gültigen Anforderungen des EU-Rechts widerspiegelt, nicht aber ambitionierte Ziele wie in den anderen Szenarien. Dies ist insbesondere im Bedarf im REF2020 Szenario für 2050 in Abbildung 28 zu erkennen.

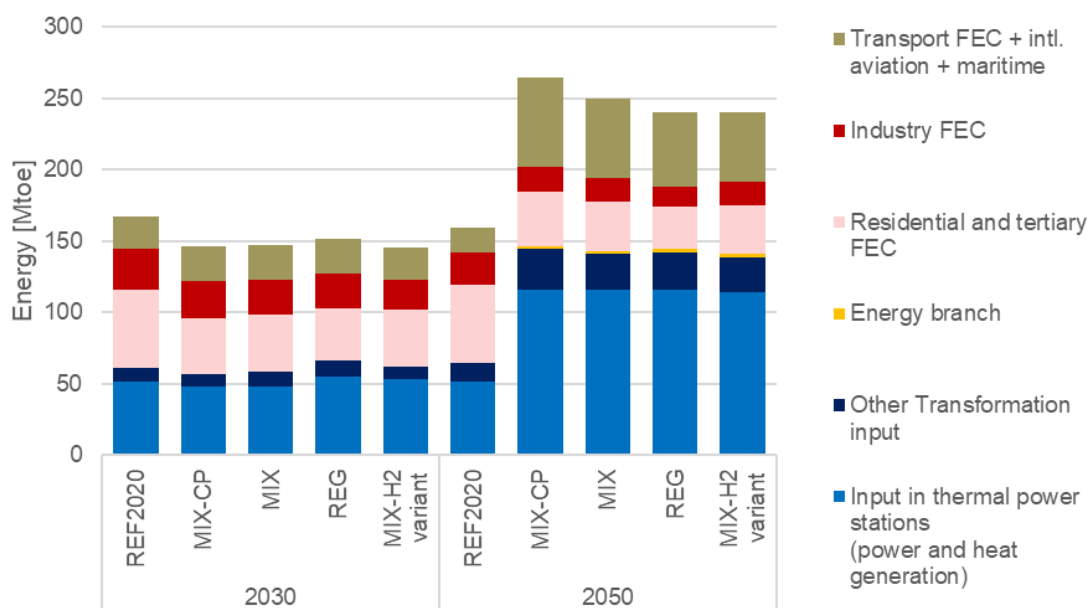


Abbildung 28: Bedarf an finaler Bioenergie der verschiedenen Sektoren aus dem Impact Assessment (2021).

Um nun den Split des Transportsektors in Straße / Luft / Wasser zu erhalten, wird das Impact Assessment (2020) herangezogen, das diese Aufteilung in Abbildung 29 aufzeigt und dessen Verhältnis genutzt: Für 2030 beträgt der Bedarf für Luft- und Schifffahrt 22% am Bedarf des Transportsektors und für 2050 49%.

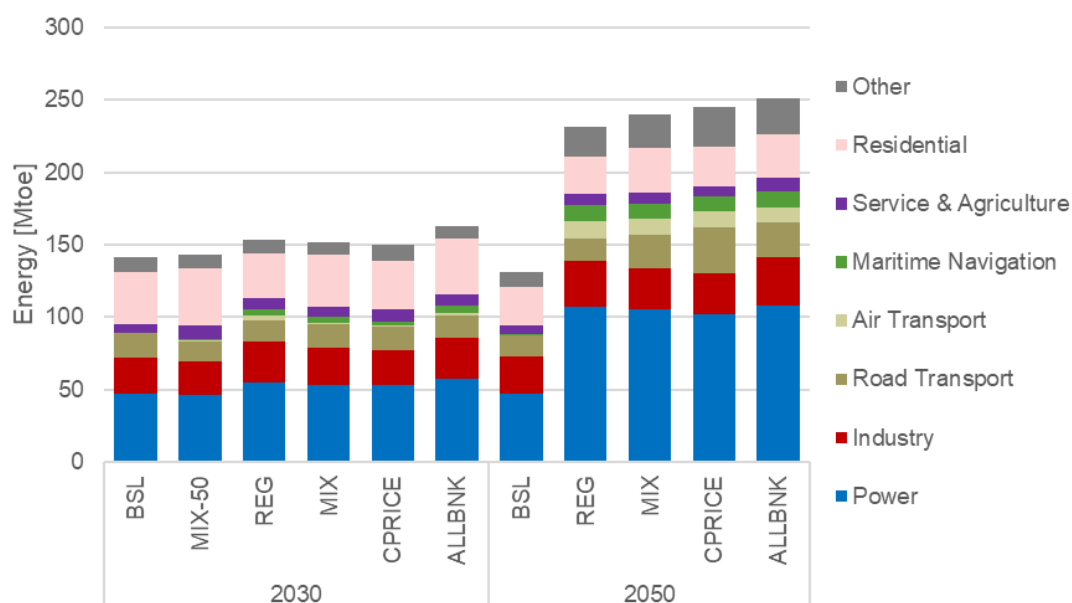


Abbildung 29: Bedarf an finaler Bioenergie der verschiedenen Sektoren aus dem Impact Assessment (2020) mit zusätzlicher Aufspaltung des Transportsektors in Straße / Luft / Wasser.

Somit konnte errechnet werden, dass Luft- und Schifffahrt im Jahr 2030 im Mittel 5 Mtoe finaler Bioenergie benötigen, in 2050 27 Mtoe. Auch hier wird der Mittelwert aus den

verschiedenen Szenarien herangezogen und das Referenz-Szenario, hier „BSL“ (Baseline), ausgeklammert. Die Werte für die Jahre 2035 und 2040 wurden per linearer Interpolation ermittelt.

Um nun aus dem Bedarf an finaler Bioenergie den Bedarf an Rohstoffen für alle Sektoren zu erhalten, wird die im Impact Assessment (2020) genutzte Umwandlungseffizienz angewendet (Verhältnis zwischen Abbildung 30 und Abbildung 29), die in 2030 86% und in 2050 72% beträgt.

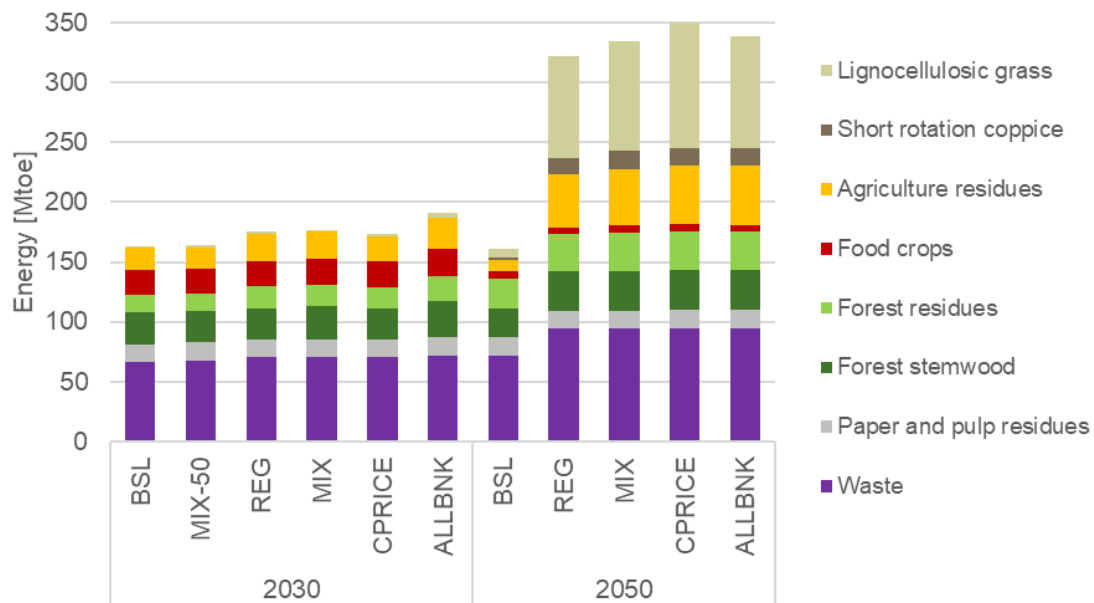


Abbildung 30: Bedarf an Rohstoffen zur Erzeugung der Bioenergie in Abbildung 29 aus dem Impact Assessment (2020).

Die generell hohe Effizienz ergibt sich aus der zum Teil direkten Nutzung der Rohstoffe zur Energiegewinnung ohne Konversationsverluste, wie z.B. bei der Verbrennung von Holzpellets. Der Rückgang der Effizienz im Laufe der Jahre rührt von der Zunahme an Rohstoffen her, die nicht uneingeschränkt zur Energiegewinnung ohne Energieverlust geeignet sind, wie z.B. lignozellulosehaltige Pflanzen. Somit konnte aus dem Bedarf an finaler Bioenergie der Bedarf an Rohstoffen zurückgerechnet und für die weiteren Berechnungen herangezogen werden (Abbildung 27).

Verteilung der Abzüge auf die Feedstockkategorien

Die Abzüge für andere Industrien werden sequenziell und je nach Rohstoffkategorie unterschiedlich auf die Potenziale angewandt. Dies richtet sich nach einer groben Einschätzung der Eignung für die hier betrachteten Verfahren, der möglichen Lokalisierung und bestehenden Nutzung. Die Abzüge für andere Verkehrsträger werden anschließend pauschal anteilig von jedem Potenzial abgezogen, da angenommen wird, dass sie

grundsätzlich in die gleichen Prozessketten eingehen, aber die erzeugten Kraftstoffe nicht für den hier betrachteten Straßenverkehr zur Verfügung stehen.

Die sequenziellen, individuellen Abzüge für andere Industrien begründen sich wie folgt für die jeweiligen Rohstoffkategorien:

Primär – Holz- und Forstwirtschaftliche Nebenprodukte

Hierbei handelt es sich um Verschnitt aus der Pflanzenpflege. Das Material ist eher feucht und fällt direkt am Standort der jeweiligen Pflanze an. Das Material ist eher weniger für die betrachteten Verfahren geeignet und eher dezentral lokalisiert, allerdings ist auch keine prominente Konkurrenznutzung bekannt. Dem Potenzial wird daher ein mittlerer Abzug von 20% je Sequenz zugewiesen.

Sekundär – Holz- und Forstwirtschaftliche Nebenprodukte

Hierbei handelt es sich um Reststoffe der Holzverarbeitenden Industrie, also z.B. Sägespäne, Verschnitt, Altholz usw. Das Material eignet sich gut für die Konversionsverfahren und fällt eher zentral an, ist aber auch einer starken Konkurrenznutzung, insbesondere zur Wärmegewinnung unterlegen (z.B. Holzpellets). Dem Potenzial wird daher ein mittlerer Abzug von 20% je Sequenz zugewiesen.

Reststoffe aus der Nahrungsmittelindustrie

Hierbei handelt es sich um eine sehr diverse Kategorie, die potenziell sehr unterschiedliche Stoffe umfasst. Es kann angenommen werden, dass es sich in der Regel um Material mit hohem Wassergehalt handelt, das sich weniger für die hier betrachteten Konversionsverfahren eignet. Dafür fällt das Material mindestens teilweise recht zentral an. Die Nutzungskonkurrenz kann nicht abgeschätzt werden. Insgesamt wird dem Potenzial daher ebenfalls ein mittlerer Abzug von 20% je Sequenz zugewiesen.

Landwirtschaftliche Nebenprodukte

Hier gilt das Gleiche wie für die Reststoffe aus der Nahrungsmittelindustrie. Im Unterschied dazu wird angenommen, dass die Wassergehalte geringer sind, das Material dafür aber weniger zentral anfällt. Ebenso wird angenommen, dass weniger Konkurrenznutzung besteht. Dem Potenzial wird daher ein geringerer Abzug von 15% je Sequenz zugewiesen.

Stroh

Stroh eignet sich gut für die hier diskutierten Verfahren, fällt aber eher dezentral (auf landwirtschaftlichen Nutzflächen) an. Außerdem ist Stroh einer starken Konkurrenznutzung unterworfen. Unter der Prämisse eines freien Marktes kann allerdings angenommen werden, dass die verfügbaren Mengen sich nach der Zahlungsbereitschaft richten. Ebenfalls ist eine Zweitnutzung denkbar, beispielsweise von als Einstreu genutztem Stroh. Dem Potenzial wird daher ein niedriger Abzug von 10% je Sequenz zugewiesen.

Tierische Exkremente

Tierische Exkremente sind aufgrund des hohen Wassergehalts eher ungeeignet für die verwendeten Verfahren. Außerdem unterliegen sie bereits der Nutzung in Biogasanlagen, wofür sie ein idealer Feedstock sind. Es wird daher davon ausgegangen, dass das Potenzial hier nicht zur Verfügung steht, sofern kein Überangebot besteht. Dem Potenzial wird daher ein maximaler Abzug von 100% in der ersten Sequenz zugewiesen.

NawaRo

Genauer handelt es sich hierbei um NawaRo von marginalen Flächen sowie Zwischen- und Deckfrüchte, wie von der RED Annex IX A (Flugsektor) bzw. B (Non-Flugsektor) gefordert. Es ist anzunehmen, dass es sich, neben einem geringen Anteil Ölpflanzen (wie bereits oben diskutiert), dabei überwiegend um „Energiepflanzen“ handelt. Diese eignen sich, nach Trocknung, gut und da die Potenziale bisher nicht bestehen, sind sie auch keiner Konkurrenznutzung unterlegen. Es kann im Gegenteil davon ausgegangen werden, dass diese Potenziale nur aufgrund der Rohstoffnachfrage für erneuerbare Kraftstoffe gehoben werden. Dem Potenzial wird daher ein niedriger Abzug von 10% je Sequenz zugewiesen.

Siedlungsabfälle

Siedlungsabfälle, bzw. der biogene Anteil davon, eignen sich prinzipiell für eine Vergasung, sind aber technisch herausfordernd. Dafür fallen sie zentral an. Die Nutzungskonkurrenz ist schwer abzuschätzen. Sofern der biogene Anteil getrennt gesammelt wird (wie in D) ist davon auszugehen, dass er in Biogas- oder Kompostanlagen genutzt wird. Wird der biogene Anteil nicht getrennt gesammelt, ist die technische Herausforderung umso größer. Dem Potenzial wird daher ein erhöhter Abzug von 25% je Sequenz zugewiesen.

Stammholz/Derbholz

Die Kategorie eignet sich prinzipiell für die hier angedachte Verarbeitung, fällt zwar eher dezentral an, aber es bestehen etablierte Versorgungswege. Allerdings ist, abgesehen von einer hohen anzunehmenden Konkurrenznutzung zur Wärmebereitstellung, unklar,

inwiefern das Potenzial den Kriterien der RED entspricht. Dem Potenzial wird daher ein erhöhter Abzug von 25% je Sequenz zugewiesen.

UCO

UCO eignet sich (nach Aufbereitung) hervorragend für die Herstellung von HVO/HEFA. Das Potenzial wird insbesondere aufgrund der Nachfrage danach gehoben. Es wird daher davon ausgegangen, dass das Potenzial vollständig für die Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe zur Verfügung steht und entsprechend keine Abzüge für andere Industrien vorgenommen.

7.2.2 Aufschläge bei den potenziellen Kraftstoffmengen

Da sich die Quoten auf den Gesamtenergiebedarf (flüssig, gasförmig, elektrisch) des Verkehrssektors beziehen, ergeben sich für die Bedarfsszenarien More-Molecule und Max-Electron [47] die in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellten Aufschläge.

Tabelle 5: Aufschläge für konventionelle Biokraftstoffe und RFNBOs (Max-Electron).

Max-Electron	Typ	Quote [%]	Gesamtbedarf [Mtoe]	Gesamtmenge [Mtoe]	Fraktion	Menge [Mtoe]
2030	RFNBO	1,2	265,74	3,19	Naphtha	3,19
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		14,62	Naphtha	7,31
					Mitteldestillat	7,31
2035	RFNBO	2,5	207,34	5,18	Naphtha	5,18
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		11,4	Naphtha	5,70
					Mitteldestillat	5,70
2040	RFNBO	8,0	157,81	12,62	Naphtha	12,62
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		8,68	Naphtha	4,34
					Mitteldestillat	4,34

Tabelle 6: Aufschläge für konventionelle Biokraftstoffe und RFNBOs (More-Molecule).

More-Molecule	Typ	Quote [%]	Gesamtbedarf [Mtoe]	Gesamtmenge [Mtoe]	Fraktion	Menge [Mtoe]
2030	RFNBO	1,2	269,59	3,24	Naphtha	3,24
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		14,82	Naphtha	7,41
					Mitteldestillat	7,41
2035	RFNBO	2,5	222,52	5,56	Naphtha	5,56
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		12,24	Naphtha	6,12
					Mitteldestillat	6,12
2040	RFNBO	8,0	177,94	14,24	Naphtha	14,24
					Mitteldestillat	-
	1st Gen	5,5		9,78	Naphtha	4,89
					Mitteldestillat	4,89

Literaturverzeichnis

- [1] ACEA. Vehicles on European Roads. January 2025.
- [2] Beck-O'Brien M., Bringezu S., Banse M., Barrelet J., Bezama A., Bösch B., Brüning S., Bührlen B. Monitoring the German Bioeconomy: Status, performance, trends and implications for sustainable development; 2024.
- [3] BMLEH. Torffrei gärtnern, Klima schützen - Die Torfminderungsstrategie des BMEL; 2022.
- [4] BMLEH. Handreichung Holzbauinitiative. Strategie der Bundesregierung zur Stärkung des Holzbaus als ein wichtiger Betiag für ein klimagerechtes und ressourceneffizientes Bauen; 2023.
- [5] BMW. Aktualisierung des integrierten nationalen Energie- und Klimaplan; 2024.
- [6] Böhm C., Kanzler M., Pecenka R. Untersuchungen zur Ertragsleistung (Land Equivalent Ratio) von Agro- forstsystemen. Cottbus; 2020.
- [7] Brosowski A., Krause T., Mantau U., Mahro B., Noke A., Richter F. Arbeitsgruppe Biomassereststoffmonitoring (AG BioRestMon). Schlussbericht. Leipzig; 2019.
- [8] Bundesregierung. Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. Drucksache 21/4083; 11.02.2026.
- [9] Conservation International. Trends.Earth User Guide. Land degradation and SDG 15.3.1. https://docs.trends.earth/en/latest/for_users/features/landdegradation.html.
- [10] Daehn K., Evan C., Florian A. Global Bioenergy Availability; 2025.
- [11] dena. Wie entwickelt sich der Biomethanbedarf auf Basis des Gebäudeenergiegesetzes? Regulatorische Anforderungen und potenzielle Entwicklung des Biomethanbedarfs bis 2040; 2024.
- [12] dena. Gezielte Nutzung von Biomasse für eine klimaneutrale und wettbewerbsstarke Industrie; 2025.
- [13] Elbersen B., van Eupen M., Hazeu G., Meijinger W., Mantel S. Marginal land Classification and Information System (MIDAS- MLCIS 1) for low ILUC feedstock and current and future expecta- tions on soil erosion, water stress and ecosystem services condi- tions; 2023.
- [14] Elbersen B., van Eupen. E., Mantel S., Verzandvoort S., Boogaard H., Macher S., Cicareli T., Elbersen W., Bai Z., Iqbal Y., Cossel M. von, McCallum I., Carrasco J., Ciria Ramos C., Monti A., Scordia D., Eleftheriadis I. D2.6 Methodological approaches to identify and map marginal land suitable for industrial crops in Europe: Zenodo; 2018.
- [15] Elbersen B., Verzandvoort S., Panoutsou C., Alexopoulou E. D 2.2 Options to grow crops on unused, abandoned and/or severely degraded lands; 2022.

- [16] *E-Moghaddam M., Dahmen N., Santo U., Sauer J.* Gasoline Synthesis from Biomass-Derived Syngas Comparing Different Methanol and Dimethyl Ether Pathways by Process Simulation, Based on the Bioliq Process. *Energy & Fuels*. 2024; 38: 4229–4243.
- [17] *EU.* Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. REDII; 2018.
- [18] *EU.* Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates; 2023.
- [19] *EU COM.* COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people; 17.09.2020.
- [20] *EU COM.* COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT REPORT Accompanying the Proposal for a Directive of the European Parliament and the Council amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652; 14.07.2021.
- [21] *EU COM.* Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council. Sustainable Carbon Cycles; 15.12.2021.
- [22] *EU COM.* Durchführungsverordnung (EU) 2022/996 über Vorschriften für die Überprüfung in Bezug auf die Nachhaltigkeitskriterien und die Kriterien für Treibhausgaseinsparungen sowie die Kriterien für ein geringes Risiko indirekter Landnutzungsänderungen; 2022.
- [23] *EU COM.* Commission Delegated Directive (EU) 2024/1405 amending Annex IX to Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council as regards adding feedstock for the production of biofuels and biogas; 2024.
- [24] *European Environment Agency.* CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly - version 2020_20u1, May 2020: European Environment Agency; 2019.

-
- [25] *European Environment Agency*. Climate and Energy in the EU. Real-world CO2 emissions from cars and vans. <https://climate-energy.eea.europa.eu/topics/transport/real-world-emissions/data>.
 - [26] *Eurostat*. New passenger cars by type of motor energy; 2025.
 - [27] *Eurostat*. New passenger cars by type of motor energy and engine size: Eurostat; 2025.
 - [28] *Eurostat*. New zero-emission vehicles by type of vehicle and type of motor energy; 2025.
 - [29] *Eurostat*. Passenger cars in the EU. New passenger cars by type of engine fuel, 2024. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU.
 - [30] *Hoefnagels R., Kwakernaak S., van der Hilst F., Junginger M., Vera I., Neokosmidis T.* Sustainable biofeedstock supply chains for advanced biofuels in Europe towards 2050; 2025.
 - [31] *IRENA*. Innovation Outlook: Advanced Liquid Biofuels; 2016.
 - [32] *Kaltschmitt M., Hartmann H., Hofbauer H.* Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg; 2016.
 - [33] *KIT*. Auswertung der Betriebsdaten der bioliq Pilotanlage. 29.03.2023.
 - [34] *Kloo Y., Scholz A., Theisen S.* Towards a net-zero chemical industry – a meta-analysis of recent scenario studies and roadmaps. Results from the ongoing research project GreenFeed.; 2023.
 - [35] *KTBL*. Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen; 2023.
 - [36] *Lavalle C.* OUTPUT - Land-use/cover maps (LUISA Platform REF2014). European Commission, Joint Research Centre; 2014.
 - [37] *LFL*. Agroforstsysteme in Bayern; 2025.
 - [38] *Mensah T. N. O., Oyewo A. S., Breyer C.* The global sustainable bioenergy potential until 2050 in global-national resolution,; 2025.
 - [39] *Metzger M. J.* The Environmental Stratification of Europe; 2018.
 - [40] *Naumann K., Cyffka K.-F., Costa de Paiva G., Nieß S., Neuling U., Zitscher T.* Ressourcen und ihre Mobilisierung. Leipzig; 2025.
 - [41] *Naumann K., Cyffka K.-F., Karras T.* Hintergrundpapier. Bio2x | Vergleichende Analyse zu nachhaltigen Biomasse- und Substitutionspotenzialen. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Statements/Hintergrundpapier_Bio2x_Okt_2024.pdf.
 - [42] *NN*. Designstudie MtG und MtJ; 28.06.2024.

- [43] *Panoutsou C., Maniatis K.* Sustainable biomass availability in the EU, to 2050. Ref: RED II Annex IX A/B. London; 2021.
- [44] *Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut.* Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klima- ziele schon vor 2050 erreichen kann. Langfassung im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende; 2021.
- [45] *Reinhardt J., Hilgert P., Cossel M. von.* Yield performance of dedicated industrial crops on low-temperature characterized marginal agricultural land in Europe – a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining.* 2022; 16: 609–622.
- [46] *Ruiz P., Sgobbi A., Nijs W. N., Thiel C., Dalla Longa F., Kober T.* The JRC-EU-TIMES model. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries; 2015.
- [47] *S&P Global Commodity Insights.* Study on the potential evolution of Refining and Liquids Fuel production in Europe; 2025.
- [48] *Searle S. Y., Malins C. J.* Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States; 2016.
- [49] *The Engineering ToolBox.* Higher Calorific Values of Common Fuels: Reference & Data. https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html.
- [50] *Van Dyk S., Saddler J.* Progress in the Commercialization of Biojet / Sustainable Aviation Fuels: Technologies, potential and challenges; 2021.
- [51] *Vera I., Hoefnagels R., Junginger M., van der Hilst F.* 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. *GCB Bioenergy.* 2021; 13: 1425–1447.
- [52] *Wageningen.* Development of outlook for the necessary means to build industrial capacity for drop-in advanced biofuels. Annex 2: Report on task 2. Luxembourg: Publications Office; 2024.
- [53] *Winberg J., Ekroos J., Eklundh L., Smith H. G.* Constraints on the availability of marginal land for bioenergy production in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy.* 2024; 190: 107421.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile der Feedstock-Kategorien am Bioenergiepotenzial im Mid-Szenario für 2030.	4
Abbildung 2: Abdeckung des gesamten Kraftstoffbedarfs des Straßenverkehrs durch erneuerbare Kraftstoffe.	6
Abbildung 3: Übersicht der Methodik für die abschließende vergleichende Analyse zwischen verfügbaren Mengen an fortschrittlichen, flüssigen Kraftstoffen und dem Bedarf im Straßenverkehr. DK = Dieselmkraftstoff, OK = Ottokraftstoff. 1 = Feedstockpotenzial Mid-Szenario, 2 = Feedstockpotenzial High-Szenario, 3 = Max-Mitteldestillat, 4 = Mehr-Naphtha, 5 = Max-Electron, 6 = More-Molecule.	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung der genutzten Szenarien und wie sie in der vergleichenden Analyse gepaart werden. DK = Dieselmkraftstoff, OK = Ottokraftstoff. 1 = Feedstockpotenzial Mid-Szenario, 2 = Feedstockpotenzial High-Szenario, 3 = Max-Mitteldestillat, 4 = Mehr-Naphtha, 5 = Max-Electron, 6 = More-Molecule.	13
Abbildung 5: Hierarchie und Überschneidung unterschiedlicher Biomassepotenzialebenen sowie Zuordnung der untersuchten Studien für die EU; Abbildung basierend auf Naumann et al. [40, 41].	15
Abbildung 6: Annahmen für Vegetationszonen für Zwischen- und Deckfrüchte; Eigene Abbildung basierend auf [39, 52].	17
Abbildung 7: Biomassepotenziale (Mittelwerte und Szenario-Bandbreiten) unterschiedlicher Studien für die EU.	20
Abbildung 8: Globale Biomassepotenziale (Mittelwert und Max-Wert) [31].	21
Abbildung 9: Biomassepotenziale (Mittelwerte und Szenario-Bandbreiten) von Zwischen- und Deckfrüchten, Non-Food Crops von degradierten und marginalen Flächen sowie von Agroforst; basierend auf [52, 51].	22
Abbildung 10: Bioenergiepotenzial im Mid- und High-Szenario, das für die weiteren Analysen der vorliegenden Studie verwendet wird.	23
Abbildung 11: Anteil der Feedstock-Kategorien am Bioenergiepotenzial im Mid- und High-Szenario über die Jahre 2030 - 2040.	24
Abbildung 12: Gesamte und effektive Biomassepotenziale.	30
Abbildung 13: Kraftstoffpotenziale EU inklusive Aufschläge, Max-Mitteldestillat-Szenario.	32
Abbildung 14: Kraftstoffpotenziale EU inklusive Aufschläge, Mehr-Naphtha-Szenario.	33
Abbildung 15: Flottenentwicklung nach MM- und ME-Flottenszenario.	35

Abbildung 16: Benötigte Kraftstoffmengen für die vCNF-Flotte im MM-Szenario (links) und ME-Szenario (rechts).....	37
Abbildung 17: Bedarf der Gesamtflotte des ME- und MM-Szenarios über die Jahre 2024 - 2040.	38
Abbildung 18: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im DK-Mid-Szenario. ...	39
Abbildung 19: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im OK-Mid-Szenario. ...	40
Abbildung 20: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im DK-High-Szenario. ...	41
Abbildung 21: Gegenüberstellung der resultierenden Mengen CNF und der Kraftstoffbedarfe der Gesamtflotte für die Jahre 2030 - 2040 im OK-High-Szenario. ...	41
Abbildung 22: Überblick über den Zusammenhang zwischen den Mengen resultierender CNF und dem Bedarf in den verschiedenen Szenarien mit Fokus auf Diesel in der Konversion.....	42
Abbildung 23: Überblick über den Zusammenhang zwischen den Mengen resultierender CNF und dem Bedarf in den verschiedenen Szenarien mit Fokus auf Otto in der Konversion.....	42
Abbildung 24: Ressourcen zur Produktion erneuerbarer Kraftstoffe, kategorisiert gemäß rechtlichen Vorgaben. Quelle: Naumann et al. [40, 41].	45
Abbildung 25: Globale Biomassepotenziale im zeitlichen Verlauf (Mittelwerte und Min-/Max-Werte) gemäß unterschiedlichen Studien.	47
Abbildung 26: Globale Biomassepotenziale nach Biomassekategorien (Mittelwerte und Min-/Max-Werte) gemäß der unterschiedlichen Studien.	48
Abbildung 27: Bedarf an Rohstoffen zur Herstellung von fortschrittlicher Bioenergie - fest, flüssig, gasförmig - der anderen Sektoren (Industrie, Energie, Haushalte, Landwirtschaft) sowie Luft- und Schifffahrt.....	49
Abbildung 28: Bedarf an finaler Bioenergie der verschiedenen Sektoren aus dem Impact Assessment (2021).....	50
Abbildung 29: Bedarf an finaler Bioenergie der verschiedenen Sektoren aus dem Impact Assessment (2020) mit zusätzlicher Aufsplittung des Transportsektors in Straße / Luft / Wasser.....	50
Abbildung 30: Bedarf an Rohstoffen zur Erzeugung der Bioenergie in Abbildung 29 aus dem Impact Assessment (2020).	51