

Abschlussbericht

Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT)

Martin Banse¹, David Kilian¹, Holger Weimar², Susanne Iost², Christian Morland², Sebastian Glasenapp², Dominik Jochem², Jörg Schweinle², Romy Brödner³, Karl-Friedrich Cyffka³, Stefan Majer³, Sören Richter³, Harry Schindler³, Nora Szarka³, Matthias Jordan⁴

¹ Thünen-Institut für Marktanalyse

² Thünen-Institut für Waldwirtschaft

³ DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH

⁴ UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH

Auftraggeber: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
Dr. Hans-Jürgen Froese
Referat 525
Markgrafenstraße 58
10117 Berlin

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

Dr. Romy Brödner
Tel.: +49 (0)341 2434-613
E-Mail: romy.broedner@dbfz.de

Prof. Dr. Martin Banse
Tel.: +49 (0)531 596-5302
E-Mail: martin.banse@thuenen.de

Dr. Holger Weimar
Tel.: +49 (0)40 73962-314
E-Mail: holger.weimar@thuenen.de

Dr. Jörg Schweinle
Tel.: +49 (0)40 73962-305
E-Mail: joerg.schweinle@thuenen.de

Dr. Matthias Jordan
Tel.: +49 (0)341 2434-590
E-Mail: matthias.jordan@ufz.de

Erstelldatum: 29.09.2023

Projektnummer Auftraggeber: 2223NR002X

Gesamtseitenzahl: 113

Keywords: BEPASO, BenOpt, Bioenergie, Biomasse, Forstwirtschaft, Landwirtschaft, Modell, Nachfrage, Nutzung, Potenziale, Reststoffe

Zitierempfehlung: Banse, M.; Kilian, D.; Weimar, H.; Iost, S.; Morland, C.; Glasenapp, S.; Jochem, D.; Schweinle, J.; Brödner, R.; Cyffka, K.-F.; Majer, S.; Richter, S.; Schindler, H.; Szarka, N.; Jordan, M. (2023): Abschlussbericht Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT). Leipzig. DOI: [10.48480/yrhv-pv17](https://doi.org/10.48480/yrhv-pv17).

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------------------|--|------------|
| 1 | Hintergrund und Ziel | 4 |
| 2 | Arbeitspaket 1..... | 5 |
| 2.1 | Status quo land- und forstwirtschaftlicher Flächen in Deutschland | 5 |
| 2.1.1 | Waldfläche in Deutschland..... | 5 |
| 2.1.2 | Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland..... | 9 |
| 2.2 | Status quo der Biomasseverfügbarkeit..... | 25 |
| 2.2.1 | Holzbiomasse sowie Rinde..... | 25 |
| 2.2.2 | Landwirtschaftliche Biomasse..... | 27 |
| 2.2.3 | Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe | 30 |
| 2.3 | Trends und Entwicklungen der Flächen- und Biomasseverfügbarkeiten..... | 37 |
| 2.3.1 | Entwicklung der Waldfläche..... | 37 |
| 2.3.2 | Holzbiomasse sowie Rinde..... | 37 |
| 2.3.3 | Entwicklung der landwirtschaftlichen Biomasseverfügbarkeit in den BEPASO-Szenarien..... | 46 |
| 2.3.4 | Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe | 47 |
| 3 | Arbeitspaket 2..... | 51 |
| 3.1 | Status quo der Biomassenutzung in Deutschland | 51 |
| 3.1.1 | Holzbiomasse sowie Rinde..... | 51 |
| 3.1.2 | Landwirtschaftliche Biomasse..... | 56 |
| 3.1.3 | Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe | 56 |
| 3.2 | Trends der Biomassenachfrage..... | 59 |
| 3.2.1 | Holzbiomasse sowie Rinde..... | 59 |
| 3.2.2 | Landwirtschaftliche Biomasse..... | 74 |
| 3.2.3 | Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der stofflichen Biomassenachfrage | 75 |
| 3.2.4 | Weitere Literatur zu Trends eines zukünftigen stofflichen Biomassebedarfs..... | 76 |
| 3.3 | Übersicht zu möglichen Einsatzbereichen von Biomasse im Energiesystem 2030 und 2050..... | 82 |
| | Abbildungsverzeichnis | 95 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 98 |
| | Literaturverzeichnis..... | 99 |
| Anhang | | 110 |
| I | Status quo technisches Potenzial ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe | 110 |
| II | Methodik für die Berechnungen von zukünftigen Potenzialen ausgewählter Biomassen (Top15) inklusive relevanter Nachhaltigkeitsaspekte | 111 |
| III | Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial | 112 |

1 Hintergrund und Ziel

Biomasse stellt neben ihrer zentralen Rolle für die Ernährungssicherheit eine bedeutsame Ressource für die Rohstoff- und Energiewende dar. Sie bildet die Grundlage für eine zukünftige Bioökonomie sowie eine elementare Komponente zur Begrenzung der Erderwärmung (u. a. Substitution klimaschädlicher Baustoffe, Bereitstellung biogenen Kohlenstoffs für chemische Prozesse, „Lückenschließung“ im Energiesystem, Realisierung von Negativemissionen zur Kompensation nicht vermeidbarer Emissionen). Eine optimale und nachhaltige Nutzung von Biomasse in den verschiedenen Wirtschaftssektoren stellt sich nicht zwangsläufig marktgetrieben ein, sodass sich politischer Handlungsbedarf ergibt. Dieser Bedarf wird absehbar durch die Defossilisierung von Bau- und Chemieindustrie bzw. allgemein die Substitution endlicher durch biogene Ressourcen und die Abkehr von fossilen Energieträgern beschleunigt. Diese Prozesse führen zu einer steigenden Nachfrage nach Biomasse, während gleichzeitig ambitioniertere Klima- und Naturschutzziele ihre Verfügbarkeit einschränken.

Der vorliegende Abschlussbericht ist Teil des Projektes „Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT)“. Das Vorhaben bildet die inhaltliche Grundlage für die Nationale Biomassestrategie und damit für die künftige biomassebezogene Politik der Bundesregierung. Der Bericht fasst wesentliche Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 1 und 2 zusammen. Dazu gehören insbesondere die Quantifizierung der verfügbaren Flächen zur Biomasseerzeugung und der nationalen Biomassepotenziale sowie die aktuelle und zukünftige Nutzung von Biomassepotenzialen.

2 Arbeitspaket 1

Quantifizierung der verfügbaren Flächen zur Biomasseerzeugung und der nationalen Biomassepotenziale (Status quo und Entwicklung)

2.1 Status quo land- und forstwirtschaftlicher Flächen in Deutschland

2.1.1 Waldfläche in Deutschland

Autor: Jörg Schweinle | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Die Gesamtwaldfläche betrug im Jahr 2012 zum Zeitpunkt der 3. Bundeswaldinventur rund 11,42 Mio. ha (Thünen-Institut 2023a) (s. Tabelle 1). Das sind rund 30 % der Fläche Deutschlands. Angaben zur aktuellen Gesamtwaldfläche werden zusammen mit anderen Ergebnissen der 4. Bundeswaldinventur voraussichtlich 2024 veröffentlicht. Aufgrund der restriktiven Genehmigung von Waldumwandlungen kann seit 2012 mit einer leichten Vergrößerung der Waldfläche gerechnet werden.

Die tatsächlich mit Bäumen bestockte Fläche (bestockter Holzboden) umfasste im Jahr 2012 rund 11 Mio. ha. Bedingt durch die großflächig auftretenden Waldschäden der letzten Jahre müssen derzeit rund 0,5 Mio. ha Waldfläche wiederbewaldet werden (BMEL 2022a). Dies hat Auswirkungen auf Menge, Qualität und Art des zukünftig zur Verfügung stehenden Rohholzes. Die Fläche des bestockten Holzbodens ist daher derzeit vermutlich etwa 10,5 Mio. ha groß.

Tabelle 1: Waldfläche in Deutschland in [ha] nach Bundesland und Waldspezifikation.

(gesamter Wald, einschließlich nicht begehbarer Wald, einschließlich Lücken in der Bestockung bzw. im Bestand)

Quelle: Thünen-Institut (Hg.), 2023 (BW13).

| Land | Einheit | bestockter Holzboden | Blöße | Holzboden | Nichtholzboden | Wald |
|---------------------------|---------|----------------------|--------|------------|----------------|------------|
| Baden-Württemberg | [ha] | 1.330.625 | 1.301 | 1.331.926 | 39.922 | 1.371.847 |
| Bayern | [ha] | 2.534.232 | 3.796 | 2.538.028 | 67.535 | 2.605.563 |
| Brandenburg + Berlin | [ha] | 1.096.101 | 2.369 | 1.098.470 | 32.378 | 1.130.847 |
| Hessen | [ha] | 845.792 | 7.598 | 853.390 | 40.790 | 894.180 |
| Mecklenburg-Vorpommern | [ha] | 538.651 | 2.186 | 540.836 | 17.286 | 558.123 |
| Niedersachsen | [ha] | 1.158.459 | 2.985 | 1.161.444 | 43.147 | 1.204.591 |
| Nordrhein-Westfalen | [ha] | 880.082 | 3.977 | 884.059 | 25.452 | 909.511 |
| Rheinland-Pfalz | [ha] | 812.818 | 2.290 | 815.108 | 24.688 | 839.796 |
| Saarland | [ha] | 101.459 | 783 | 102.242 | 392 | 102.634 |
| Sachsen | [ha] | 517.858 | 2.392 | 520.249 | 12.956 | 533.206 |
| Sachsen-Anhalt | [ha] | 493.920 | 9.067 | 502.987 | 29.494 | 532.481 |
| Schleswig-Holstein | [ha] | 168.426 | 199 | 168.626 | 4.787 | 173.412 |
| Thüringen | [ha] | 520.944 | 2.799 | 523.743 | 25.345 | 549.088 |
| Hamburg/Bremen | [ha] | 13.054 | 0 | 13.054 | 791 | 13.846 |
| Deutschland (alle Länder) | [ha] | 11.012.420 | 41.742 | 11.054.162 | 364.962 | 11.419.124 |

Die nachfolgende Karte zeigt die räumliche Verteilung des Waldes in Deutschland untergliedert nach dominierenden Baumarten.

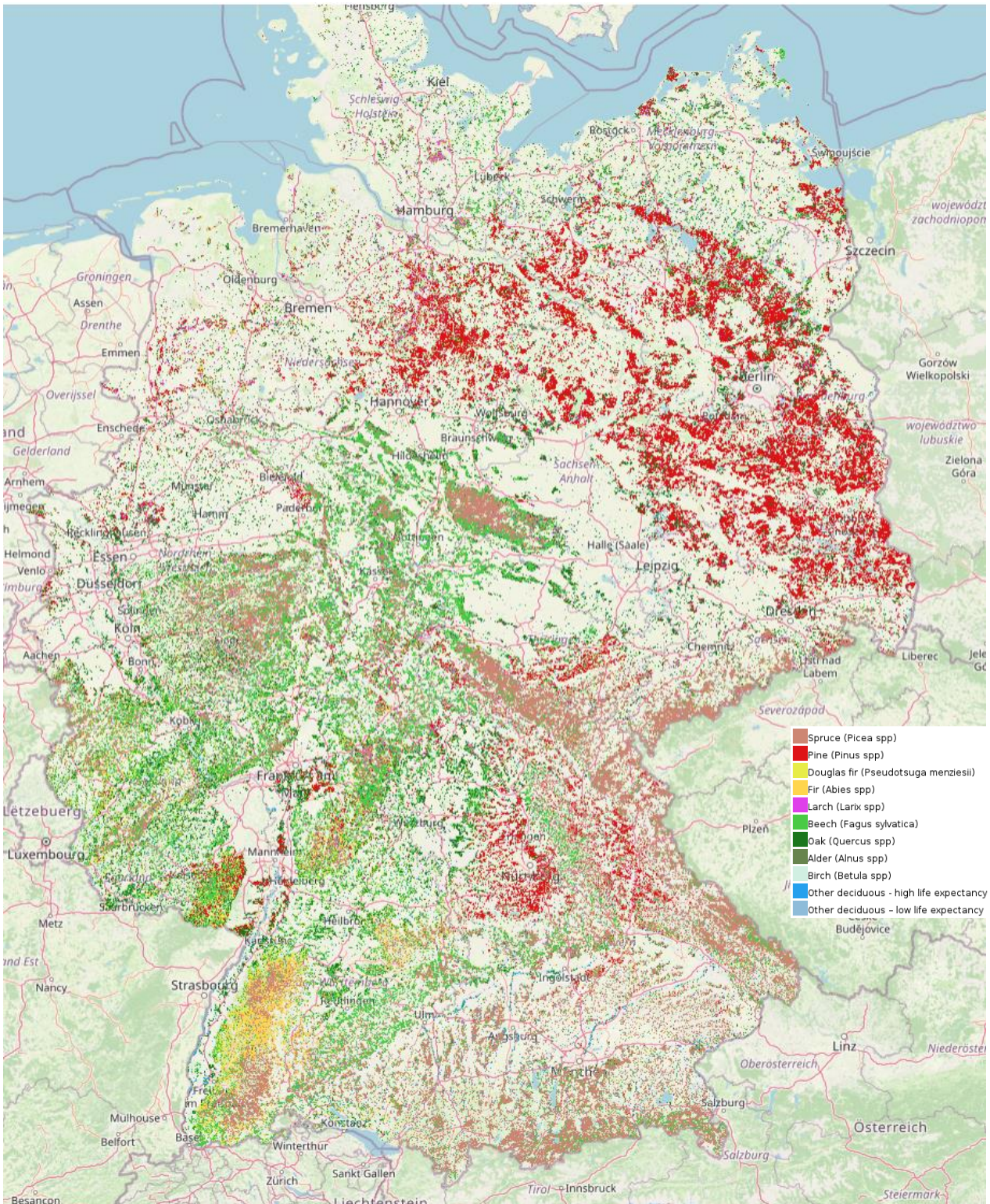


Abbildung 1: Dominierende Baumarten in Deutschland 2017/2018, CC BY (CC BY).
Quelle: Blickensdörfer et al. 2022.

Wie Abbildung 1 zeigt, dominieren im nord-ostdeutschen Tiefland und nördlichen Niedersachsen Kiefernwälder (rot), während in den Mittelgebirgen und in den Alpen Fichtenwälder (braun) vorherrschen. Im Schwarzwald finden sich dagegen auch von Tannen (gelb) dominierte Wälder. Größere zusammenhängende Laubwaldgebiete mit Buche als dominierender Baumart erstrecken sich in Nordhessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Thüringen.

Die prozentuale Baumartenverteilung im Jahr 2012 zeigt nachfolgend Abbildung 2. Mit insgesamt 25,4 % war die Fichte zu diesem Zeitpunkt die häufigste Baumart. Aufgrund der seit 2018 aufgetretenen Waldschäden, von denen vor allem die Fichte betroffen war, dürfte ihr Anteil inzwischen deutlich kleiner sein. Mit einem Anteil von 22,3 % ist die Kiefer die zweithäufigste Baumart. Die Buche mit 15,4 % und die Eiche mit 10,4 % sind die beiden am häufigsten vorkommenden Laubbaumarten. Ihr Flächenanteil hat aufgrund der bereits erwähnten Waldschäden und des seit 2012 erfolgten Waldumbaus hin zu Laubmischwäldern sicherlich zugenommen.

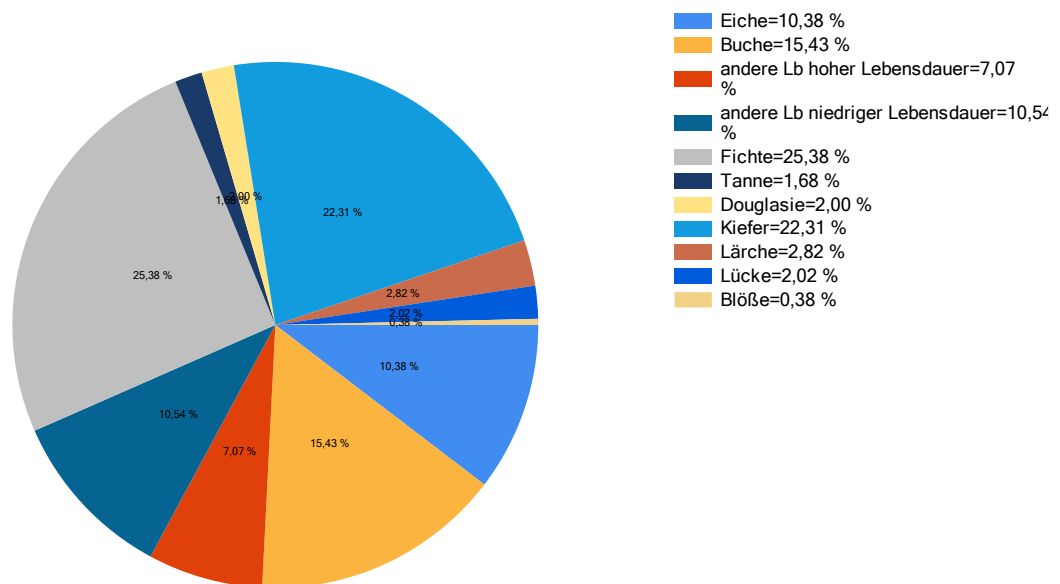


Abbildung 2: Baumartenverteilung in [%] nach Baumartengruppen im Jahr 2012.

Quelle: Thünen-Institut (Hg.), 2023 (BW13).

Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die unterschiedlichen Bestockungstypen getrennt nach Laub-, Nadel- und Mischwald zum Zeitpunkt der 3. Bundeswaldinventur im Jahr 2012. Reine Nadelwälder wuchsen auf etwa 27 % des bestockten Holzbodens, während reine Laubwälder etwa 22 % der Waldfläche ausmachten. Auf 51 % des bestockten Holzbodens wuchsen entweder Laubwald mit Nadel- oder Nadelwald mit Laubbeimischung. Der Anteil des Laubwaldes ist derzeit mit hoher Wahrscheinlichkeit größer.

Tabelle 2: Waldfläche in [ha] nach Bestockungstyp Laub/Nadel in der Hauptbestockung im Jahr 2012.

Quelle: Thünen-Institut (Hg.), 2023 (BW13).

| Land | Einheit | reiner Laubwald | Laubwald mit Nadelbeimischung | Laubwald-Typ | reiner Nadelwald | Nadelwald mit Laubbeimischung | Nadelwald-Typ | Laub-/Nadel-/Mischwald mit gleichen Anteilen | Typ mit gleichen Anteilen Laub-/Nadelbäume | alle Laub-/Nadelwaldtypen |
|----------------------------------|---------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------------------|--|--|---------------------------|
| Baden-Württemberg | [ha] | 268.746 | 310.769 | 579.516 | 272.849 | 463.653 | 736.501 | 6.704 | 6.704 | 1.322.721 |
| Bayern | [ha] | 256.174 | 513.832 | 770.006 | 707.963 | 994.524 | 1.702.487 | 12.194 | 12.194 | 2.484.687 |
| Brandenburg + Berlin | [ha] | 119.639 | 116.086 | 235.725 | 528.703 | 298.111 | 826.814 | 4.343 | 4.343 | 1.066.882 |
| Hessen | [ha] | 240.341 | 251.938 | 492.279 | 101.975 | 241.141 | 343.116 | 4.799 | 4.799 | 840.193 |
| Mecklenburg-Vorpommern | [ha] | 171.868 | 77.390 | 249.258 | 134.315 | 137.792 | 272.107 | 1.192 | 1.192 | 522.557 |
| Niedersachsen | [ha] | 295.220 | 215.058 | 510.279 | 329.461 | 307.183 | 636.644 | 5.966 | 5.966 | 1.152.888 |
| Nordrhein-Westfalen | [ha] | 296.675 | 197.253 | 493.928 | 178.959 | 192.083 | 371.042 | 4.772 | 4.772 | 869.742 |
| Rheinland-Pfalz | [ha] | 266.991 | 210.546 | 477.537 | 119.957 | 203.180 | 323.136 | 4.878 | 4.878 | 805.551 |
| Saarland | [ha] | 49.358 | 27.421 | 76.780 | 6.268 | 17.628 | 23.896 | 0 | 0 | 100.675 |
| Sachsen | [ha] | 67.373 | 70.961 | 138.335 | 198.333 | 161.257 | 359.590 | 1.595 | 1.595 | 499.519 |
| Sachsen-Anhalt | [ha] | 145.276 | 53.906 | 199.182 | 191.211 | 96.452 | 287.663 | 1.893 | 1.893 | 488.738 |
| Schleswig-Holstein | [ha] | 66.912 | 37.495 | 104.406 | 22.736 | 38.591 | 61.328 | 499 | 499 | 166.233 |
| Thüringen | [ha] | 127.750 | 73.410 | 201.160 | 168.342 | 142.889 | 311.231 | 1.003 | 1.003 | 513.394 |
| Hamburg + Bremen | [ha] | 7.912 | 2.769 | 10.681 | 396 | 1.582 | 1.978 | 0 | 0 | 12.659 |
| Deutschland (alle Länder) | [ha] | 2.380.235 | 2.158.835 | 4.539.070 | 2.961.466 | 3.296.067 | 6.257.533 | 49.837 | 49.837 | 10.846.440 |

Wie Abbildung 3 zeigt, waren zum Zeitpunkt der 3. Bundeswaldinventur im Jahr 2012 rund 48 % des deutschen Waldes in privatem Eigentum. Bayern, Brandenburg und Niedersachsen sind die Bundesländer mit dem größten Privatwaldanteil. Im Vergleich zu den anderen Waldeigentumsarten ist Privatwaldeigentum klein strukturiert. Die Mehrzahl der mehr als 2 Mio. Waldeigentümer:innen verfügt über weniger als 20 ha Wald. 29 % des Waldes ist Staatswald im Eigentum der Bundesländer. Die Bundesländer mit den größten Staatswaldflächen sind Bayern, Hessen, Niedersachsen und Baden-Württemberg. Im Eigentum des Bundes sind dagegen nur 3,5 % der Waldfläche. Die restlichen rund 19,5 % der Waldfläche befinden sich im Eigentum von Städten und Gemeinden, überwiegend in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz. Die Struktur des Waldeigentums in Deutschland ist seit der Wiedervereinigung nahezu unverändert. Derzeit gibt es weder Anzeichen für Verschiebungen zwischen den Waldeigentumsarten, noch für Veränderungen der Größenstruktur der Waldeigentumsarten.

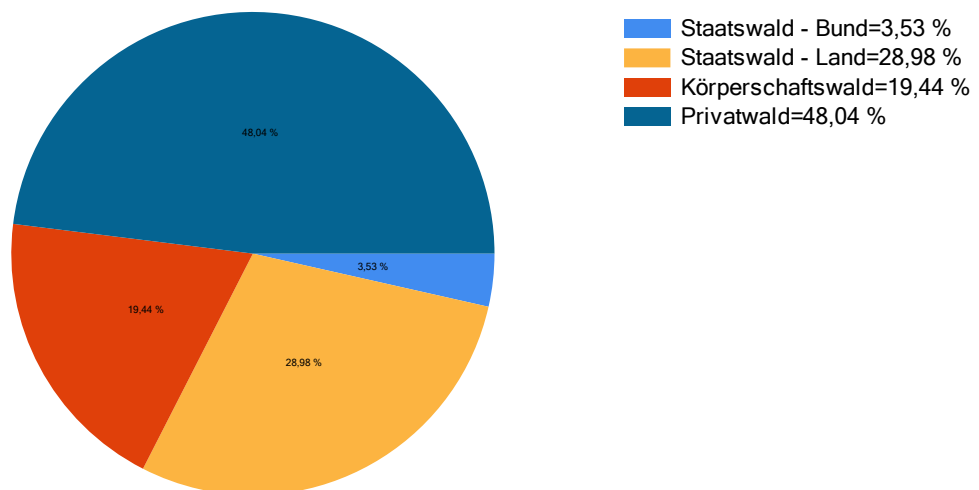


Abbildung 3: Waldflächenverteilung nach Eigentumsart in [%] im Jahr 2012.

Quelle: Thünen-Institut (Hg.), 2023 (BWI3).

2.1.2 Landwirtschaftliche Nutzfläche in Deutschland

Quelle: Dieser Abschnitt ist dem Osterburg et al. (2023), Thünen Working Paper 224, S. 3-5 entnommen.

„In diesem Unterkapitel wird die Flächennutzung in Deutschland auf Grundlage von Daten des Statistischen Bundesamtes aus der ‚Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung‘ dargestellt. Abbildung 4 zeigt die Verteilung der Flächennutzung in Deutschland im Jahr 2021 nach Art der tatsächlichen Nutzung. Auf die Landwirtschaft entfallen 51 % der Gesamtfläche von 357.592 km² in Deutschland, auf Wald 30 %. 14 % der Fläche entfallen auf Siedlungs- und Verkehrsflächen. Dabei handelt es sich nicht nur um bebaute und versiegelte Flächen, sondern auch um unbebaute Flächen wie Gärten, Hofflächen, Straßenbegleitgrün etc. und Freiflächen wie Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche sowie Friedhöfe. Bergbaubetriebe und Tagebau (Abbauland) mit 0,4 % der Fläche werden nicht zur Siedlungs- und Verkehrsfläche nach deutschem Nachhaltigkeitsindikator gezählt, weil sie langfristig wieder in andere Nutzungen überführt werden (Bundesregierung 2021). Die verbleibende Fläche entfällt auf Gehölze (1,2 %), Heide, Moor, Sumpf und Unland (1,6 %) und Gewässer (2,3 %).

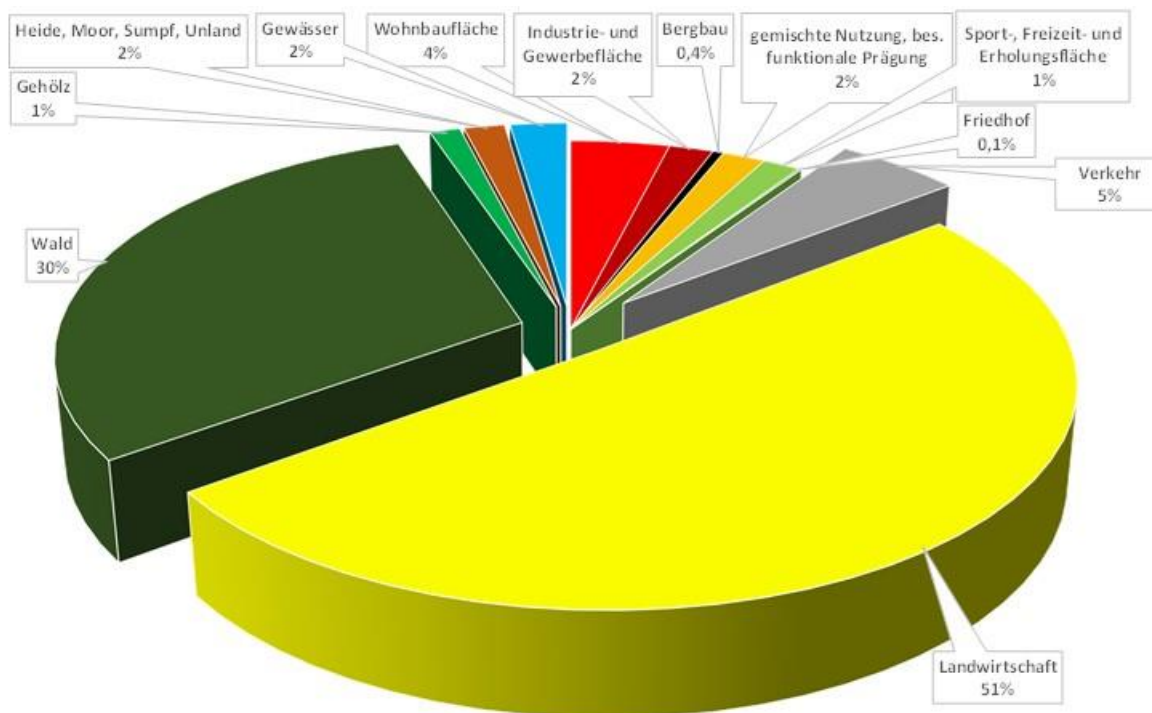


Abbildung 4: Flächennutzung in Deutschland im Jahr 2021.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis 2022a). Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung, Stand 31.12.2021.

Abbildung 5 stellt die LN und die Nutzung der LF im Jahr 2020 dar. Die Differenz zwischen LN und LF lag bei ca. 1,5 Mio. ha. In der Bodennutzungshaupterhebung 2020 wurden neben der LF Gebäude- und Hofflächen sowie andere Flächen (z. B. Landschaftselemente) mit einer Flächensumme von 285.078 ha sowie dauerhaft aus der landwirtschaftlichen Produktion genommene Flächen ohne Prämienanspruch mit 29.060 ha erfasst. Diese Fläche entspricht 21 % der Differenz zwischen LN und LF.

Das Statistische Bundesamt hat die Differenz zwischen LN und LF für das Jahr 1997 analysiert (Schäfer et al. 2002). Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass 883.800 ha Differenz nicht erklärt werden konnten. Säume umfassten den Schätzungen zufolge 676.000 ha, Hofflächen 21.000 ha, Hausgärten 17.800 ha und Moore und Heiden 126.500 ha. Geschätzt wurden auch 247.000 ha Brachland und 50.000 ha Fläche in landwirtschaftlichen Betrieben unterhalb der Erfassungsgrenze der agrarstatistischen Erhebung. Es kann angenommen werden, dass viele Grünlandflächen nicht als LF erfasst sind und einen großen Teil der verbleibenden Differenz erklären (vgl. Tietz et al. 2012).

Für eine aktuelle und weitergehende Analyse der Differenz zwischen LN und LF werden digitale Karten über die Lage dieser Flächen benötigt. Mit Hilfe der Daten des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems (InVeKoS) könnten die Diskrepanzen zwischen den landwirtschaftlich genutzten Flächen in Betrieben, die einen GAP-Förderantrag stellen, und der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen im DLM genauer untersucht werden. Das Thünen-Institut arbeitet derzeit daran, eine flächendeckende und lange Zeitreihe der InVeKoS-Daten für Deutschland aufzubauen. Grundlage dafür bildet insbesondere ein Beschluss der Amtschefkonferenz (ACK) der Staatssekretärinnen und Staatssekretäre der Agrarministerien von Bund und Ländern vom 22. Januar 2022, mit dem der Nutzungszweck der InVeKoS-Daten zur Klimaberichterstattung anerkannt wird.

Die im Jahr 2020 bewirtschaftete LF beinhaltet 11,66 Mio. ha Ackerland. Diese Ackerfläche wurde zu 28 % für die Produktion von pflanzlichen Nahrungsmitteln, zu 48 % für die Futterproduktion (Futtergetreide, Ackerfutterbau) und zu 21 % für die Produktion nachwachsender Rohstoffe, vor allem Energiepflanzen, genutzt. Etwa 3 % der Ackerfläche waren stillgelegt. Die ca. 4,7 Mio. ha Grünland wurden vor allem als Futterfläche genutzt. Etwa 4 % des Dauergrünlands sind ertragsarmes Dauergrünland (z. B. Hutungen, Heiden, Streuwiesen) und ca. 3 % werden für die Produktion nachwachsender Rohstoffe eingesetzt.

Die LF wird zu 61 % für die Futterproduktion und 16 % für die Produktion nachwachsender Rohstoffe genutzt. Etwa 2 % der LF sind den Ergebnissen der Bodennutzungshaupterhebung zufolge stillgelegt. Für die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel für die menschliche Ernährung werden 21 % der LF eingesetzt. Die Relation dieser verschiedenen Ausrichtungen der Nutzung der LF zeigen, dass der Umfang der für die menschliche Ernährung benötigten Fläche auch bei künftig voranschreitenden LF-Verlusten durch Umwidmung von Flächen sichergestellt werden kann, die derzeit für die Produktion von Futter und nachwachsenden Rohstoffen verwendet werden.“

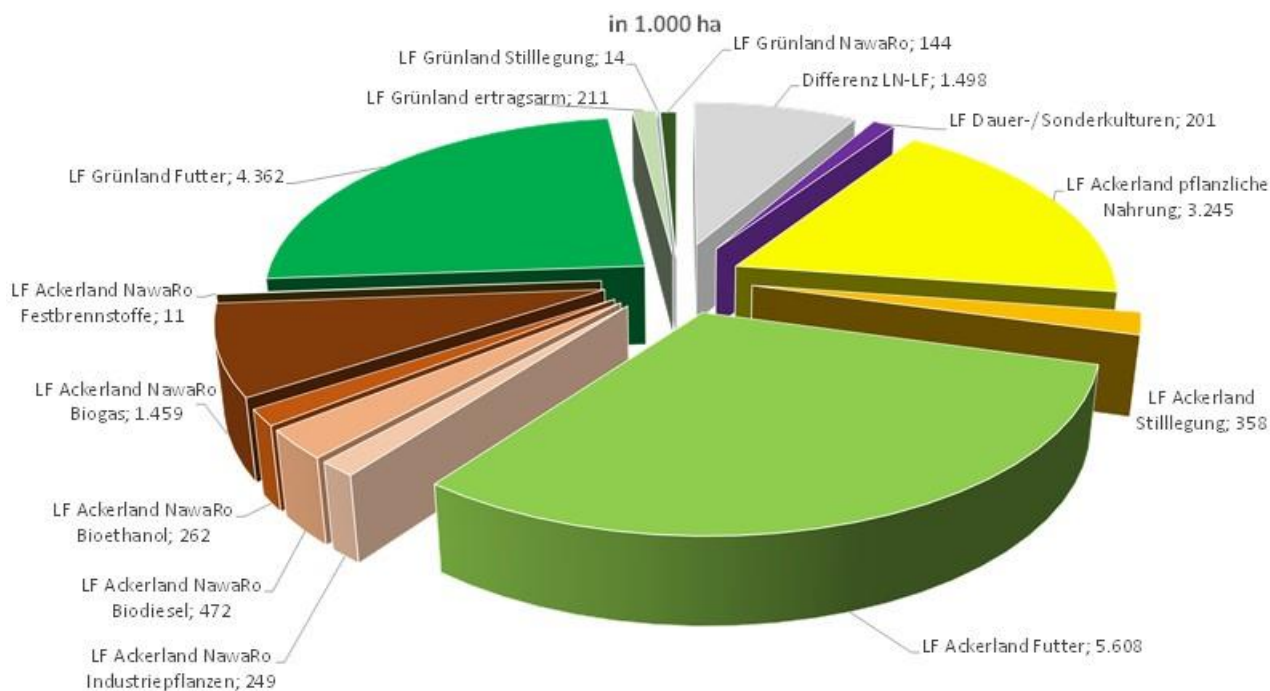


Abbildung 5: Nutzung der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) und Differenz zur landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) in Deutschland im Jahr 2020.

Quelle: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2023b: Tabelle 3070200: 46. Gesamtfläche nach Nutzungsarten; Tabelle 3070400: 47. Landwirtschaftlich genutzte Fläche nach Kulturarten; Tabelle 3071310: 52. Anbau nachwachsender Rohstoffe und Energiepflanzen; Tabelle 3090400: 75. Anteil der Futtererzeugung an der landwirtschaftlichen Produktion; Destatis 2020; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) 2023.

2.1.2.1 Entwicklung der Flächennutzung in der Vergangenheit

Quelle: Dieser Abschnitt ist dem Osterburg et al. (2023), Thünen Working Paper 224, S. 5-13 entnommen.

„Die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung wurde im Jahr 2016 von der Erhebung auf Grundlage des Nutzungsartenverzeichnisses des Automatisierten Liegenschaftsbuchs auf den neuen Nutzungsartenkatalog des Amtlichen Liegenschaftskataster-Informationssystems (ALKIS) umgestellt. Damit verbunden ist eine Steigerung der Datenqualität sowie eine Harmonisierung und stärkere Differenzierung des Nutzungsartenkatalogs. Die Umstellung vom Liegenschaftsbuch, das dem Eigentumsnachweis, aber nicht dem Flächennachweis dient, auf das ALKIS führt aber auch zu vermessungsmethodisch bedingten Abweichungen in der Flächengröße, ohne dass dem reale Flächenveränderungen gegenüberstehen. Beim Wechsel von der Buchfläche auf die Geometriefläche wurden viele Flächen neu berechnet bzw. Flächengrößen ersetzt. Gerade bei Wald- und Landwirtschaftsflächen kommt es nur selten zu einem Eigentumswechsel, bei dem die Fläche neu vermessen und die Angabe zur Nutzungsart aktualisiert wird. Aus diesem Grund kommt es bei diesen Flächennutzungen zu größeren Abweichungen aufgrund der Umstellung als bei anderen Flächennutzungsarten. Zu berücksichtigen ist ferner, dass es für die Erfassung der Nutzungsart in den Bundesländern unterschiedliche Erfassungsuntergrenzen gibt, die für die Kategorie „Vegetation“ (hierzu zählen die Landwirtschaftsfläche, Wald, Gehölze etc.) zwischen 100 und 5.000 m² liegen. Kleinere Landschaftselemente werden demnach nicht erfasst (Destatis 2022b).

In Abbildung 6 wird die Entwicklung der wichtigsten Flächennutzungskategorien zwischen 1992 und 2021 abgebildet. In Abbildung 7 werden die Veränderungen in 4-Jahresschritten in ha pro Tag abgebildet. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche und die Waldfläche (hier einschließlich Gehölzen) haben kontinuierlich zugenommen, die Landwirtschaftsfläche (hier einschließlich Moor und Heide) und sonstige Flächen (vor allem Abbauland und Unland, darunter Bauerwartungsland) haben dagegen stetig abgenommen.

In Abbildung 7 wird die Entwicklung der Landwirtschaftsfläche (LN) und der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) von 1991 bis 2021 dargestellt. Die Differenz zwischen LN und LF ist in diesem Zeitraum deutlich zurückgegangen. Abbildung 8 zeigt die prozentuale Entwicklung der LN und der LF, sowie der Acker- und Dauergrünlandfläche als Hauptkategorien der LF. Während die LN von 1992 bis 2021 um 7 % zurückgegangen ist, nahm die LF nur um 3 % ab. Die Fläche mit Ackerland hat um 1 % zugenommen, die Dauergrünlandfläche hat hingegen um 11 % abgenommen. Seit 2014 hat sich dieser Trend umgekehrt: Ackerland nimmt ab und Dauergrünland zu. Bei der Interpretation der Entwicklung der LF ist zu berücksichtigen, dass in den östlichen Bundesländern die LF nach der ersten Landwirtschaftszählung im Jahr 1991 zugenommen hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Jahr 1991 aufgrund des starken Strukturwandels nicht alle landwirtschaftlichen Flächen in den statistisch erfassten Betrieben bewirtschaftet wurden. Nicht bewirtschaftete Flächen wurden in nachfolgenden Jahren wieder in Nutzung genommen. Dies erklärt die Zunahme der LF in der 1990er Jahren.

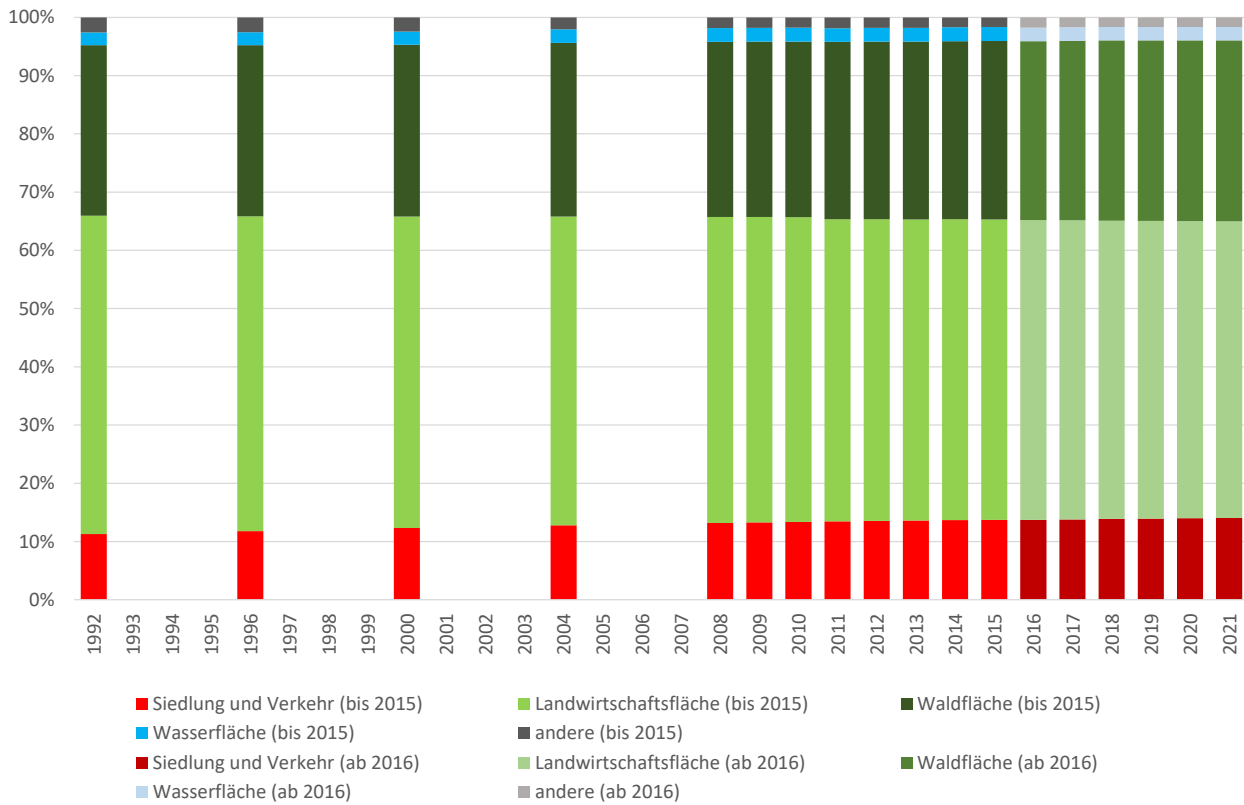


Abbildung 6: Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1992 bis 2021*).

*) Die Daten der Jahre ab 2016 werden aufgrund einer Umstellung der statistischen Methodik gesondert dargestellt.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung.

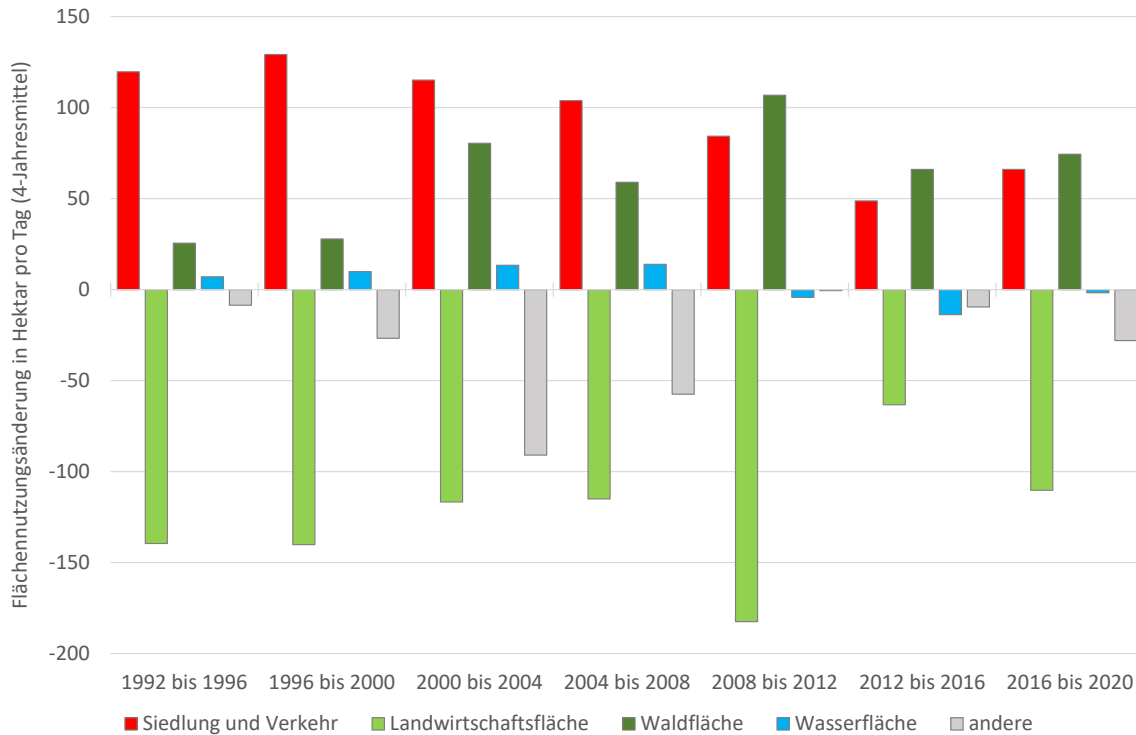


Abbildung 7: Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1996 bis 2020 in Hektar pro Tag.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung.

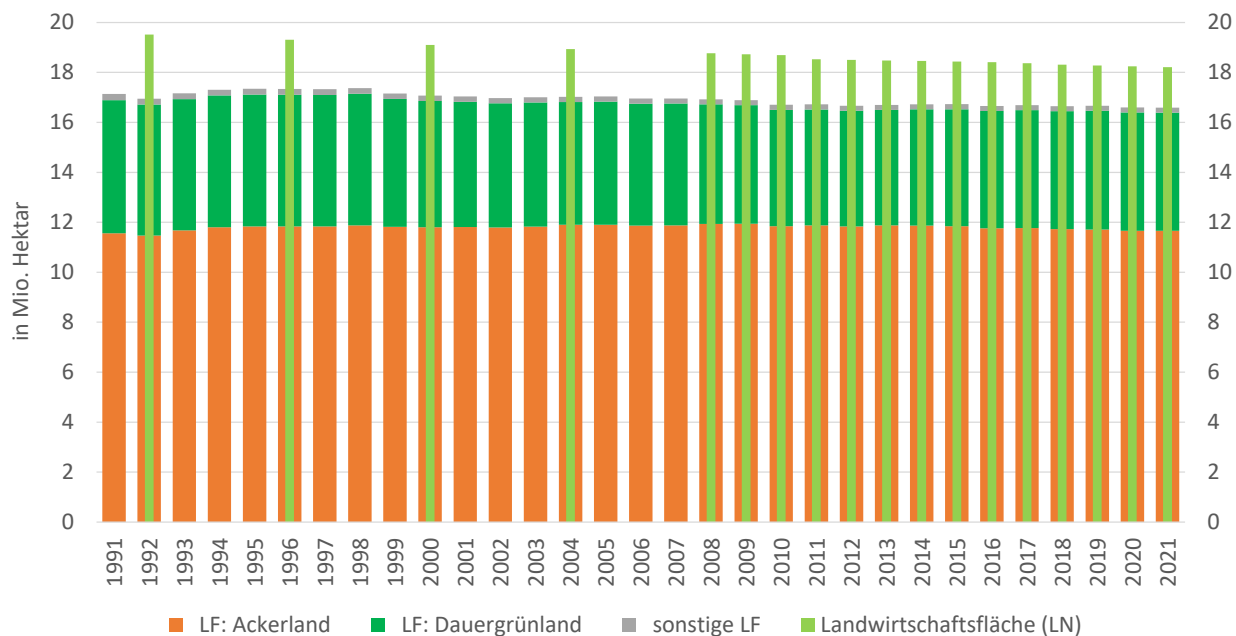


Abbildung 8: Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) und der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) in Deutschland von 1991 bis 2021.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung sowie Bodennutzung der Betriebe – Landwirtschaftlich genutzte Flächen – Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

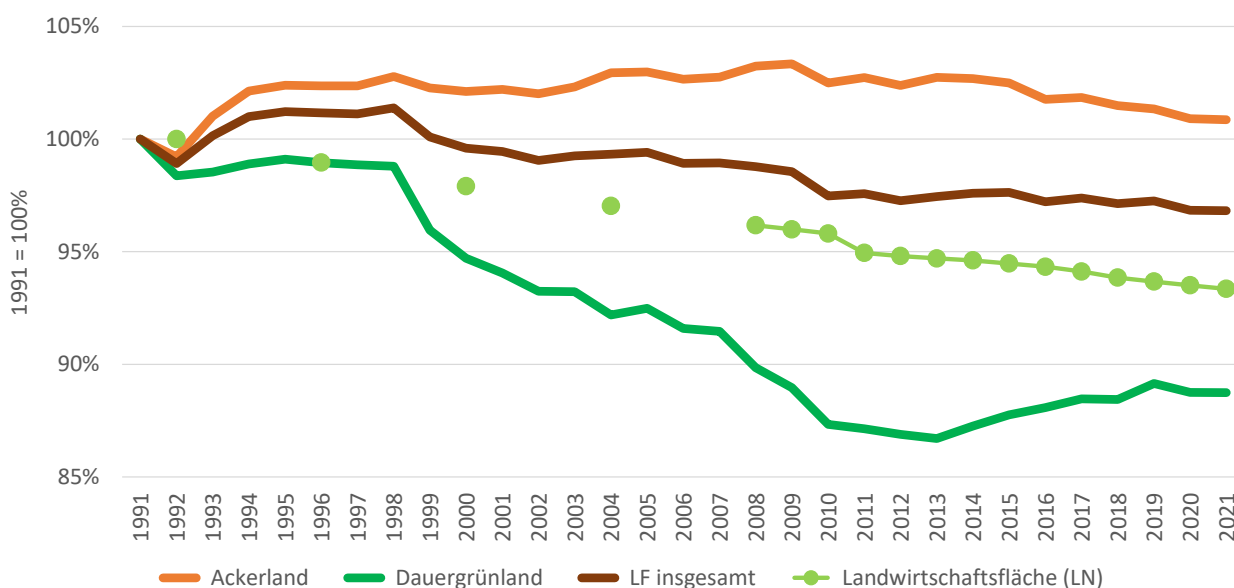


Abbildung 9: Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1991 bis 2021.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung sowie Bodennutzung der Betriebe – Landwirtschaftlich genutzte Flächen – Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

In Tabelle 3 werden für ausgewählte Zeiträume mit einheitlicher Methodik der Flächennutzungsstatistik (1992 bis 2000 und 2000 bis 2015, sowie 2016 bis 2021) Veränderungen der Siedlungs- und Verkehrsfläche, der Landwirtschaftsfläche (hier einschließlich Moor und Heide) und der Waldfläche (hier einschließlich Gehölzen) sowie der LF, des Ackerlands und des Dauergrünlands dargestellt. Die längerfristige Entwicklung wird für den Zeitraum 2000 bis 2021 dargestellt. Die Abnahme der Landwirtschaftsfläche erklärt in diesem Zeitraum knapp 73 % der Zunahmen der Siedlungs- und

Verkehrsfläche sowie der Waldfläche. Die Differenz wird durch Rückgänge anderer Flächennutzungen wie Abbau- und Unland erklärt, die ebenfalls stetig abgenommen haben. Die Abnahmen der LF betragen im selben Zeitraum nur 54 % der Abnahme der LN. Während die LF-Abnahme von 2000 bis 2015 auf Kosten der Dauergrünlandfläche ging, hat sich dies im Zeitraum 2016 bis 2021 umgekehrt. Die Erhaltung und Zunahme des Dauergrünlandes dürfte u. a. auf seit 2015 geltende, veränderte Regelungen der Gemeinsamen Agrarpolitik zur Erhaltung des Dauergrünlandes zurückzuführen sein. Seither geht die Ackerfläche zurück, weil eine Kompensation von Ackerflächenverlusten durch Umwandlung von Grünland in Ackerland nicht mehr stattfindet.

Die Flächennutzungsveränderungen in Richtung der Siedlungs- und Verkehrsfläche und der Waldfläche dürften jedoch auch die LF betreffen. Allerdings ist davon auszugehen, dass gleichzeitig auch bisher nicht zur LF zählende Flächen aus der LN (z. B. bisherige Pferdeweiden, die nicht von landwirtschaftlichen Betrieben bewirtschaftet werden) in landwirtschaftliche Betriebe aufgenommen werden und damit zur LF hinzukommen. Die Offenlandfläche der LN, z. B. grünlandartige Flächen, bilden eine „Flächenreserve“, aus der die LF „aufgefüllt“ werden kann. Dieser Puffer ist in den letzten 30 Jahren allerdings deutlich kleiner geworden: Die Differenz zwischen LN und LF ist seit 1992 um etwa 1 Mio. ha zurückgegangen.

Tabelle 3: Flächennutzungsänderungen und Veränderungen der LF zwischen 1992 und 2021.

| | Änderung 1992-2000 | | Änderung 2000-2015 | | Änderung 2016-2021 | | Änderung 2000-2021 | |
|------------------------------|--------------------|------------|--------------------|------------|--------------------|------|--------------------|------------|
| | in km ² | ha pro Tag | in km ² | ha pro Tag | | | in km ² | ha pro Tag |
| Siedlung und Verkehr | 3.634 | 124 | 5.127 | 94 | 1.183 | 65 | 6.325 | 83 |
| Landwirtschaftsfläche | -4.084 | -140 | -6.695 | -122 | -1.922 | -105 | -8.892 | -116 |
| Waldfläche und Gehölze | 779 | 27 | 4.200 | 77 | 1.234 | 68 | 5.793 | 76 |
| andere Flächen ¹⁾ | -328 | -11 | -2.632 | -48 | -496 | -27 | -3.225 | -42 |
| LF gesamt | 1.173 | 40 | -3.366 | -61 | -674 | -37 | -4.758 | -62 |
| LF: Ackerfläche | 3.360 | 115 | 429 | 8 | -1.051 | -58 | -1.456 | -19 |
| LF: Dauergrünland | -1.950 | -67 | -3.705 | -68 | 352 | 19 | -3.179 | -41 |

¹⁾ Andere Flächen umfassen Abbau- (Halden, Bergbaubetrieb, Tagebau, Grube, Steinbruch), Unland, vegetationslose Flächen und Gewässer.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung sowie Bodennutzung der Betriebe – Landwirtschaftlich genutzte Flächen – Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

Wie sich die Flächenzuordnungen zu LN und LF im Einzelnen entwickeln, lässt sich aus der Flächenstatistik und der Bodennutzungshaupterhebung nicht ablesen, denn es werden nur aggregierte Flächensummen ausgewiesen. Aus diesen lassen sich nur die Netto-Flächenveränderungen berechnen. Die Brutto-Flächenwanderungen zwischen den Kategorien der Flächennutzungserhebung und der landwirtschaftlichen Bodennutzung können mangels einzelflächenbezogener Daten nicht nachvollzogen werden.

Einen Einblick gewährt die Landnutzungsmatrix der Klimaberichterstattung, in der die Brutto-Flächenveränderungen zwischen den Flächenkategorien Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen ausgewiesen werden. Diese werden auf Datengrundlage des Digitalen Landschaftsmodells für Deutschland erstellt. In der folgenden Abbildung 10 werden die Nettoänderungen zwischen diesen Flächenkategorien von 2001 bis 2020 für Wald sowie Siedlungs- und Verkehrsflächen abgebildet. Waldfläche entsteht demnach vor allem aus bisheriger Grünlandfläche. Der Flächenzuwachs der Siedlungs- und Verkehrsflächen erklärt sich zu 10 % aus der Umwandlung von Waldflächen, zu 56 % aus Umwandlung von Ackerflächen und zu 34 % aus Umwandlung von Grünlandflächen.

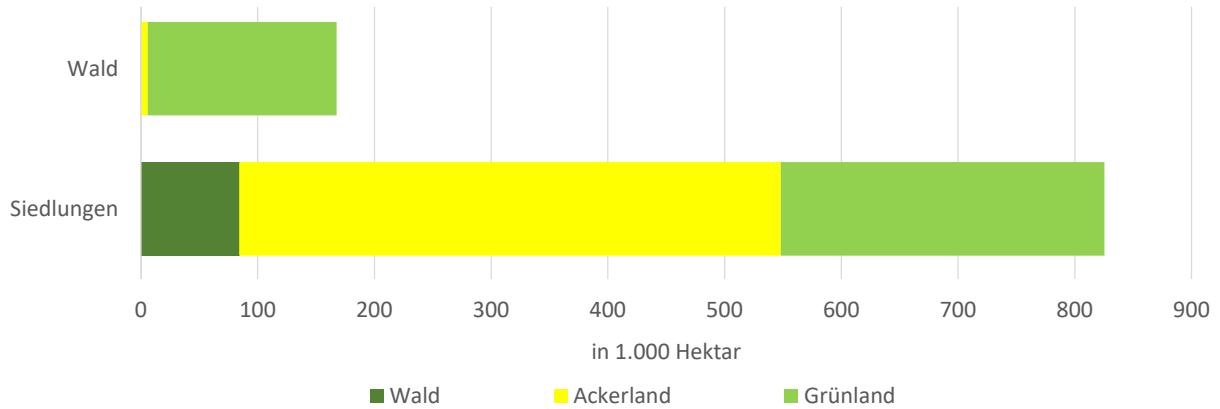


Abbildung 10: Flächennutzungsänderungen zugunsten von Wald sowie Siedlungs- und Verkehrsflächen zwischen 2001 und 2020 gemäß Klimaberichterstattung.

Quelle: Umweltbundesamt (UBA) 2022. CRF-Tabellen 2022 für das Inventarjahr 2020.

Im Folgenden wird die Frage untersucht, welche Bodenqualität Ackerflächen insgesamt haben und Ackerflächen welcher Bodenqualität in andere Nutzungen umgewandelt werden. Die folgende Abbildung 11 basiert auf einer Auswertung des Digitalen Basis-Landschaftsmodell für die Jahre 2000 und 2010 (Schmidt 2013). Die Bodenqualität wurde auf Basis der Bodenübersichtskarte BÜK 1000 anhand der nutzbaren Feldkapazität (nFK) abgeschätzt. Die nFK bestimmt maßgebend das Ertragspotenzial eines Standortes. Es erfolgt eine Unterteilung in gute, mittlere und schlechte Böden, mit je einem Drittel Flächenanteil. Das Ackerland befand sich im Jahr 2010 zu etwa 23 % auf schlechten Böden und zu 41 % auf guten Böden. Neue Grünland- und Waldflächen, die aus bisheriger Ackerfläche entstanden sind, befinden sich auf etwas schlechteren Standorten. Neue Wohnbau-, Industrie- und Gewerbeflächen auf bisherigem Ackerland weisen dagegen bessere Bodenqualitäten auf. Die Verteilung auf die drei Qualitäten entspricht hier dem Durchschnitt aller Ackerflächen in Deutschland. Bei Abbauland (Tagebau etc.) weist das umgewandelte Ackerland im Durchschnitt sogar erhöhte Bodenqualitäten auf.

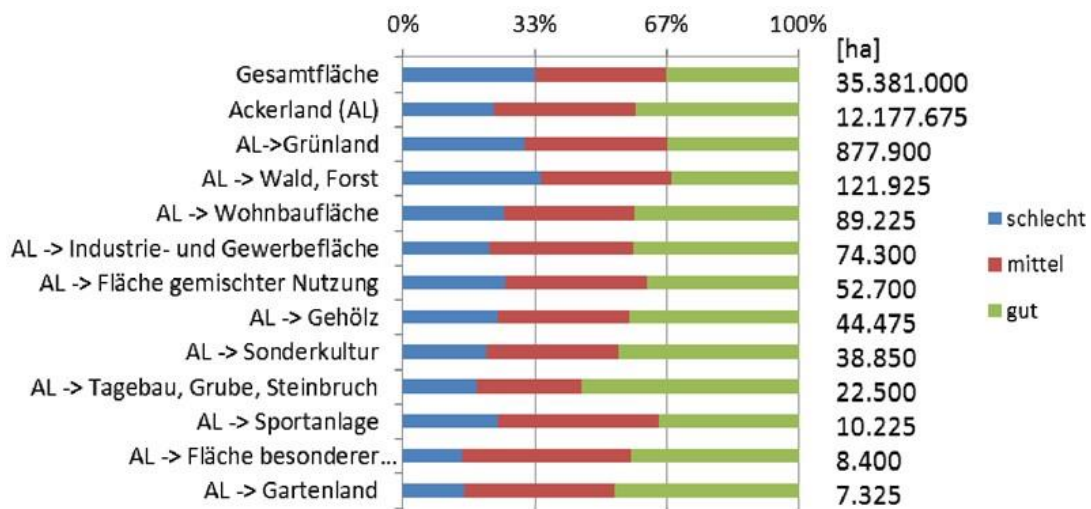


Abbildung 11: Gesamtfläche, Ackerland und dessen Umwandlung in andere Flächennutzungen (2000 bis 2010) nach Bodenqualität.

AL->: Umwandlung von Ackerland in eine andere Flächennutzung.; „Fläche besonderer ...“ : „Fläche besonderer funktionaler Prägung“ ist eine baulich geprägte Fläche einschließlich der mit ihr im Zusammenhang stehenden Freifläche, auf denen vorwiegend Gebäude und/oder Anlagen zur Erfüllung öffentlicher Zwecke oder historische Anlagen vorhanden sind.

Quelle: Schmidt 2013, Auswertung auf Basis von Daten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Digitales Basis-Landschaftsmodell und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000.

Angesichts der Umwidmung an landwirtschaftlicher Fläche stellt sich die Frage, welchen Einfluss Anbauflächenveränderungen auf die Lebensmittelerzeugung haben. Am Beispiel von Getreide als wichtigstes Grundnahrungsmittel wird dies für die vergangenen 30 Jahre analysiert. In Abbildung 12 wird deutlich, dass die Getreideanbaufläche nicht nur von der Entwicklung der Ackerfläche beeinflusst wurde, sondern bis 2007 von den agrarpolitischen Vorgaben zur Ackerflächenstilllegung. Weitere Einflussgrößen waren die Zunahme der Rapsanbaufläche und seit etwa 2005 die Zunahme der Silomaisproduktion als Gärsubstrat für die Biogasproduktion. Gegenüber dem Mittel der Jahre 1990 bis 1992 hat die Getreideanbaufläche im Mittel der Jahre 2019 bis 2021 um 0,51 Mio. ha oder 7,7 % abgenommen. Der entsprechende durchschnittliche Flächenrückgang über einen Zeitraum von 29 Jahren beträgt 48 ha Getreideanbaufläche pro Tag.

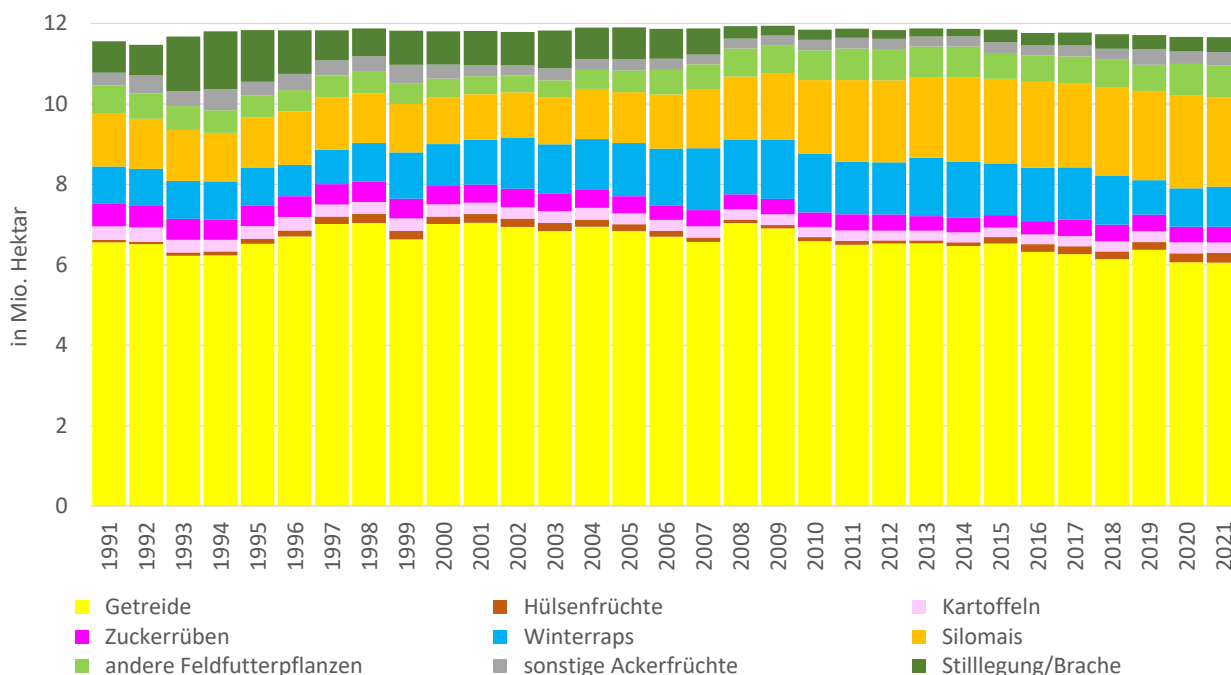


Abbildung 12: Entwicklung der Nutzung des Ackerlandes in Deutschland von 1990 bis 2021.

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Bodennutzung der Betriebe – Landwirtschaftlich genutzte Flächen – Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

Welche Wirkung hat dieser Anbauflächenrückgang nun auf die Getreideproduktion? Da die Getreideerträge im Mittel der Jahre 2019 bis 2021 gegenüber dem Mittelwert aus 1990 bis 1992 um 25,9 % gestiegen sind, hat die Getreideproduktionsmenge um 16,3 % zugenommen, trotz Anbauflächenrückgang um 7,7 %. Die positive Ertragsentwicklung konnte den Effekt der rückläufigen Anbaufläche also weit mehr als kompensieren. Die Abbildung 13 zeigt in drei Schaubildern die Entwicklung der Getreideproduktion, der Anbaufläche und des Ertrags. Schaubild (a) stellt absolute Größen dar, Schaubild (b) prozentuale Veränderungen gegenüber dem jeweiligen Vorjahr, und Schaubild (c) zeigt die prozentualen Veränderungen gegenüber dem Jahr 1990. Damit wird illustriert, wie stark sich Veränderungen der Anbaufläche und der Erträge auf die Produktionsmenge auswirken. In Schaubild (b) zeigt sich, dass die seit dem Jahr 2000 zunehmenden jährlichen Schwankungen der Getreideproduktion fast ausschließlich durch die Entwicklung der Getreideerträge erklärt werden. In Schaubild (c) wird dargestellt, dass die Entwicklung der Getreideproduktionsmenge gegenüber dem Jahr 1990 seit Mitte der 1990er Jahre zum weit überwiegenden Teil durch die Ertragsentwicklung erklärt wird und nicht durch die deutlich rückläufige Anbauflächenentwicklung.

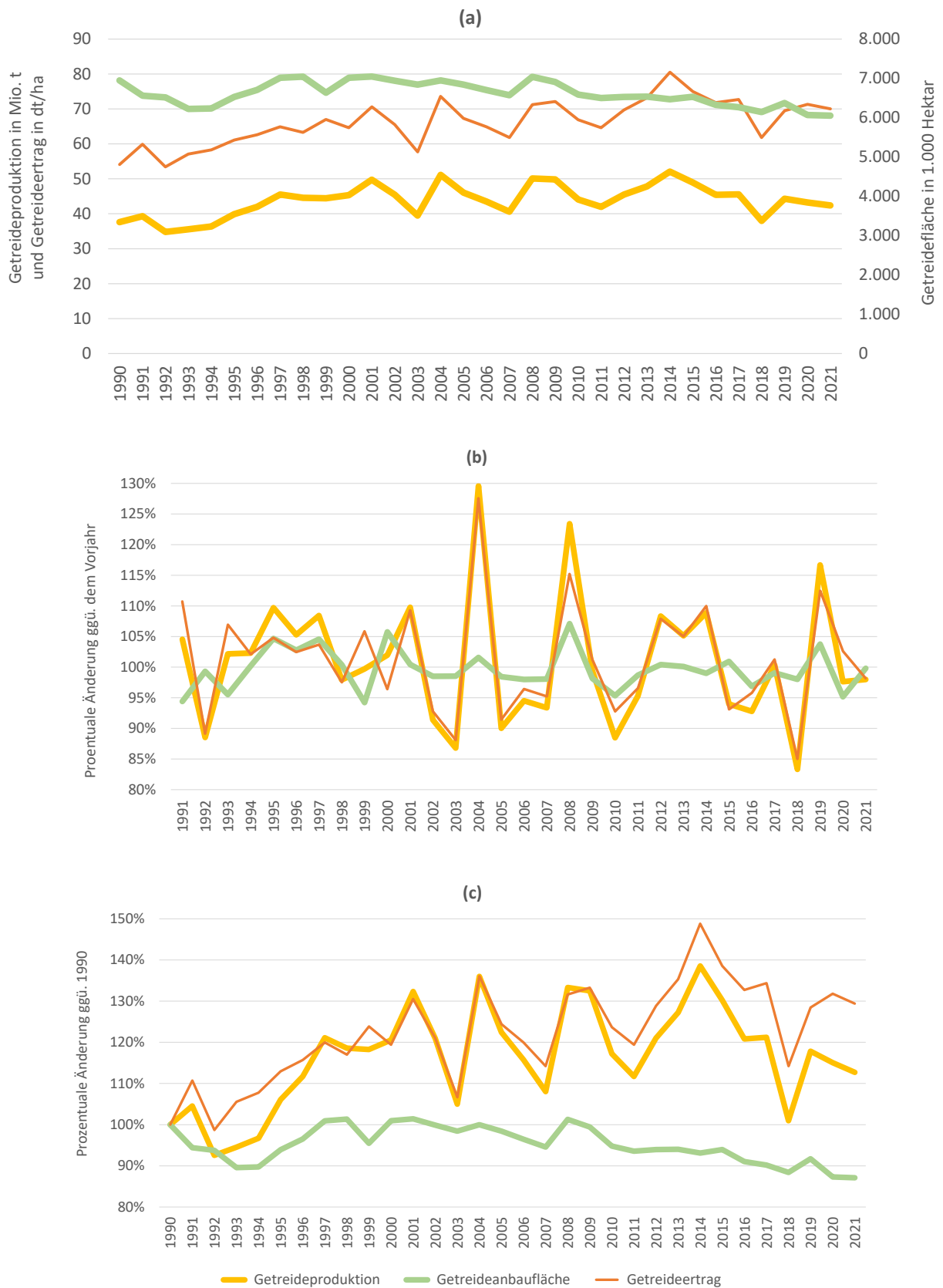


Abbildung 13: Entwicklung der Fläche, der Erträge und der Produktion von Getreide (a), der prozentualen Änderungen gegenüber dem Vorjahr (b) und gegenüber dem Jahr 1990 (c).

Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis), verschiedene Jahrgänge. Bodennutzung der Betriebe – Landwirtschaftlich genutzte Flächen – Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

Seit dem Allzeithoch im Jahr 2014 schwanken die Getreideerträge u. a. aufgrund von Extremwetter. Bei stagnierenden Erträgen schlagen die zurückgehenden Anbauflächen stärker auf die Produktionsmenge durch. Das Beispiel zeigt anschaulich, dass der Frage der Flächenproduktivität und den Auswirkungen von Extensivierung der Produktion sowie Extremwetterereignissen in Hinblick auf die Versorgungslage mit Lebensmitteln im Vergleich zur bisher beobachteten Verringerung der Anbauflächen eine höhere Bedeutung zukommt.

Anhand der durchschnittlichen Getreideerträge können die durch den Rückgang von Ackerflächen verloren gegangenen Produktionspotenziale abgeschätzt werden. Die in Siedlungsfläche umgewandelte Ackerfläche weist in etwa dieselbe Verteilung der Bodenqualitäten auf wie die gesamte Ackerfläche (vgl. Abbildung 11). Daher wird hier mit dem deutschlandweiten Ertragsdurchschnitt von Getreide der Jahre 2019 bis 2021 von 7 t/ha gerechnet. Von 2000 bis 2021 ist die in der Agrarstatistik erfasste Ackerfläche um 1,2 % bzw. 145.600 ha zurückgegangen. Die Ackerfläche hat zwischen 2000 und 2009 zugenommen, deshalb liegt der Rückgang von 2009 bis 2021 sogar bei 2,4 % oder 287.200 ha. Unter der Annahme, diese Ackerflächen würden für die Getreideproduktion genutzt, hat die zwischen 2000 und 2021 verloren gegangene Fläche ein Produktionspotenzial von ca. 1 Mio. t Getreide. Bezogen auf die Ackerflächenverluste von 2009 bis 2021 liegt der Rückgang des Produktionspotenzials sogar bei ca. 2 Mio. t Getreide.“

2.1.2.2 Ausgewählte, für landwirtschaftliche Flächennutzung relevante Entwicklungen

Quelle: Dieser Abschnitt ist dem Osterburg et al. 2023, Thünen Working Paper 224, S. 13-18 entnommen:

„Im Folgenden werden ausgewählte, für die Flächennutzung relevante Entwicklungen näher beschrieben.

Energie- und Industriepflanzen

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) ermittelt jährlich den Flächenbedarf für die Erzeugung von Bioenergie und Industriepflanzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den meisten Fällen die angebauten Kulturen sowohl für die Erzeugung von Bioenergie als auch im Nahrungs- und Futtermittelsektor verwendet werden können und viele Rohstoffe international gehandelt werden. Die tatsächliche Verwendung kann sich dabei kurzfristig aufgrund von Ertragsschwankungen und Marktverhältnissen ändern und steht nicht bereits zum Zeitpunkt der Aussaat fest. Daher schätzt die FNR die Anbauflächen auf Basis der Verwendungsmengen mithilfe der Agrarstatistik, amtlicher Produktions- und Außenhandelsstatistiken sowie zusätzlicher Annahmen aufgrund von Experteneinschätzungen. In Tabelle 4 sind die von der FNR geschätzten Anbauflächen für die Jahre 2019 bis 2021 dargestellt. Die geschätzten Anbauflächen sind kalkulatorische Größen, die von den tatsächlichen Anbauflächen abweichen können.

Tabelle 4: Anbauflächen für Industrie- und Energiepflanzen.

| Rohstoff | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 ¹⁾ | 2022 ²⁾ |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|
| Industriestärke | 110 | 107 | 101 | 113 | 133 | 142 | 129 | 129 | 147 | 150 | 155 |
| Industriezucker | 16 | 17 | 13 | 12 | 13 | 12 | 12 | 10 | 13 | 12 | 12 |
| Technisches Rapsöl | 139 | 139 | 116 | 138 | 147 | 123 | 129 | 101 | 90 | 63 | 69 |
| Technisches Sonnenblumenöl | 9 | 8 | 7 | 8 | 10 | 8 | 7 | 8 | 10 | 15 | 33 |
| Technisches Leinöl | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 |
| Pflanzenfasern | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| Arznei- und Farbstoffe | 10 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Industriepflanzen insgesamt | 289 | 287 | 253 | 288 | 320 | 304 | 296 | 268 | 281 | 263 | 292 |
| Rapsöl für Biodiesel/Pflanzenöl | 786 | 614 | 799 | 805 | 720 | 591 | 589 | 513 | 471 | 612 | 665 |
| Pflanzen für Bioethanol | 201 | 173 | 188 | 238 | 259 | 248 | 267 | 214 | 188 | 216 | 216 |
| Pflanzen für Biogas | 1.163 | 1.269 | 1.354 | 1.340 | 1.430 | 1.430 | 1.550 | 1.570 | 1.630 | 1.570 | 1.650 |
| Pflanzen für Festbrennstoffe ³⁾ | 11 | 9 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| Energiepflanzen insgesamt | 2.160 | 2.060 | 2.350 | 2.390 | 2.420 | 2.280 | 2.420 | 2.300 | 2.300 | 2.410 | 2.540 |
| Insgesamt | 2.450 | 2.350 | 2.600 | 2.680 | 2.740 | 2.590 | 2.720 | 2.580 | 2.580 | 2.670 | 2.830 |

¹⁾ Vorläufig - ²⁾ Schätzung - ³⁾ u. a. Agrarholz und Miscanthus.

Quelle: BMEL (2022c)

Flächen für die Biogasproduktion

Wesentlicher Treiber für die Entwicklung des Biogasanlagenbestandes sind die Vergütungsbedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG), welches im Jahr 2000 eingeführt und seither vielfach angepasst wurde. Zwischen 2005 und 2011 ist der Anlagenbestand stark gewachsen (vgl. Abbildung 14); durch Anpassungen in den Vergütungsmodellen wurden die Zubauraten seit 2013 deutlich begrenzt. Der Anlagenzubau beschränkte sich seitdem im Wesentlichen auf neu errichtete Güllekleinanlagen und Erweiterungsinvestitionen an bestehenden Biogasanlagen. Im EEG 2017 wurde der Förderanspruch auf ein Ausschreibungsmodell mit Höchstgebotsgrenzen umgestellt und eine Deckelung für den Anteil an Silomais eingeführt. Derzeit (EEG 2023) liegen die Höchstgebotsgrenzen bei 16,07 ct/kWh für Neuanlagen, so dass zukünftig von keinem weiteren Ausbau der Biogasproduktion auszugehen ist.

Da die Biogasproduktion vor allem auf Basis nachwachsender Rohstoffe (insbesondere Silomais) erfolgt, konkurriert sie mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Daher war in der Vergangenheit neben der EEG-Vergütung ebenfalls die Entwicklung der Agrarpreise ausschlaggebend für den Zubau von Biogasanlagen. Beispielsweise kamen im Zuge sehr hoher Agrarpreise im Jahr 2007 die bestehenden Anlagen unter wirtschaftlichen Druck, so dass kaum neue Anlagen gebaut wurden. Erst als in der EEG-Novelle 2009 die Vergütung weiter erhöht wurde, kam es wieder zu einem Ausbau des Anlagenbestandes.

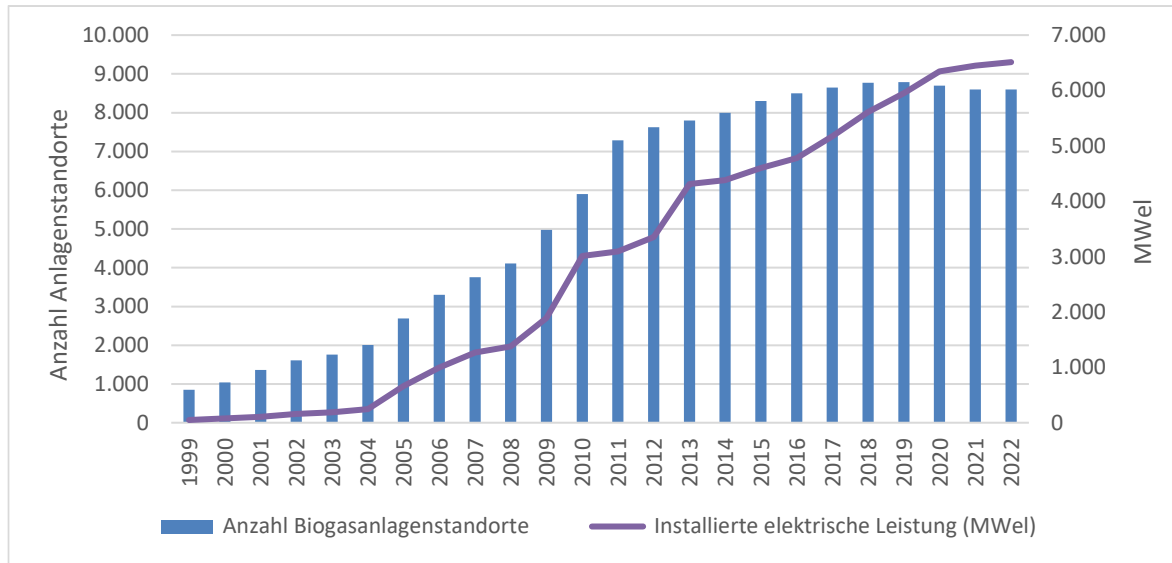


Abbildung 14: Entwicklung des Biogasanlagenbestandes¹⁾.

¹⁾ Ohne Anlagen zur Einspeisung von Biomethan

Quelle: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) 2023b, sowie weitere Jahrgänge des Statistischen Jahrbuchs über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten).

Der Ausbau von Biogasanlagen weist regionale Schwerpunkte auf. Regionen mit einer vergleichsweise hohen installierten elektrischen Leistung befinden sich im Norden Schleswig-Holsteins, in Niedersachsen in einem Gürtel vom Emsland bis Lüchow-Dannenberg sowie in einigen Regionen Bayerns und Baden-Württembergs: Auf etwa 10 % der deutschen Landkreise entfällt rund ein Drittel der gesamten installierten Leistung. Teilweise weisen diese Regionen gleichzeitig eine intensive und wachsende Milcherzeugung sowie Veredelung (Schweine- und Hähnchenmast) auf (vgl. Gömann et al. 2013).

Flächen für die Biokraftstoffe

Der Anbau von Energiepflanzen für die Erzeugung von Biokraftstoffen in Deutschland hängt stark von den politischen Rahmenbedingungen ab. Seit 2015 lässt sich eine kontinuierliche Reduktion der Rohstoffe aus deutscher Produktion zugunsten von Rohstoffen aus Nicht-EU-Ländern beobachten (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2023a) versch. Jgg.). Für die Erstellung der Thünen-Baseline 2022 (Haß et al. 2022) wurden in Ermangelung genauerer Projektionen für Deutschland die gleichen prozentualen Änderungen der Rohstoffverwendung zur Biokraftstoffherstellung angenommen, die die Mittelfristprojektion der EU-Kommission für das Länderaggregat EU-14 ausweist. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Abbildung 15 dargestellt. Demnach hat sich die Erzeugung von Biodiesel aus Rapsöl in den letzten Jahren rückläufig entwickelt, da Rapsöl verstärkt durch Palmöl, vor allem aber durch Abfall- und Reststoffe (insb. Altspisefette) substituiert wird (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2023a) versch. Jgg.). Über die Projektionsperiode der Thünen-Baseline 2022-2032 wird daher von einer weiteren Reduktion der Verwendung von Rapsöl zur Biodieselherstellung ausgegangen.

Die Erzeugung von Bioethanol aus Getreide ist in den letzten Jahren noch gewachsen, wohingegen der Einsatz von Zuckerrüben rückläufig war. In der Projektion der Thünen-Baseline sinkt die Verwendung von Agrarrohstoffen zur Bioethanolherstellung insgesamt. Nur die Verwendung sonstiger Getreide, zu denen in Deutschland vor allem Roggen zählt, gefolgt von Triticale und Gerste, steigt bis 2032 an (Haß et al. 2022).

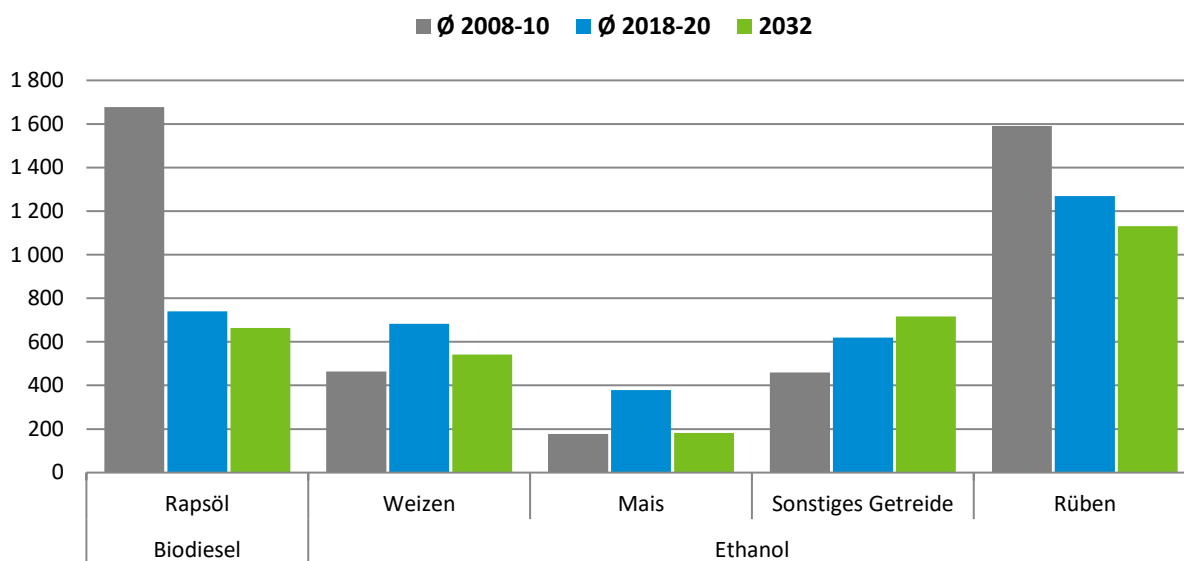


Abbildung 15: Annahmen zur Biokraftstoffherstellung aus agrarischen Primärrohstoffen in Deutschland (in 1.000 Tonnen Rohstoff).

Quelle: Haß et al. (2022) Abb. 2.7, S. 18.

Während die Flächenansprüche für die Erzeugung von Biokraftstoffen stagnieren oder zurückgehen, nehmen andere Flächenansprüche wie die der chemischen Industrie in Deutschland zu. Derzeit werden von der chemischen Industrie in Deutschland ca. 18 Mio. t fossile Rohstoffe (Erdölprodukte, Erdgas und Kohle) und nur ca. 2,7 Mio. t nachwachsende Rohstoffe eingesetzt (Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) 2019; Angaben für 2017). Künftig könnte ein Großteil der Ausgangsstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft gewonnen werden. Auf Grundlage von Berechnungen unterschiedlicher Rohstoff-Anteile könnten hierfür bis zu 5 Mio. ha erforderlich werden (Isermeyer 2022).

PV-Freiflächenanlagen auf bisher landwirtschaftlich genutzten Flächen

Die für die PV-Stromerzeugung verwendete landwirtschaftliche Fläche wird nicht zentral in der amtlichen Flächenstatistik erfasst. Daher haben (Böhm et al. 2022) auf Basis des Marktstammdatenregisters für EEG-Anlagen sowie des Basis-DLM den bisherigen landwirtschaftlichen Flächenbedarf für PV-Freiflächenanlagen analysiert. Demnach waren im Jahr 2018 auf 25.500 ha PV-Freiflächenanlagen installiert. Etwa 13.300 ha davon wurden zuvor als Ackerland und 3.800 ha als Grünland genutzt. Weiterhin existieren 7.500 ha PV-Freiflächenanlagen auf bisherigen Konversionsflächen und 950 ha auf sonstigen Flächenkategorien. Da PV-Freiflächenanlagen bisher vor allem in den ostdeutschen Bundesländern, Bayern und Schleswig-Holstein errichtet wurden, ergeben sich deutliche Unterschiede in der regionalen Verteilung. Andere Literaturquellen kommen mit Flächenbedarfen von 24.300 bis 29.300 ha für Freiflächen-PV zu ähnlichen Ergebnissen (Göhler et al. 2019). Abbildung 16 zeigt, wie viel Fläche für Freiflächen-PV von 2004 bis 2018 neu in Anspruch genommen wurde. Es liegen keine aktuelleren Daten vor, aus denen Rückschlüsse auf die vorherige Nutzungsart gezogen werden können.

Das Marktstammdatenregister mit Stand 02.03.2023 bietet neuere Daten. Die Güte der Datenqualität ist jedoch zu hinterfragen. Wie in Böhm et al. (2022) diskutiert, scheint die Datenkontrolle unzureichend, so dass es zu fehlerhaften und ungenauen Angaben kommt. Nach einer ungefilterten Auswertung der registrierten PV-Freiflächenanlagen ergibt sich mit Stand 02.03.2023 eine beanspruchte Fläche von 37.461 ha.

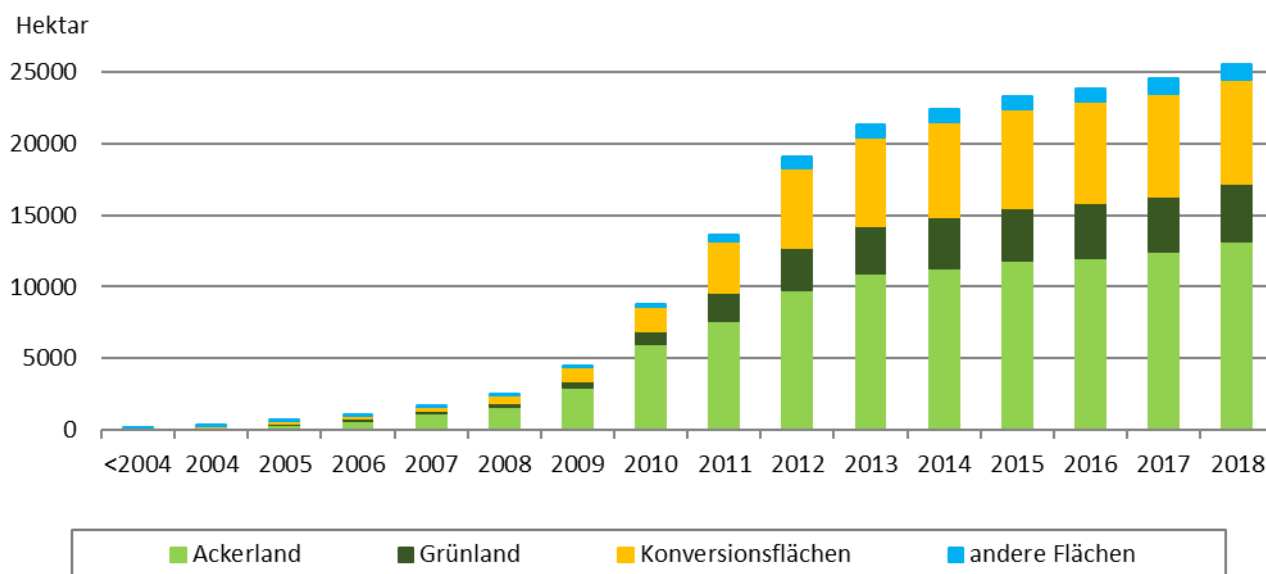


Abbildung 16: Kumulierte Entwicklung der in Anspruch genommenen Fläche durch Freiflächen-PV
Quelle: Böhm et al. (2022).

Windenergie auf landwirtschaftlichen Flächen

Für die durch Windenergieanlagen versiegelten Flächen gibt es bislang keine amtliche Statistik. Daher wird im Rahmen dieser Stellungnahme der bisherige Flächenbedarf für Windenergieanlagen grob geschätzt. Hierfür werden aus dem Marktstammdatenregister alle im Betrieb befindlichen Anlagen an Land mit einer Nettoleistung von mehr als 750 kW berücksichtigt. Im August 2022 befanden sich 24.200 Anlagen dieser Größenordnung in Betrieb. Auf Basis einer Literaturrecherche wird von einer durchschnittlichen Flächeninanspruchnahme von 0,4 ha je Anlage und einem Schwankungsbereich von 0,24 - 0,6 ha je Anlage ausgegangen (ABO Wind 2021; Bundesverband Boden 2021; Bundesverband WindEnergie 2015; Fachagentur Windenergie an Land 2021; Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung 2016; Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr (StMB) 2021). Auf Basis dieser Annahmen ergibt sich eine bisherige Flächeninanspruchnahme von 9.700 ha. Der zusätzlich notwendige Bedarf für Ausgleichsflächen bleibt hierbei unberücksichtigt, da dies regional sehr unterschiedlich gehandhabt wird und die hierfür beanspruchten Flächen nicht zentral erfasst werden.

Ökologischer Landbau

Die Bedeutung des ökologischen Landbaus in Deutschland ist seit Anfang der 1990er Jahre stetig gewachsen. Ende des Jahres 2021 haben insgesamt 36.307 Betriebe rund 1,8 Mio. ha ökologisch bewirtschaftet. Der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Fläche an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche liegt bei knapp 11 %, der Anteil an allen Betrieben liegt bei 14 % (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2022). Regional gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich des Umfangs und der relativen Bedeutung des Ökolandbaus (siehe Tabelle 5 und Abbildung 18); in Bezug auf die Bundesländer ergibt sich zusammenfassend folgendes Bild:

- Über 60 % der deutschen Ökobetriebe sind in Bayern und Baden-Württemberg ansässig. Dies ist auf die kleineren Betriebsstrukturen zurückzuführen, in Baden-Württemberg zusätzlich auf den besonders hohen Anteil der Ökobetriebe an allen Betrieben.
- Der Anteil Bayerns und Baden-Württembergs an der gesamten ökologisch bewirtschafteten Fläche in Deutschland liegt bei 34 %.
- Führend in Bezug auf die relative Bedeutung des Ökolandbaus auf Länderebene sind das Saarland (19 % Flächenanteil), Hessen (16 %), Brandenburg (16 %), Baden-Württemberg (15 %) und Bayern (13 %).
- Vergleichsweise geringe Bedeutung hat der ökologische Landbau in Niedersachsen (5 %), Nordrhein-Westfalen (6 %) sowie Schleswig-Holstein und Thüringen (je 8 % Flächenanteil).“

Tabelle 5: Ökologisch wirtschaftende Landwirtschaftsbetriebe und Umfang der ökologisch bewirtschafteten Fläche (LF) nach Verordnung (EG) Nr. 834/2007 i.V.m. Verordnung (EG) Nr. 889/2008 in Deutschland im Jahr 2021 (sortiert nach Umfang der ökologisch bewirtschafteten Fläche in ha).

| Bundesland | Öko-Fläche (in ha LF) | Anteil Öko-Fläche an LF | Anzahl Ökobetriebe (inkl. < 5 ha) | Anteil Ökobetriebe an allen Betrieben | Anteil an der Öko-Fläche in D |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Bayern | 408.616 | 13,2 % | 11.527 | 13,8 % | 22,7 % |
| Baden-Württemberg | 203.830 | 14,5 % | 10.162 | 26,4 % | 11,3 % |
| Brandenburg | 202.216 | 15,5 % | 1.052 | 19,6 % | 11,2 % |
| Mecklenburg-Vorpommern | 190.074 | 14,1 % | 1.174 | 24,4 % | 10,5 % |
| Niedersachsen | 143.024 | 5,4 % | 2.453 | 6,9 % | 7,9 % |
| Hessen | 123.776 | 16,2 % | 2.418 | 16,0 % | 6,9 % |
| Sachsen-Anhalt | 114.857 | 9,9 % | 650 | 15,2 % | 6,4 % |
| Nordrhein-Westfalen | 95.344 | 6,4 % | 2.297 | 7,2 % | 5,3 % |
| Rheinland-Pfalz | 87.016 | 12,3 % | 1.865 | 11,7 % | 4,8 % |
| Sachsen | 82.948 | 9,3 % | 913 | 14,0 % | 4,6 % |
| Schleswig-Holstein | 73.771 | 7,5 % | 880 | 7,3 % | 4,1 % |
| Thüringen | 58.011 | 7,5 % | 480 | 13,1 % | 3,2 % |
| Saarland | 14.268 | 19,4 % | 285 | 26,4 % | 0,8 % |
| Stadtstaaten | 4.480 | 18,5 % | 151 | 19,4 % | 0,2 % |
| Deutschland insgesamt | 1.802.231 | 10,9 % | 36.307 | 14,0 % | 100 % |

Quelle: Eigene Darstellung (Thünen-Institut 2022 nach Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2022))

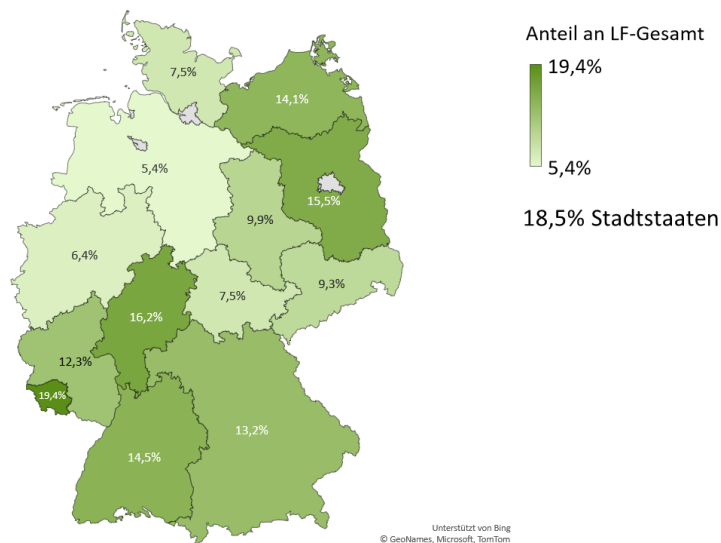


Abbildung 17: Bedeutung des ökologischen Landbaus in den Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2021. Quelle: Eigene Darstellung (Thünen-Institut 2022 nach BMEL 2022b)

2.2 Status quo der Biomasseverfügbarkeit

2.2.1 Holzbiomasse sowie Rinde

Autor:innen: Holger Weimar, Susanne Iost, Sebastian Glasenapp | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Nachstehende Tabelle stellt den Status quo der verfügbaren (technischen) Potenziale der betrachteten Holzbiomassen dar, soweit diese aus der bislang betrachteten Literatur abgeleitet werden konnten. Die Daten in Tabelle 6 stellen den vorläufigen Ergebnisstand dar. Im Rahmen der weiteren Arbeiten zur NABIS können sich noch Änderungen ergeben.

Tabelle 6: Potenziale der Holzbiomassen sowie Rinde.

| Biomasse | Bezugsjahr bzw. -zeitraum | Technisches Potenzial/ Verfügbarkeit | Quelle |
|-----------------------------|---------------------------|--|--|
| Rohholz (Derbholz) | 2018-2022 bzw. 2022 | 36,5 - 61,7 Mio. t _{TM} (70,0 - 118,4 Mio. EFm o.R.) | Thünen-Institut 2023b; Rock et al. 2016a; Oehmichen et al. 2018; Böttcher et al. 2018 |
| Nichtderbholz | 2018-2022 | 2,4 Mio. t _{TM} (4,9 Mio. m ³ /a) | Schier und Weimar 2018 |
| Rinde | 2020 | 4,1 - 6,9 Mio. t _{TM} (zzgl. ca. 0,3 Mio. t _{TM} Rinde von Nichtderbholz) | Eigene Berechnung, basierend auf Potenzialen von Rohholz (Derbholz) |
| Sägenebenprodukte | 2020 | 7,7 Mio. t _{TM} (17,0 Mio. m ³) | Eigene Berechnung, Döring et al. 2020 |
| Sonstiges Industrierestholz | 2020 | 3,6 Mio. t _{TM} (7,8 Mio. m ³) | Eigene Berechnung, Döring et al. 2020; Infro e.K. 2023 |
| Altholz | 2016 | 6,9 - 7,5 Mio. t _{TM} (8,6 - 9,3 Mio. t _{FM}) | Flamme et al. 2020; Vogler et al. 2020 |
| Ablauge | 2021 | 1,8 Mio. t _{TM} (4,5 Mio. t _{FM}) | PAPIERINDUSTRIE e. V. 2022 |
| Altpapier | 2015 | 13,2 - 19,4 Mio. t _{TM} | DBFZ Web App 2023 ¹ |
| Landschaftspflegeholz | 2015 | 2,7 - 3,8 Mio. t _{TM} | DBFZ Web App 2023 |
| KUP-Holz | 2020 | 0,05 Mio. t _{TM} (0,1 Mio. m ³) | Infro e.K. 2023 |

Anmerkungen: Derbholz: Holz mit einem Durchmesser ab 7 cm; WEHAM: Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung; EFm o.R.: Erntefestmeter ohne Rinde, identisch mit Fm (Festmeter) o.R., Fm oder m³ (Kubikmeter); t_{FM}: Tonne Feuchtmasse; t_{TM}: Tonne Trockenmasse

Die Informationen zum Rohholzpotenzial bzw. potenziellen Rundholzaufkommen (Derbholz) zeigen eine große Bandbreite. Diese Bandbreite ergibt sich aus den Ergebnissen der drei verfügbaren WEHAM-Szenarien des Thünen-Instituts sowie dreier Szenarien von Holzaufkommensmodellierungen des Öko-Instituts. Eine ausführliche Beschreibung der WEHAM-Szenarien erfolgt in Kapitel 2.3.

¹ Die Daten werden demnächst auch in der DBFZ-Ressourcendatenbank online verfügbar sein: <https://webapp.dbfz.de/resource-database/?lang=de>

Das WEHAM-Basisszenario gibt für die Periode 2018 bis 2022 ein potenzielles Rohholzaufkommen von 82,8 Mio. EFm o. R. bzw. m³ pro Jahr an (Rock et al. 2016b). Das Holzpräferenzszenario weist ein potenzielles Rohholzaufkommen in der Periode 2018-2022 von 118,4 Mio. m³ aus. Im Naturschutzpräferenzszenario wurde das potenzielle Rohholzaufkommen in der Periode 2018-2022 in Höhe von 87,7 Mio. m³ modelliert (Oehmichen et al. 2018).

Zusätzliche Modellierungsergebnisse für das potenzielle Rohholzaufkommen auf Grundlage der Daten der BWI3 liegen von Hennenberg und Böttcher (2018) vor. In einem Basisszenario wurde für 2022 ein Aufkommenspotenzial von 86 Mio. m³ berechnet. In zwei weiteren Szenarien, einem Holzscenario und einem Szenario Waldvision liegen die Aufkommenspotenziale bei 102 Mio. m³ bzw. 70 Mio. m³ (Böttcher et al. 2018). Auch diese Szenarien werden in Kapitel 2.3.3 ausführlicher beschrieben.

Zum potenziellen Aufkommen von Nichtderbholz liegt eine Berechnung auf Grundlage des WEHAM-Basisszenarios vor. Hier wird eine Größenordnung von 4,9 Mio. m³ als verfügbares technisches Potenzial angegeben (Schier und Weimar 2018).

Grundsätzliche Schwierigkeit bei einer aktuellen Bewertung der Rohholzaufkommensmodellierungen sind die großen Kalamitäten der letzten Jahre. Diese sind in den vorliegenden Modellierungen zum potenziellen Rohholzaufkommen nicht berücksichtigt. Da die Kalamitäten besonders die Nadelbaumart Fichte betroffen haben und in den letzten Jahren zu einem Holzeinschlag geführt haben, der höher als geplant war, hat dies auch Auswirkungen auf das zukünftige potenzielle Rohholzaufkommen. Ein Vergleich der Aufkommenspotenziale zum Status quo mit der aktuellen Nutzung zeigt, dass das Gesamtvolumen des Holzeinschlags zwar im Bereich der vorliegenden Potenzialmodellierungen liegt, allerdings ist der Anteil des Nadelholzeinschlags deutlich höher als in den Potenzialmodellierungen. In den vergangenen zehn Jahren lag der Anteil von Nadelholz am Gesamteinschlag im Mittel bei 74 % (70-81 %). Der Anteil von Nadelholz am stofflich genutzten Rohholz lag im Durchschnitt der letzten zehn Jahre bei über 90 % (86-94 %). Es ist daher mit der aktuellen Datenlage kaum abzuschätzen, wie sich die Rohholzversorgung für die stoffliche, aber auch für die energetische Verwendung in Deutschland entwickeln wird.

In Ergänzung zu den Rohholzpotenzialen werden im Folgenden die Potenziale von Rest- und Abfallhölzern sowie Rinde betrachtet, die für die stoffliche und energetische Verwendung von Holzbiomassen insgesamt eine wichtige Rolle spielen. Vor allem Restholzsortimente aus der Holzbe- und -verarbeitung und Altpapier sind wichtige Rohstoffe bei der Erzeugung holzbasierter Produkte. Rinde, Ablauge aus der Zellstoffherstellung und Altholz werden derzeit überwiegend energetisch verwendet, können aber in Zukunft eine wichtige Rohstoffquelle für stoffliche Nutzungen sein.

Die in Tabelle 6 aufgeführten Potenziale der Reststoffe Sägenebenprodukte, Sonstiges Industrierestholz und Ablauge hängen direkt von der Holzverwendung in den holzbe- und -verarbeitenden Betrieben ab. Das Aufkommenspotenzial von Rinde wird abgeleitet aus den weiter oben dargestellten unterschiedlichen potenziellen Rohholzaufkommen. Dabei wird von einem Rindenanteil von etwa 10 % ausgegangen. Dieser Wert ergibt sich aus dem geometrischen Mittel des Rindenanteils von Laub- und Nadelholz (FAO et al. 2020).

Die Angaben zu den Potenzialen von Altholz (Flamme et al. 2020; Vogler et al. 2020) wurden über ähnliche methodische Ansätze aus der Abfallstatistik abgeleitet. Zu Landschaftspflegeholz und Altpapier liegen Potenzialschätzungen des DBFZ für das Jahr 2015 vor. Als Grundlage für Landschaftspflegeholz dienen Schätzungen zu Flächen, auf denen potenzielle Landschaftspflege durchgeführt wird. Angaben zu Holz aus Kurzumtriebsplantagen stellen das genutzte technische Potenzial dar (Infro e.K. 2023).

2.2.2 Landwirtschaftliche Biomasse

Autoren: David Kilian, Martin Banse | Thünen-Institut für Marktanalyse

Um die Masse der landwirtschaftlichen Primärbiomasse zu ermitteln, die im Jahr 2020 auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche Deutschlands erzeugt wurde, wurden Werte aus dem Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten genutzt und diese mit Zahlen der Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe ergänzt (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2023; Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe 2023). Die Trockenmassewerte wurden aus den in den Quellen berichteten Frischmassewerten berechnet. Berücksichtigt ist hier lediglich die landwirtschaftliche Primärbiomasse, also Biomasse, die gezielt angebaut wurde. Reststoffe, wie Getreidestroh oder Rübenblatt, die energetisch oder als Futtermittel genutzt werden, sind in der Kalkulation nicht enthalten. Diese zusätzlichen Potenziale werden in folgenden Kapiteln dargestellt. Ebenso werden bei der Erzeugung tierische Produkte (ausgenommen Honig) nicht berücksichtigt, um eine Doppelzählung zu vermeiden. Diese sind indirekt über den Futtermittelinput enthalten. Bei der Berechnung der Energiegehalte wird zwischen den Nutzungspfaden Kraftstoff (Ethanol, Biodiesel), Biogas und Festbrennstoff unterschieden. Die angegebenen Energiegehalte entsprechen dem Heizwert der Sekundärenergieträger.

Die im Jahr 2020 erzeugte Biomasse beträgt 345,6 Mt Frischmasse (FM) bzw. 114,2 Mt Trockenmasse (TM). Ganzpflanzenernte und Dauergrünland machen mit 251,6 Mt_{FM} 72,8 % der in Deutschland geernteten Frischmasse aus. Aufgrund des relativ hohen Wassergehalts dieser Biomasse ist der Anteil der Trockenmasse etwas geringer, beträgt aber mit 63,5 Mt_{TM} immer noch 55,6 % der gesamten Trockenmasse. Ein Drittel der erzeugten Trockenmasse ist Getreide (als Korn, ohne Ganzpflanzensilage) (37,2 Mt). Der Anteil des Getreides an der Frischmasse beträgt 12,5 % (dies entspricht 43,3 Mt_{FM}). Die Hackfrüchte Zuckerrüben und Kartoffeln haben zusammen mit einer geernteten Frischmasse von 40,3 Mt_{FM} einen Anteil von 11,7 % der Frischmasse und einen Anteil von 7,8 % der Trockenmasse (9,0 Mt_{TM}). Obst und Gemüse inklusive Weintrauben wurden im Jahr 2020 rund 5,9 Mt Frischmasse geerntet (Anteil 1,7 %). Aufgrund des hohen Wassergehalts der Produkte entspricht dies nur etwa 0,6 Mt Trockenmasse (Anteil 0,5 %). Öl und Eiweißpflanzen hatten mit 4,2 Mt geernteter Frischmasse einen Anteil von 1,2 % der gesamten Frischmasse und einen Anteil von 3,3 % der Trockenmasse (3,8 Mt_{TM}). Unter sonstiger Biomasse sind Festbrennstoffe wie Miscanthus, Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Hopfen und Honig sowie Rübsen zusammengefasst. Dies sind zusammen rund 0,1 Mt Frischmasse und weniger als 0,1 Mt Trockenmasse (Anteil < 0,1 %), siehe Abbildung 18.

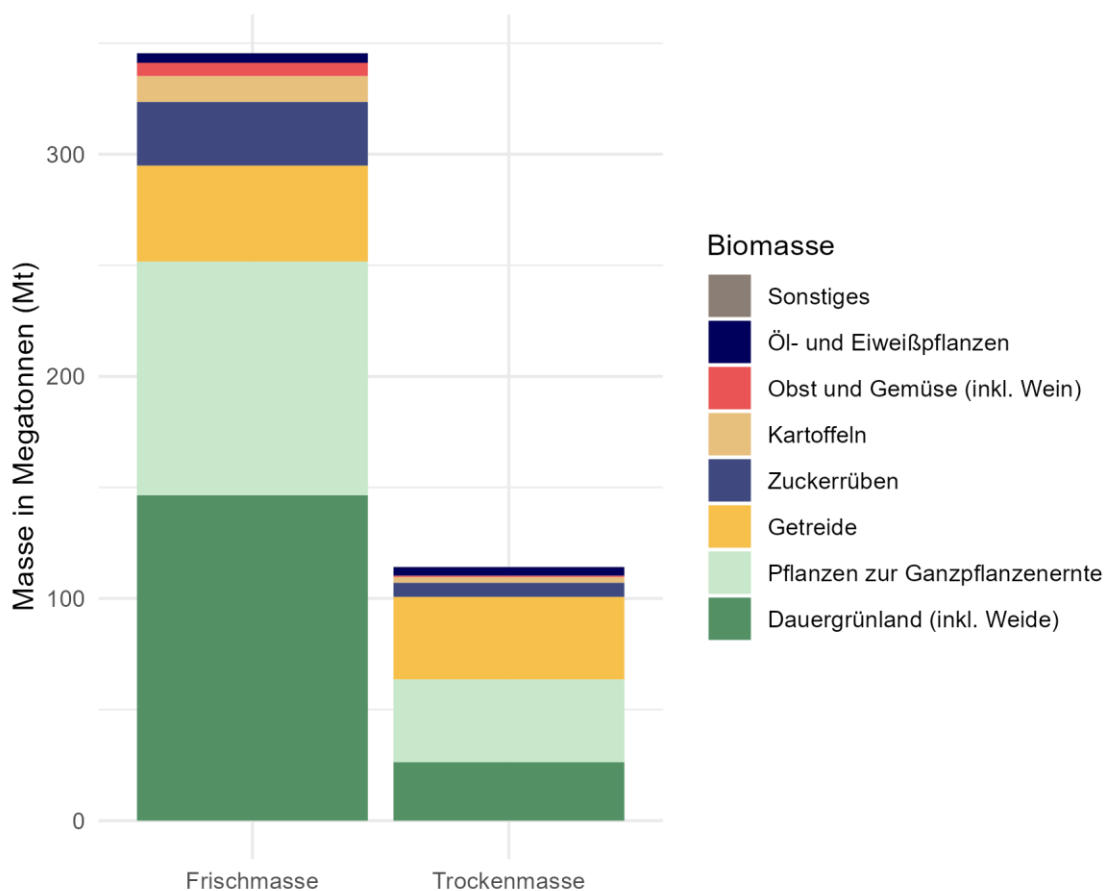


Abbildung 18: Erzeugung landwirtschaftlicher Primärbiomasse in Deutschland, 2020, in Megatonnen (Mt).
Quelle: Statistisches Jahrbuch des BMEL (2022) und Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (2023).

Im Jahr 2020 wurden in Deutschland rund 66,8 Mt_{FM} Biomasse importiert und gleichzeitig 54,4 Mt_{FM} Biomasse exportiert. Abzüglich des in der Biomasse enthaltenen Wassers ergibt sich eine Importmenge von rund 41,3 Mt_{TM}, der eine exportierte Biomasse von 35,7 Mt_{TM} gegenübersteht. Daraus ergibt sich ein Nettoimport von 5,6 Mt_{TM}. Die Importe und Exporte von Biomasse sind in Abbildung 19 dargestellt und der inländischen Produktion gegenübergestellt. Um gleiche Biomassen vergleichen zu können, sind in Abbildung 19 die mengenmäßig bedeutenden Biomassen der Pflanzen zur Ganzpflanzenernte und des Grünlands (vgl. Abbildung 18) bei der inländischen Produktion nicht berücksichtigt, da diese kaum gehandelt werden und daher auch bei den importierten und exportierten Biomassen nicht auftauchen.

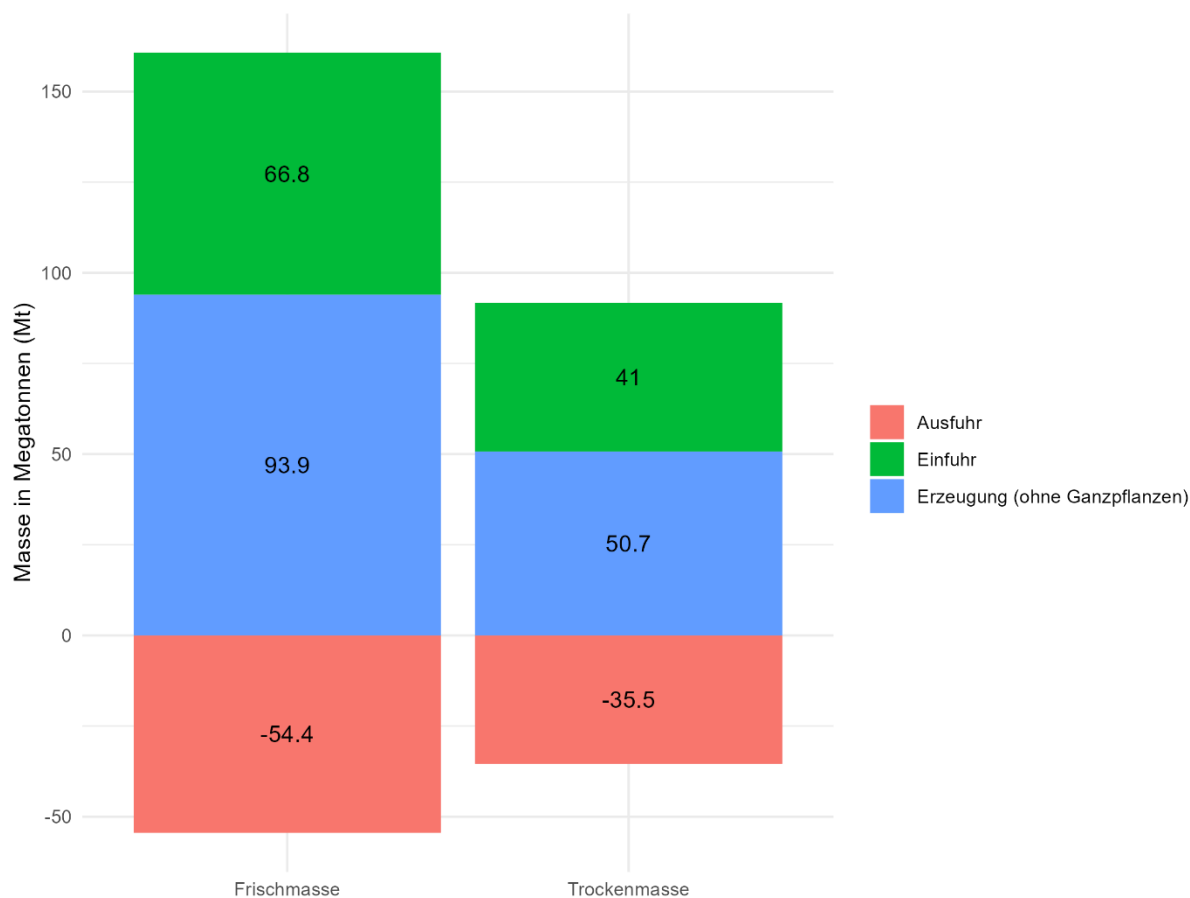


Abbildung 19: Erzeugung und Handel landwirtschaftlicher Biomasse in Deutschland, 2020, in Megatonnen (Mt).
Quelle: Statistisches Jahrbuch des BMEL (2022) und statistik.fnr.de.

Exkurs: Mögliche Anpassungen in bestehenden Fruchtfolgen bzw. agrarischen Produktionssystemen

Autor: Stefan Majer | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Die bestehenden Herausforderungen zum langfristigen Erhalt von Bodenfunktionen, der Reduktion von negativen Klimaeffekten aus der landwirtschaftlichen Produktion sowie zur Anpassung landwirtschaftlicher Produktionssysteme an die Konsequenzen des Klimawandels erfordern mittelfristig auch Adaptionen in den agrarischen Produktsystemen.

Ein mögliches Element dieser Anpassung ist die verstärkte Integration von Zwischenfrüchten in Fruchtfolgen. Potenzielle Effekte eines verstärkten Anbaus von Zwischenfrüchten im Vergleich zu konventionellen Fruchtfolgen können dabei ein verbesserter Boden- und Erosionsschutz, erhöhte Stickstofffixierung beim Anbau von Leguminosen sowie positive Effekte auf die Biodiversität im Agrarsystem sein (Kivelitz 2016; Böldt et al. 2018).

Im Zeitraum seit 2009/2010 hat sich die Anbaufläche für Zwischenfrüchte in Deutschland um mehr als 60% erhöht (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über den Anbau von Zwischenfrüchten im Zeitraum von 2009/2010 bis zum Jahr 2019/2020, differenziert nach Art des Zwischenfruchtanbaus.

Tabelle 7: Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebe mit Zwischenfruchtanbau.

(Quelle: Destatis 2021.)

| Parameter | 2019/2020 | | 2015/2016 | | 2009/2010 | |
|---|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | Betrieb | Anbaufläche | Betrieb | Anbaufläche | Betrieb | Anbaufläche |
| Zwischenfruchtanbau | 107.192 | 1.973.512 | 108.509 | 1.738.452 | 86.905 | 1.188.529 |
| Sommer- zwischenfruchtanbau | 34.216 | 447.825 | 30.662 | 307.408 | 43.565 | 420.572 |
| Gründüngung | 29.081 | 390.546 | 25.961 | 268.278 | 35.280 | 350.967 |
| Futtermittelgewinnung | 6.780 | 44.766 | 5.860 | 29.111 | 10.400 | 48.114 |
| Biomasseerzeugung zur Energiegewinnung | 816 | 12.513 | 755 | 10.019 | 1.306 | 21.492 |
| Winter- zwischenfruchtanbau | 83.613 | 1.525.686 | 88.163 | 1.431.044 | 54.214 | 767.957 |
| Gründüngung | 76.711 | 1.336.061 | 83.351 | 1.303.233 | 46.955 | 656.083 |
| Futtermittelgewinnung | 12.574 | 156.966 | 9.251 | 91.063 | 8.493 | 73.038 |
| Biomasseerzeugung zur Energiegewinnung | 1.642 | 32.659 | 1.849 | 36.748 | 1.999 | 38.835 |

2.2.3 Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe

Autor: Karl-Friedrich Cyffka | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Im Folgenden werden die Biomassepotenzialdaten zum Status quo biogener Abfälle und Reststoffe beschrieben sowie anschließend mit Daten der Studie BioRest (Fehrenbach et al. 2018) gespiegelt. Die Datenbasis bezieht sich auf den aktuellen Stand der DBFZ-Ressourcendatenbank und beinhaltet eine zeitliche Aktualisierung bis 2020 für einen Teil der Biomassen.² Fehlende Datenpunkte werden für eine Darstellung zum jetzigen Zeitpunkt teils fortgeschrieben. Der Fokus bezüglich der Datenaktualisierung bis 2020 liegt auf den 15 mengenmäßig relevantesten Biomassen (technisches Potenzial, Bezugsjahr 2015). In diesen Top 15 Biomassen sind auch holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte enthalten, welche seitens des Thünen Fachinstituts für Waldwirtschaft erarbeitet und aktualisiert werden. Hier liegt der Fokus zunächst auf dem Status quo und der Entwicklung von 2015-2020 für ausgewählte Reststoffe (Top 15 – Bezugsjahr 2015, ohne holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte, zzgl. weiterer tierischer Reststoffe/Exkremete von Rindern, Schweinen und Hühnern).

Abbildung 20 zeigt den Status quo des technischen Potenzials ausgewählter Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle (Top 15) von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}). Bei den Biomassen Altpapier (-6,7 %), Getreidestroh (-12,3 %) und Reststoffe von Ölmühlen (-6,4 %) ist in diesem Zeitraum eine fallende Entwicklung zu verzeichnen. Mengenmäßig ist vor allem der Rückgang von Getreidestroh (-1,7 Mio. t_{TM}) hervorzuheben, welcher im Vergleich zum Jahr 2015 durch eine gesunkene Anbaufläche sowie niedrigere Erträge (auch aufgrund von Dürre) bedingt ist. Dagegen gab es einen geringen Anstieg bei den Biomassen Biogut aus privaten Haushalten (+4,3%) sowie Grüngut (+5,6%). Das technische Potenzial des biogenen Anteils von Abwässern sowie Holz von Landschaftspflegeflächen ist dagegen weitestgehend konstant.

² Die Daten werden demnächst auch in der DBFZ-Ressourcendatenbank online verfügbar sein, sind es aber zum jetzigen Zeitpunkt (07/2023) noch nicht: <https://webapp.dbfz.de/resource-database/?lang=de>.

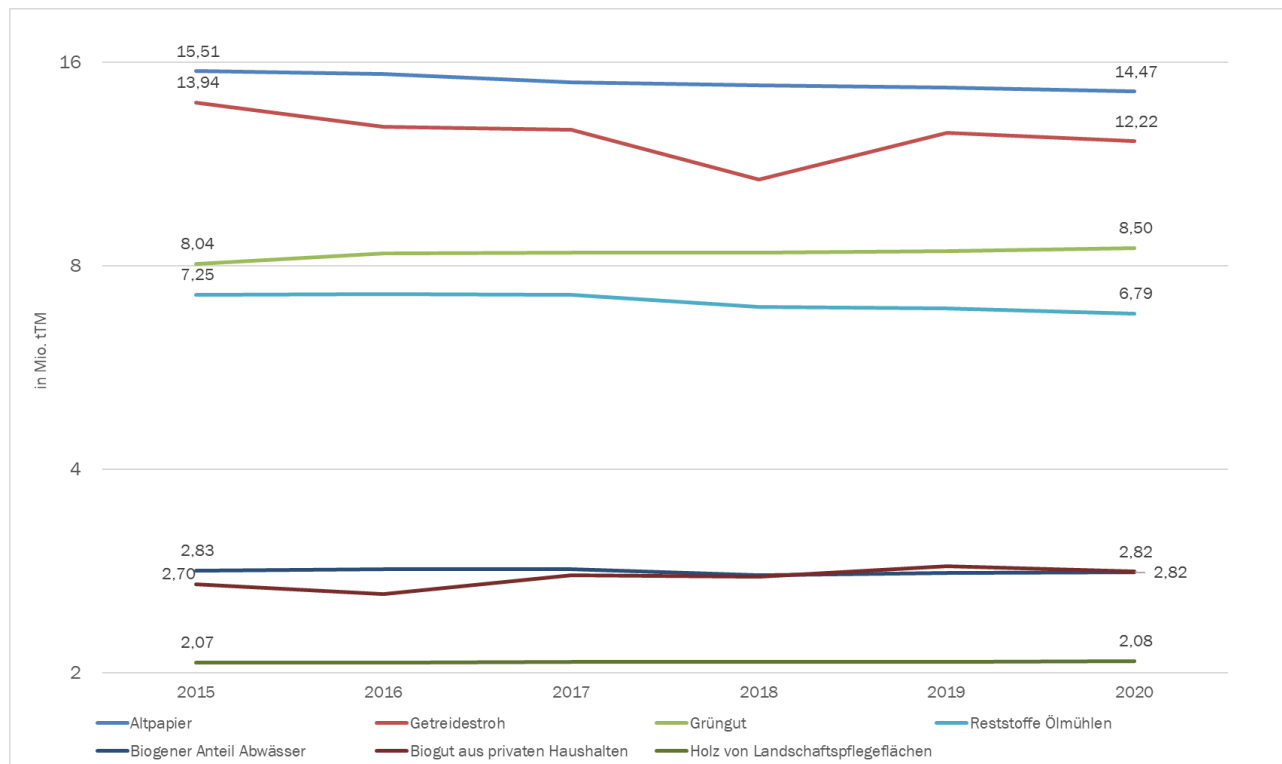


Abbildung 20: Status quo des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15) von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) – Mittelwerte.

Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), eigene Darstellung.

Der Status quo des technischen Potenzials tierischer Exkremente von Rindern, Schweinen und Hühnern (in Mio. Tonnen Trockenmasse [t_{TM}]) weist im Zeitraum von 2015 - 2020 mehrheitlich eine abnehmende Tendenz auf (siehe Abbildung 21). Aufgrund der sinkenden Rinderzahlen und veränderter Haltungformen sind die technischen Biomassepotenziale von Rindermist (-16,7%), Rindergülle (-5,6%) und Rinderjauche (-17,6%) gesunken. Die zeitliche Entwicklung von Schweinemist (-34,3%), Schweinegülle (-5,7%) und Schweinejauche (-33%) zeigt einen noch stärkeren anteiligen Rückgang für Exkremente auf. Grund dafür ist, neben den rückläufigen Tierzahlen, die seit 2015 leicht rückläufige strohbasierende Haltung bei Schweinen und Rindern (insgesamt) (Vos et al. 2022). Zu bedenken ist, dass die Schweinezahlen von 2020 bis 2022 nochmal um rund 3,2 Mio. Tiere (-12,5%) gesunken sind (Destatis 2022c), was in den gegenwärtigen Daten noch nicht dargelegt ist.

Weitere und detailliertere Daten des technischen Biomassepotenzials im zeitlichen Verlauf (2015-2020) der zuvor beschriebenen Biomassen sind in Anhang I zu finden. In der Gesamtschau ist für die Biomassen somit ein leicht rückläufiger Trend festzustellen.

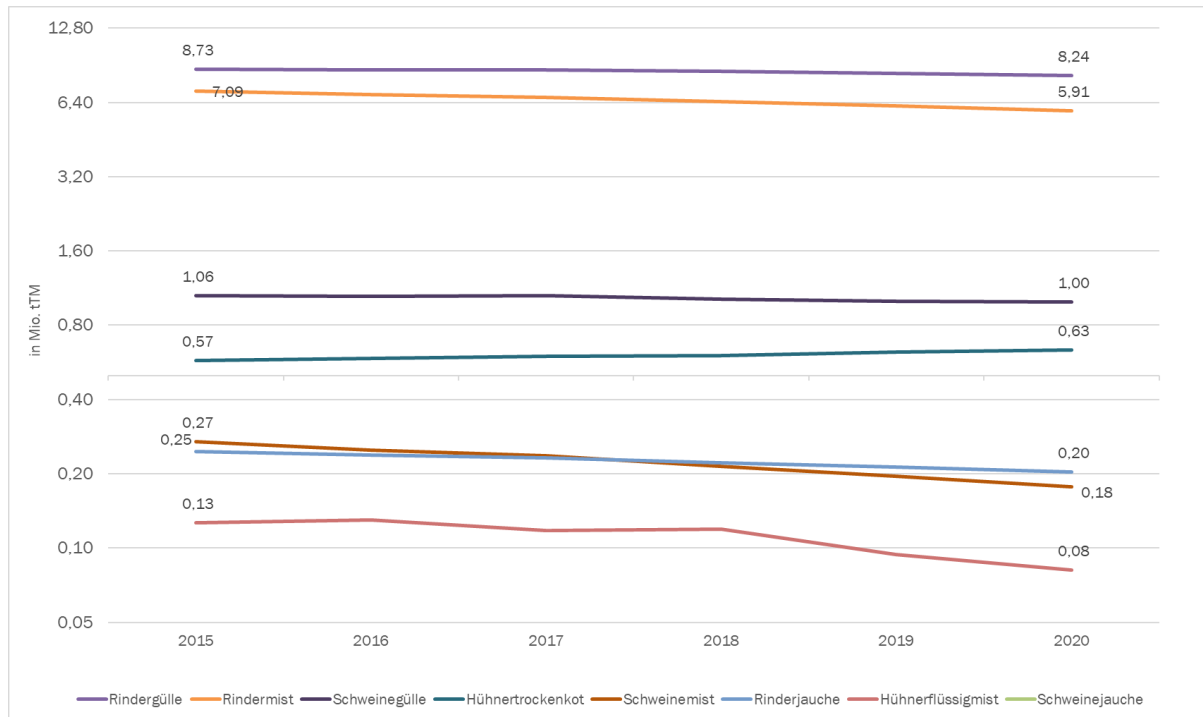


Abbildung 21: Status quo des technischen Potenzials tierischer Exkremente von Rindern, Schweinen und Hühnern von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) – Mittelwerte.

Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), eigene Darstellung.

Im Folgenden werden die oben beschriebenen Daten der DBFZ-Ressourcendatenbank mit den Ergebnissen der BioRest-Studie (Fehrenbach et al. 2018) gespiegelt. Dafür ist zunächst eine qualitative Einordnung hinsichtlich der verwendeten Biomassepotenzialmethodik der jeweiligen Studie notwendig (Brosowski 2021; Brosowski et al. 2019). Tabelle 8: Qualitative Vergleichsübersicht der Biomassepotenzialmethodik – BioRest und DBFZ-Ressourcendatenbank fasst die wichtigsten Elemente der Studien überblickartig zusammen. Insgesamt werden in der BioRest-Studie 24 Biomassen (teils zusammengefasst, daher weniger) analysiert, wobei es sich dabei vor allem um Abfälle und Reststoffe sowie um Waldholz (Derbholz) handelt. Die DBFZ-Ressourcendatenbank beinhaltet dagegen Potenziale biogener Abfälle und Reststoffe von insgesamt 77 Einzelbiomassen. Wenngleich die Studien übergreifend die gleichen Sektoren berücksichtigen, so wurden manche Einzelbiomassen in der BioRest-Studie bereits zusammengefasst. Feste industrielle Substrate (Reststoffe aus der Lebens- und Genussmittelindustrie) bilden beispielsweise eine Kategorie, wobei die DBFZ-Datenbank 23 industrielle Reststoffe ausweist. Gemeinsamkeiten der Studien bestehen darin, dass sich beide auf nationale Potenziale in Deutschland (NUTS-0) beziehen. Die Studien bilden allerdings unterschiedliche Bezugsjahre ab, denn die BioRest-Studie quantifiziert Potenziale für 2020 und schätzt Zukunftspotenziale für die Jahre 2030 und 2050. Für die Potenziale in 2020 fasst die BioRest-Studie verschiedene Einzelstudien (mit unterschiedlichen Bezugsjahren, ab 2004) für die jeweiligen Biomassen als Metastudie zusammen und stellt somit keine eigenständige Potenzialerhebung dar. Die Potenzialdaten für die Jahre 2030 und 2050 schließen zudem Kriterien für eine zukunftsorientierte Potenzialentwicklung ein, welche zusätzlich naturschutzfachliche und ökologische Restriktionen sowie Aspekte der Kaskadennutzung einbeziehen. Diese zusätzlichen Restriktionen reduzieren das Angebot für die jeweiligen Biomassen. Die Studie bietet bzw. nutzt jedoch keine direkte Datengrundlage (wie z. B. eine Modellierung) um das Angebot der Potenziale in 2030 und 2050 zu schätzen. Stattdessen wird basierend auf den Potenzialdaten für das Jahr 2020, welche sich wie beschrieben jedoch auf ältere Potenzialstudien (z. B. bei Stroh: Publikationen von 2004-2015) beziehen, unter Einbezug bestimmter Restriktionen ein zukünftig erschließbares Potenzial

„angenommen“. Dieses wird als technisch-ökologisch erschließbares Potenzial bezeichnet. Stoffliche Bedarfsanstiege im Holzbau (Holzbauquote), der Chemieindustrie (teilweiser Ersatz fossiler Kohlenstoffe) sowie im Pflanzenbau (Torfersatzstoffe) werden in der BioRest-Studie nicht berücksichtigt. Teilweise sind bereits erweiterte (über gesetzliche Vorgaben) Nachhaltigkeitsanforderungen integriert, wie z. B. der kategorische Ausschluss von Nicht-Derbholz (Waldrestholz), obwohl diese Biomasse derzeit zum Teil energetisch genutzt wird.

Tabelle 8: Qualitative Vergleichsübersicht der Biomassepotenzialmethodik – BioRest und DBFZ-Ressourcendatenbank.
Quelle: Brosowski 2021; Brosowski et al. 2019; Fehrenbach et al. 2018.

| | | BioRest-Studie | DBFZ-Ressourcendatenbank |
|----------------------------|----------------|---|---|
| Biomasse | Biomassearten | Potenziale biogener Abfälle und Reststoffe & Waldholz (Derbholz ohne Waldrestholz), insgesamt 23 Einzelbiomassen | Potenziale biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle, insgesamt 77 Einzelbiomassen |
| | Sektoren | <ul style="list-style-type: none"> Forstwirtschaft Koppel- und Abfallprodukte der Holz- und Papierwirtschaft Landwirtschaft Kommunale und gewerbliche biogene Abfälle und Reststoffe Stoffströme aus der Landschaftspflege Industrielle biogene Abfälle | <ul style="list-style-type: none"> Holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte Industrielle Reststoffe Landwirtschaftliche Nebenprodukte Reststoffe von sonstigen Flächen Siedlungsabfall und Klärschlamm |
| Raumbezug | Scope | DE | DE |
| | Auflösung | National, NUTS-0 | National, NUTS-0 |
| Zeitbezug | Zeitraum | 2020, 2030, 2050 | 2015, für wenige Biomassen bis 2020 (weitere in Bearbeitung) |
| | Auflösung | Einzeljahr | Einzeljahr |
| | Datenquellen | ab 2004, verschiedene Einzelstudien je Biomasse | Unterschiedlich je Biomasse: Dynamische Bezugsdaten (z. B. Produktion Agrar und Tierzahlen) für das Jahr 2015 Statische Bezugsdaten (z. B. Korn-Stroh-Verhältnis oder andere) v.a. 2014-2018 und somit aktuell, vereinzelt älter ab 2006 |
| Potenzial allgemein | Potenzialebene | Technisch-ökologisch erschließbares Potenzial | 10 Potenzialebenen: u. a. technisches Potenzial, energetisch und stofflich genutztes Potenzial sowie mobilisierbares Potenzial |
| | Szenarien | <ol style="list-style-type: none"> Modell „BAU“ (business as usual) – als Mischung aus den derzeit existierenden und rechtlich bindenden mit freiwilligen Restriktionen Modell „MER - Mit erweiterten Restriktionen“ | Keine Szenarien, jedoch min-/max-Bandbreiten (Ausdruck für statistische Unsicherheiten) |
| | Einheiten | Tonne Frischmasse (tFM) bzw. Bioenergiepotenzial (PJ) | Tonne Trockenmasse (t _{TM}) bzw. Bioenergiepotenzial (PJ) |

Die in der DBFZ-Datenbank genutzten statistischen Daten, welche die Grundlage für die Biomassepotenzialberechnungen bilden, basieren – soweit möglich – dagegen auf dem jeweils referenzierten Bezugsjahr. Für fehlende Datenpunkte bzw. Jahre ist es teils erforderlich, dass diese interpoliert werden. Derzeit bildet das Bezugsjahr der DBFZ-Datenbank vor allem das Jahr 2015 ab, die Erstellung der Daten für die Bezugsjahre von 2010-2020 befindet sich in Arbeit, wovon ein erster Ausschnitt zuvor (sowie im Anhang I) dargelegt ist. Die Systematik der DBFZ-Ressourcendatenbank (Brosowski et al. 2019; Brosowski 2021) beinhaltet 10 Potenzialebenen, wie zum Beispiel das technische Potenzial, das energetisch bzw. stofflich genutzte Potenzial sowie das mobilisierbare Potenzial. Der Kern der Methodik besteht darin, dem Biomasseangebot (technisches Potenzial) die Biomassenutzung (genutztes technisches Potenzial) gegenüberzustellen, um so ein mobilisierbares (ungenutztes) Potenzial abschätzen zu können.

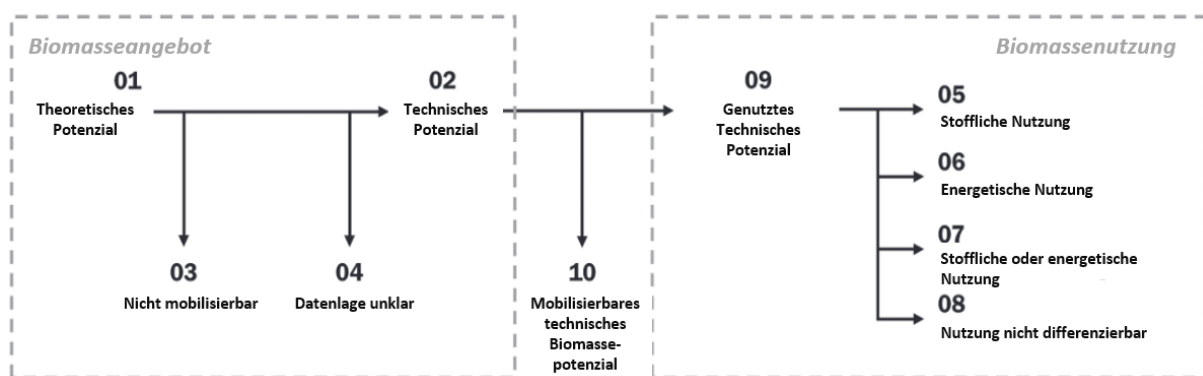


Abbildung 22: Übersicht der Schlüsselinformationen des Stoffstroms innerhalb des Ressourcenmonitorings für biogene Abfälle und Reststoffe.
 Quelle: Brosowski 2021.

Ein weiterer Unterschied zwischen der BioRest-Studie und der DBFZ-Ressourcendatenbank besteht darin, dass in der BioRest-Studie zwei Szenarien (BAU und MER – „Mit erweiterten Restriktionen“) abgebildet werden. In der DBFZ-Ressourcendatenbank werden lediglich min-/max-Bandbreiten der Biomassepotenziale quantifiziert, welche sich aus den statistischen Unsicherheiten der Datengrundlagen ergeben und zugleich Ausdruck dafür sind (Brosowski et al. 2019). Die Vergleichbarkeit der Daten der Studien ist erschwert, da die Daten in der BioRest-Studie vor allem in Tonnen Frischmasse (t_{FM}) ausgewiesen sind und so ein Vergleich zu den Daten der DBFZ-Ressourcendatenbank (t_{TM}) nicht direkt möglich ist. Insgesamt weisen die zwei Datengrundlagen somit auf verschiedenen Ebenen teils Unterschiede und teils Gemeinsamkeiten hinsichtlich der angewendeten Methodik auf.

Nach erfolgter methodisch-qualitativer Gegenüberstellung folgt nun ein quantitativer Vergleich von Daten für eine Auswahl (Top) von Biomassen. Zunächst ist ein direkter Vergleich nicht möglich, da entsprechende Daten wie oben beschrieben in unterschiedlichen Einheiten (Tonne Frischmasse und Trockenmasse) ausgegeben sind. Um die Daten aus der BioRest-Studie vergleichbar zu den Daten in der DBFZ-Ressourcendatenbank zu machen, wurden Trockenmassegehalte (TM-Gehalte) bzw. Wassergehalte der einzelnen Biomassen in den zitierten Quellen der jeweiligen Biomassepotenzialstudien recherchiert und bei Bedarf um Daten aus der Ressourcendatenbank erweitert. In Tabelle 9 sind die Potenzialdaten ausgewählter (Top) Biomassen (in Mio. t_{TM}) gemäß DBFZ-Ressourcendatenbank und der BioRest-Studie gegenübergestellt. Die Potenziale aus der DBFZ-Ressourcendatenbank sind in ein technisches Potenzial aufgeschlüsselt (2015, 2020, ø 2015-2020). Zudem wird ein technisches Potenzial (2020) abzüglich des stofflich genutzten Potenzials der jeweiligen

Biomassen berechnet. Die stofflichen Nutzungsabzüge werden auf Basis von aktuellsten Datenpunkten bzw. Durchschnittswerten (2015-2020) vorgenommen. Letztere Potenzialdarstellung wurde gewählt, um eine bessere Vergleichbarkeit zu den Daten aus der BioRest-Studie herzustellen, da es sich dort um ein energetisch erschließbares Potenzial (also abzüglich stofflicher Nutzungen, jedoch nicht vollständig) handelt. Für Altpapier ist kein Datenvergleich möglich, da diese Biomasse nicht in der BioRest-Studie aufgeführt ist. Für Getreidestroh liegen die Ergebnisse in einem ähnlichen Rahmen. Hervorzuheben ist, dass sich die Daten der BioRest-Studie auf Daten in Publikationen von 2012 und 2014 beziehen und somit nicht mehr aktuell sind. Zudem wird angenommen, dass Stroherträge steigen, sich etwaige Potenzialsteigerungen jedoch mit höheren Bedarfen (Einstreu) in der Tierhaltung ausgleichen. Beide Annahmen werden nicht weiter quantitativ unterlegt und sind daher zu hinterfragen. Im Szenario mit erweiterten Restriktionen (MER) wird die Annahme getroffen, dass im Ökolandbau Stroh verstärkt zum Humusaufbau benötigt wird. Diese Annahme ist richtig und greift zugleich zu kurz. Es bleibt unberücksichtigt, dass das Stroh zuvor auch einer Vergärung zugeführt und anschließend als Gärrest zum Erhalt der Humusbilanz zurückgeführt werden könnte (Möller et al. 2020; Brosowski et al. 2020). (Witing et al. 2018) weisen dahingehend darauf hin, dass in Gebieten mit Gärrestrückführung (Biogas-Fingerprint-Gebiet) ein höherer Kohlenstoffeintrag in den Boden als in umliegenden landwirtschaftlichen Flächen nachgewiesen werden konnte, was auf den hohen Beitrag von Gärresten und Ernterückständen (insbesondere landwirtschaftliches Gras) zurückzuführen ist. Die Nutzung von Agrarresten kann daher als eine Art Kaskade bezeichnet werden, wenn anschließend der Gärrest in einem ausreichenden Maß zum Erhalt der Humusbilanz zurückgeführt wird. Langzeitstudien sollten entsprechende Effekte auf Agrarböden dahingehend weiterführend untersuchen. Eine Review-Studie von verschiedenen europäischen Biomassepotenzialstudien für Bioenergie (Mandley et al. 2020, S. 10) zeigt zudem mögliche Potenziale von agrarischen Reststoffen anhand eines einfachen Vergleichs auf. So wurde im Jahr 2013 rund 70 % der Bioenergienachfrage in der EU durch forstwirtschaftliche Rohstoffe und 17 % aus Rohstoffen der Landwirtschaft gedeckt. In der Review-Studie wird jedoch gleichzeitig festgestellt, dass sich das lokale (inländische EU-Biomasse-) Angebot sowohl 2030 als auch 2050 zu 29-50 % aus forstwirtschaftlichen und zu 30-70 % aus landwirtschaftlichen Rückständen und Energiepflanzen zusammensetzt. Daher könnte es zunehmend zu einem Missverhältnis zwischen dem heimischen Angebot und der Nachfrage in der EU kommen, wenn nicht bedeutende strukturelle Veränderungen in den Sektoren der Bioenergienachfrage in der EU stattfinden, die von der starken Abhängigkeit von forstwirtschaftlichen Rohstoffen wegführen (Mandley et al. 2020, S. 10).

Die Potenziale für Grüngut der BioRest-Studie und der DBFZ-Daten unterscheiden sich neben einem unterschiedlichen Zeitbezug aus folgendem Grund: Die DBFZ-Daten weisen statistisch erfasste sowie nicht erfasste Anteile aus, während die BioRest-Studie nur erfasste Anteile darstellt. Insbesondere die Mobilisierung von nicht erfassten Anteilen (Stichwort Anschlussgrad Biotonne) ist dahingehend hervorzuheben, wenngleich entsprechende Bemühungen ihre Grenzen haben. Die Potenziale von Reststoffen aus Ölmühlen werden seitens DBFZ als höher eingeschätzt, wenngleich DBFZ sowie BioRest entsprechende Potenziale als vollständig in Nutzung einschätzt. Die Biomassekategorie biogener Anteil (industrieller) Abwässer heißt in der BioRest-Studie industrieller Klärschlamm, wobei unklar ist, inwiefern diese das Gleiche ausdrücken. Bei der Kategorie biogener Anteil (industrieller) Abwässer handelt es sich um die biogene Fracht von Abwässern (oTS-Gehalt Abwasser), während die Kategorie in der BioRest-Studie Klärschlamm ausweist. Die Potenziale für Biogut sind dagegen wieder sehr ähnlich und unterscheiden sich nur minimal. Die Potenziale von Landschaftspflegeholz unterscheiden sich deswegen, weil in dieser Biomasse in den DBFZ-Daten im Vergleich zur BioRest-Studie (nur Straßenbegleitholz) mehr Landschaftspflegeflächen (z. B. Bahnstreckenbegleitholz, Wasserwege, Heide- und Moorflächen)

berücksichtigt wurden. Die Vergleichbarkeit der Daten für tierische Exkremamente ist generell zu hinterfragen, da sich die Daten der BioRest-Studie auf eine ältere Studie des DBFZ (Brosowski 2015) bezieht, welche Daten für das Bezugsjahr 2010 ausweist. Seitdem wurden entsprechende Methoden zur Potenzialanalyse von tierischen Exkrementen weiterentwickelt, wobei zum Beispiel Daten zur Weidezeit sowie Haltungsformen mittlerweile tierspezifischer aufgeschlüsselt werden. Insbesondere langfristig wird in der BioRest-Studie eine erhöhte strohbasierte Haltung aufgrund von Ökolandbau angenommen. Wie vorher beschrieben ist zumindest seit 2015 ein rückläufiger Trend der strohbasierten Haltung festzustellen. Zudem fehlen valide Analysen, inwiefern der Faktor von reduzierten Tierzahlen oder der Faktor Steigerung einer strohbasierten Haltung für den Gesamtbedarf von Stroheinstreu überwiegt (dazu weiter unten mehr).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass eine Vergleichbarkeit der Daten nicht vollends gewährleistet ist. Bei größeren Unterschieden hinsichtlich der Potenziale gibt es dafür jedoch, wie oben ausgeführt, Gründe. Insbesondere die langfristigen Potenzialangaben der BioRest-Studie sind wie viele Langfrist-Potenziale jedoch mit Vorsicht zu genießen. Dies trifft hier insbesondere zu, da die Datengrundlagen der Potenziale für 2020 und somit auch für die Zukunftspotenziale oft weitaus älter sind. Die Bestimmung von zukünftigen Potenzialen (z. B. von europäischen Potenzialstudien) findet daher meist anknüpfend an Modellierungen wie CAPRI (Common Agricultural Policy Regionalised Impact Modelling System) statt. Zudem sind in der BioRest-Studie zukünftig mögliche stoffliche Nutzungsansprüche nicht berücksichtigt, welche im Fall von Waldholz bereits jetzt eine hohe Relevanz (Beispiel UPM Leuna: 500.000 Tonnen Buchenholz pro Jahr ab 2023) haben.

Tabelle 9: Quantitative Vergleichsübersicht von Potenzialen ausgewählter Biomassen – DBFZ-Ressourcendatenbank und BioRest.

| Potenzialebene - in Mio. tTM | DBFZ-Ressourcendatenbank | | | | BioRest BAU | | | BioRest MER | | |
|--|-------------------------------------|------|-------------|--|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Technisches Potenzial (Mittelwerte) | | | Technisches Potenzial (2020) abzgl. stofflich genutztes Potenzial* | Energetisch erschließbares Potenzial | | | | | |
| Bezugsjahr | 2015 | 2020 | Ø 2015-2020 | 2015-2020* | 2020 | 2030 | 2050 | 2020 | 2030 | 2050 |
| Altpapier | 15,5 | 14,5 | 15,0 | 0,8 | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a |
| Getreidestroh | 13,9 | 12,2 | 12,5 | 7,8 | 11,2 | 11,2 | 11,2 | 10,7 | 9,5 | 9,5 |
| Grüngut | 8,0 | 8,5 | 8,3 | 5,1 | 2,6 | 2,8 | 2,8 | 3,0 | 3,3 | 3,5 |
| Reststoffe Ölmühlen | 7,3 | 6,8 | 7,1 | 0,0 | 4,2 (100% Nutzung) | 4,2 (100% Nutzung) | 4,2 (100% Nutzung) | 4,2 (100% Nutzung) | 4,2 (100% Nutzung) | 4,2 (100% Nutzung) |
| Biogener Anteil Abwässer/ind. Klärschlamm | 2,83 | 2,82 | 2,82 | 2,82 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 | 0,71 |
| Biogut | 2,7 | 2,8 | 2,8 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 2,4 | 2,5 | 2,6 |
| Landschaftspflege Holz | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Gülle | 9,9 | 9,3 | 9,7 | 9,3 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 6,7 | 5,8 | 5,8 |
| Jauche | 0,26 | 0,21 | 0,23 | 0,21 | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a | n/a |
| Mist | 7,9 | 6,7 | 7,4 | 6,7 | 6,2 | 6,2 | 6,2 | 9,2 | 12,1 | 12,1 |

* Stoffliche Abzüge auf Basis von aktuellsten Datenpunkten bzw. Durchschnittswerten (2015-2020)

2.3 Trends und Entwicklungen der Flächen- und Biomasseverfügbarkeiten

2.3.1 Entwicklung der Waldfläche

Autor: Jörg Schweinle | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 beschrieben, hat sich die Waldfläche seit 1990 nur wenig verändert. Schreibt man den Trend der letzten Jahrzehnte fort, kann mit einer Vergrößerung der Waldfläche von rund 20.000 ha pro Jahr gerechnet werden. Ausgehend von 11,42 Mio. ha im Jahr 2012, würde die Waldfläche derzeit rund 11,44 Mio. ha betragen, im Jahr 2030 rund 11,84 Mio. ha und im Jahr 2050 rund 12 Mio. ha. Die für das Jahr 2024 erwarteten Ergebnisse der 4. Bundeswaldinventur werden zeigen, ob der seit 1990 beobachtete Trend anhält.

Die leicht zunehmende Waldfläche ist im Wesentlichen durch die Regelungen des § 9 des Bundeswaldgesetzes (BWaldG) zum Walderhalt begründet. Die Rodung von Wald bedarf demnach einer Genehmigung. Diese Genehmigungen werden äußerst restriktiv gehandhabt und sind i. d. R. mit der Auflage einer Ersatzaufforstung verbunden. So werden Waldumwandlungen für Siedlungs- und Straßenbau sowie für Windkraftanlagen durch Erstaufforstungen an anderer Stelle kompensiert.

Die Vergrößerung der Waldfläche ist auf europäischer Ebene sowohl in der EU-Waldstrategie als auch in der EU-Biodiversitätsstrategie erklärtes Ziel. Auf nationaler Ebene wird mit dem Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz der Bundesregierung die jährliche Erstaufforstung von 10.000 ha naturnahen Waldes angestrebt. Neben wirtschaftlichen Überlegungen (höhere Rentabilität anderer Flächennutzung) sind die im § 9 des BWaldG formulierten strikten Regelungen zum Walderhalt allerdings nur geringer Anreiz für Grundeigentümer, Wald anzulegen.

Wie die Jahre 2018-2021 gezeigt haben, ist Wald in Deutschland durch die Auswirkungen des Klimawandels bedroht. Um großflächigem Waldverlust entgegenzuwirken, ist der Umbau zu resilienteren, klimastabilen Waldbeständen sowie die schnelle Wiederbewaldung der durch Hitze und Borkenkäferbefall geschädigten Waldflächen unerlässlich. Dafür stellt die Bundesregierung im Rahmen des Klimaschutzprogramms 2030 rund 480 Millionen € für private und kommunale Waldeigentümer zur Verfügung. Durch Kofinanzierung der Bundesländer stehen bis zum Ende dieses Jahres insgesamt sogar 800 Mio. € zur Verfügung.

Trotz der wahrscheinlich weiterhin leicht zunehmenden Waldfläche ist damit nicht zwangsläufig auch ein höheres Rohholzaufkommen verbunden. Die o. a. nationalen und internationalen Politikziele haben eher den gegenteiligen Effekt (s. 2.2.1).

2.3.2 Holzbiomasse sowie Rinde

Autor:innen: Susanne Iost, Sebastian Glasenapp, Christian Morland, Holger Weimar | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Das zukünftige Rundholzpotenzial (Derbholz) für Deutschland wird in der vorhandenen Literatur fast ausschließlich mittels szenarienbasierter Modellierungen geschätzt. Auf diese Weise ermittelte Potenziale können nur im Kontext der zugrundeliegenden Szenarien verstanden werden. Die Analyse von Szenarien zielt darauf ab, alternative Versionen möglicher Zukünfte zu untersuchen. Szenarien sind

daher nicht als Prognosen zu interpretieren, sondern beschreiben Zukünfte, wie sie unter bestimmten Rahmenbedingungen sein könnten („what if“; vgl. z. B. Jonsson et al. 2018).

Die Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) liefert für drei verschiedene Szenarien zur zukünftigen Waldbewirtschaftung Informationen zum potenziellen zukünftigen Rohholzaufkommen (Rock et al. 2016a; Oehmichen et al. 2018). WEHAM nutzt ein empirisches abstandsunabhängiges Einzelbaumwuchsmodell. Es bildet Wachstum und Behandlung von Wald und die Sortierung des anfallenden Rohholzes über einen Zeitraum von 40 Jahren ab (Rock et al. 2016a). Nach Abschluss der dritten Bundeswaldinventur (BWI) wurde von Fachleuten aus Bundes- und Landesinstitutionen das WEHAM-Basisszenario entwickelt (Rock et al. 2016a). Das Szenario beschreibt die erwartete wahrscheinlichste künftige Bewirtschaftung des Waldes in Deutschland, in der Wachstum der Bäume, Waldbehandlung in den verschiedenen Bestandsphasen und Sortierung des entnommenen Holzes in ihrer bisherigen Form weitergeschrieben werden. Das WEHAM-Basisszenario bildet die zum Zeitpunkt der Szenarienerstellung übliche waldbauliche Praxis aufgrund der Erfahrung der vorherigen Jahre und der Erwartungen an die kommenden Jahre nach (Rock et al. 2016a), z. B. werden Umtriebszeiten sowie der Anteil von Laub- und Nadelholz ab 2012 konstant fortgeschrieben. Die Bildung von Totholz wird nicht in die Berechnung des zukünftigen potenziellen Aufkommens einbezogen. Einfluss von Witterung und Klima oder Störungen (Sturm, Insekten, Waldbrand) werden nicht abgebildet. Weiterhin berücksichtigt das Szenario keine Einzelinteressen von Waldeigentümern, Sonderstandorte oder individuelles Marktverhalten. Es ist kein Prognoseinstrument, sondern es wird das potenzielle Rundholzaufkommen, das theoretisch geerntet werden könnte, modelliert. Die Ausgangslage für die Modellierung bildet der Waldzustand, wie er sich aus den Daten der dritten Bundeswaldinventur (BWI) darstellt. Die BWI ist eine terrestrische Stichprobeninventur, die zuletzt im Laufe der Jahre 2011 und 2012 durchgeführt wurde (Rock et al. 2016b). Die Erhebungen für die vierte Bundeswaldinventur wurden in 2021 und 2022 durchgeführt; die Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgt voraussichtlich im vierten Quartal 2024 (Thünen-Institut 2023a).

Oehmichen et al. 2018 entwickelten unter Einbeziehung unterschiedlicher Anspruchsgruppen zwei alternative Szenarien zur zukünftigen Bewirtschaftung des Waldes: das Holzpräferenzszenario (HPS) und das Naturschutzpräferenzszenario (NPS) und modellierten für diese dann das potenzielle Rundholzaufkommen mit WEHAM. Das HPS geht von einem aktuell hohen stehenden Holzvorrat aus, der abgesenkt wird, um das Rohholzangebot zu erhöhen und so die steigende Nachfrage nach heimischem Holz zu decken. Die Reduzierung der Holzvorräte erfolgt in Verbindung mit kürzeren Umtriebszeiten und geringeren Zielstärken. Weiterhin wird im HPS die ertragreiche Nadelbaumart Douglasie waldbaulich gefördert. Die Annahmen zu Nutzungseinschränkungen entsprechen denen des WEHAM-Basisszenarios. Das NPS zielt auf Erhalt und Förderung des Biodiversitäts- und Klimaschutzes im Wald ab (ebd.). Die Baumartenzusammensetzung wird an die heutige potenziell natürliche Vegetation (hpnV) angenähert. Die Umtriebszeiten von Fichte und Kiefer an nicht natürlichen Standorten werden verkürzt und so der Nadelholzanteil reduziert. Vor allem die Absenkung der Umtriebszeiten für Nadelholzbaumarten an nicht natürlichen Standorten hat zur Folge, dass das projizierte Rohholzpotenzial zunächst ansteigt, um dann ab der Modellierungsperiode 2023-2027 abzusinken. Der Laubholzanteil steigt durch gezielte Verjüngung an. Die Umtriebszeiten werden überwiegend verlängert und somit auch der Holzvorrat in Altbeständen vergrößert. Zusätzlich zu den bereits geschützten Flächen werden weitere 5-10 % der Waldfläche aus der Nutzung genommen. Für diese beiden alternativen Szenarien wurde die Totholznachlieferung berücksichtigt; das dafür notwendige Modul wurde ergänzend zu WEHAM entwickelt (Gerber et al. 2018).

Abbildung 23 zeigt die Entwicklung des potenziellen Rundholzaufkommens in den drei Szenarien für den Modellierungszeitraum. Für die Modellierungsperiode 2047-2052 beträgt das potenzielle Rundholzaufkommen im Basisszenario 78,2 Mio. m³, im HPS 86,4 Mio. m³ und im NPS 76,2 Mio. m³.

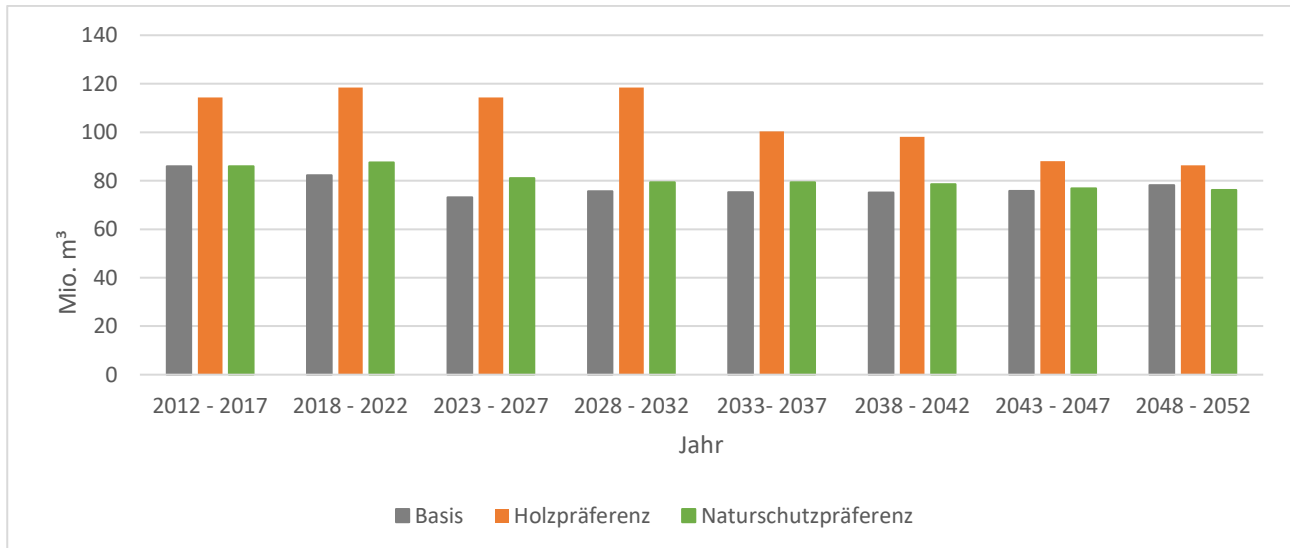


Abbildung 23: Potenzielles Rundholzaufkommen nach WEHAM im Zeitraum 2012 – 2052 in Mio. m³ (Efm ohne Rinde).
Quelle: eigene Darstellung basierend auf Rock et al., 2016; Oehmichen et al., 2018.

Im Basisszenario sinkt das potenzielle Rohholzaufkommen bis zum Zeitraum 2023-2027 und steigt danach wieder leicht an, bleibt aber für 2048-2052 unter dem Wert für 2012-2017. Dieser Wert liegt im Bereich des Rohholzeinschlags in Deutschland seit 2018 (vgl. TI-WF 2023). Im NPS hat vor allem die Absenkung der Umtriebszeiten für Nadelholzbaumarten an nicht natürlichen Standorten zur Folge, dass das projizierte Rohholzpotenzial zunächst ansteigt, um dann ab der Modellierungsperiode 2023-2027 abzusinken (Oehmichen et al. 2018). Das HPS geht von einem aktuell hohen stehenden Holzvorrat aus, der abgesenkt wird, um das Rohholzangebot zu erhöhen und so die steigende Nachfrage nach heimischem Holz zu decken. Daher liegen die projizierten Rohholzaufkommen bis 2028-2032 deutlich über dem Potenzial in Basis- und Naturschutzpräferenzszenario. Im weiteren Verlauf sinkt das potenzielle Aufkommen deutlich, bleibt aber über den Mengen der beiden anderen Szenarien. Dies kann u. a. mit der waldbaulichen Förderung der ertragreichen Nadelbaumart Douglasie in diesem Szenario begründet werden. Die Unterschiede zwischen HPS und NPS lassen sich zudem durch die deutlich unterschiedlichen Annahmen zu den Totholz mengen erklären. Die Totholz mengen werden vom Vorrat abgezogen und reduzieren so das potenzielle Rundholzaufkommen. Im HPS wird die Totholzmenge um etwa 60 % geringer angenommen als im NPS (vgl. Gerber et al. 2018; Oehmichen et al. 2018). Abbildung 24 zeigt die Entwicklung der Laubholzanteile am potenziellen Rohholzaufkommen in den WEHAM-Szenarien. Im Basisszenario nimmt der Laubholzanteil bis in die Modellierungsperiode 2048-2052 relativ kontinuierlich von über 39 % auf ca. 34 % ab, Die gleiche Tendenz ist im HPS zu beobachten; allerdings geht der Laubholzanteil sogar bis auf 32 % zurück. Dies entspricht den Szenarienannahmen der waldbaulichen Förderung ertragreicher Nadelbaumarten im HPS, bzw. der Fortsetzung der bisherigen waldbaulichen Praxis im Basisszenario. Im NPS sinkt der Laubholzanteil zunächst auf 31 %, um dann auf knapp 37 % anzusteigen.

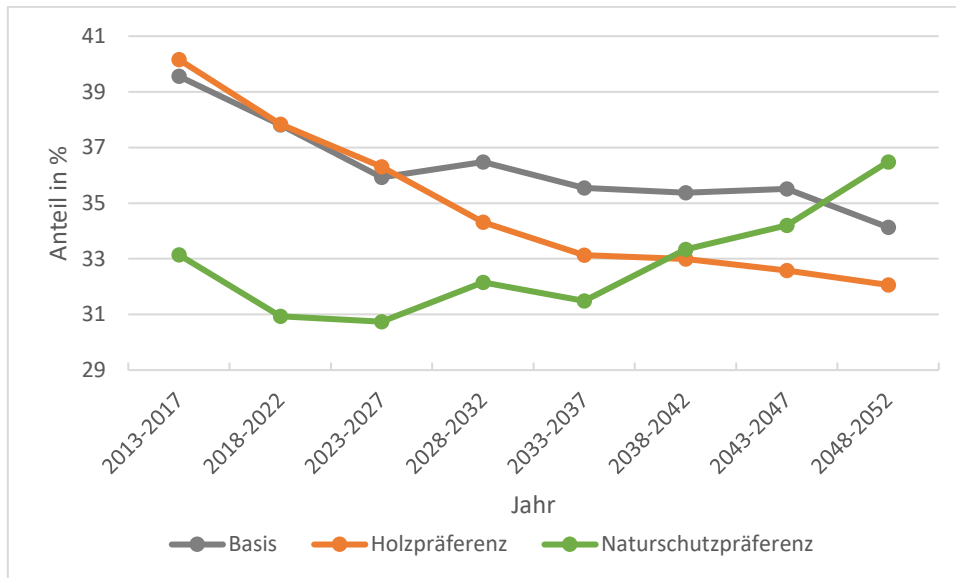


Abbildung 24: Entwicklung des Laubholzanteils am potenziellen Rohholzaufkommen in den drei WEHAM-Szenarien.
Quelle: eigene Darstellung auf Basis von BWI³-Daten (bwi.info) und Oehmichen et al., 2018.

Hennenberg und Böttcher (2018) weisen darauf hin, dass die tatsächlichen Holzentnahmen im Zeitraum 2013-2020 um 12 % unter den im WEHAM-Basisszenario modellierten potenziellen Rohholzaufkommen lagen. Daraus schließen die Autoren, dass das WEHAM-Basisszenario eine stärkere Nutzungsintensität annimmt. Im am Öko-Institut entwickelten Tool zu Fortschreibung der Senkenleistung lebender Biomasse (SIFOP) wird ab dem Jahr 2024 bei Berücksichtigung von eventuellen Schäden ein Holzeinschlag von 72,1 Mio. m³ pro Jahr angenommen (vgl. Hennenberg und Böttcher 2018).

Böttcher et al. 2018 haben das Holzaufkommen in Deutschland mit dem Waldwachstumsmodell Forestry and Agriculture Biomass Model (FABio) des Öko-Instituts für den Zeitraum 2012 bis 2102 modelliert. Somit ist der Modellierungszeitraum hier deutlich länger als in WEHAM. Die Modellierung nutzt die Ergebnisse der BWI² (2002) und BWI³ (2012) und erfolgt in drei eigens entwickelten Szenarien: Basisszenario, Holzscenario und Waldvision. Modellergebnisse sind potenzielle Einschlagsmengen; die Ergebnisse sind somit mit dem potenziellen Rohholzaufkommen aus WEHAM vergleichbar. Das Basisszenario schreibt den aktuellen Trend der Nutzungsintensität von Wäldern fort und ist an das WEHAM-Basisszenario angelehnt. Waldumbau findet nicht explizit statt und auf 4,1 % der Waldfläche erfolgt natürliche Waldentwicklung, d. h. es gibt keine Holznutzung. Das Holzscenario beschreibt eine intensivierete Bewirtschaftung und Holznutzung. Durchforstungs- und Entnahmemengen pro Eingriff werden in etwa verdoppelt. Bei der Verjüngung der Bestände werden, ähnlich wie im Holzpräferenzszenario aus WEHAM, Nadelbaumarten waldbaulich gefördert und es werden keine weiteren Flächen aus der Nutzung genommen. Im Szenario Waldvision werden die Zieldurchmesser für eine Nutzung um 17-22 % erhöht sowie Stärke und Frequenz von Eingriffen um 10-65 % verringert. Bei der Verjüngung werden Laubbäume gefördert. Der Flächenanteil ohne Holznutzung wird gegenüber dem Basisszenario vervierfacht. Das Waldvision-Szenario sieht 16,6 % nicht bewirtschafteter Waldflächen vor, was 12,5 % mehr ist als die derzeitige nicht bewirtschaftete Waldfläche. Auf dem Rest der Fläche erfolgt eine extensive Bewirtschaftung, die zu einer Erhöhung des stehenden Vorrats führt.

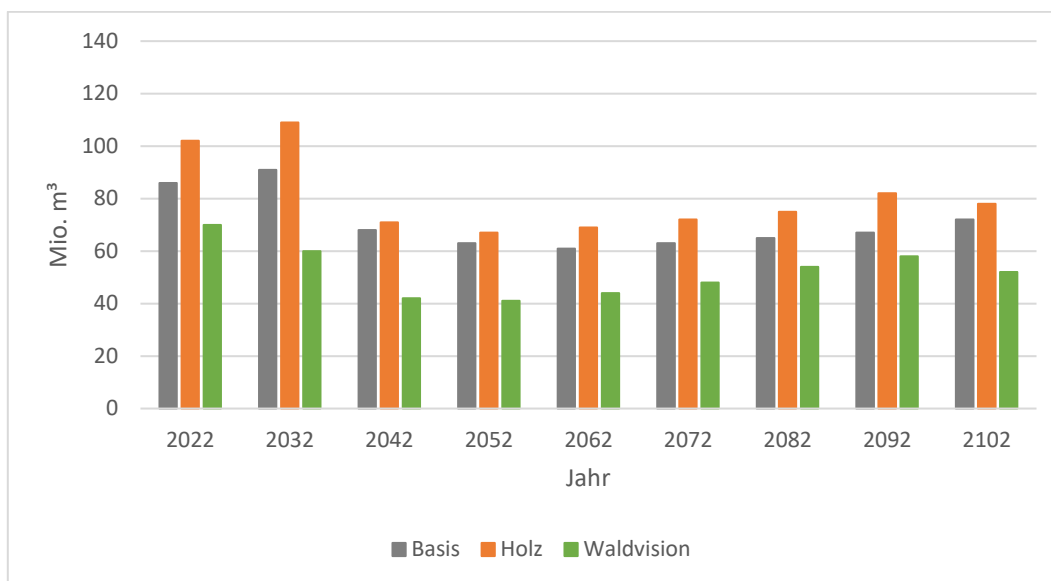


Abbildung 25: Potenzieller Einschlag 2022–2102 nach FABio.
Quelle: eigene Darstellung basierend auf Böttcher et al., 2018.

Abbildung 25 zeigt die Modellierungsergebnisse in den drei Szenarien (Böttcher et al. 2018). In allen drei Szenarien kommt es bis 2052 zu einer deutlichen Verringerung des potenziellen Holzaufkommens. Im Basis- und Holzscenario zeigt die Modellierung bis 2032 zunächst steigende potenzielle Aufkommen. Im Holzscenario lässt sich dies mit der intensivierten Bewirtschaftung und somit mit dem Absenken der Vorräte im Wald erklären. Im Basisszenario steigen die stehenden Vorräte leicht und im Szenario Waldvision sehr deutlich an, was sich auf die potenziellen Erntemengen, also das Rohholzaufkommen, auswirkt (vgl. Böttcher et al. 2018). Gleiches gilt für die Totholz mengen in den Szenarien.

In der Literatur sind weitere Modellierungen und Potenzialabschätzungen für Deutschland und die EU verfügbar. Diese liefern aber keine Einzeldaten über einen längeren Modellierungszeitraum, sondern Einzel- oder Mittelwerte. Gutsch et al. (2018) z. B. modellieren mit dem Model 4C, wie sich Waldbewirtschaftung und Klimawandel auf die zukünftige Holzernte in Deutschland auswirken. Im Ergebnis präsentieren sie Daten für drei Bewirtschaftungsszenarien, gemittelt über verschiedene Klimawandelszenarien (ICPP RCP) und über den Zeitraum 2011-2045. Die potenzielle Holzernte liegt im Basisszenario bei 2,57 tC/ha*a, in einem Nutzungsszenario („Biomass Production“) bei 2,87 tC/ha*a und in einem auf Naturschutz ausgerichteten Szenario („Nature Protection“) bei 2,22 tC/ha*a. Bei einer zugrundeliegenden Waldfläche von 10,37 Mio. ha ergeben sich im Durchschnitt potenzielle Holzernten von ca. 107 (Basis), ca. 119 („Biomass Production“) und ca. 92 („Nature Protection“) Mio. m³. Die Werte liegen deutlich über den Szenarienergebnissen der vorgenannten Modellierungen. In den verwendeten Szenarien werden Klimawandeleffekte berücksichtigt, d. h. die hohen Einschläge könnten im Zusammenhang mit im Klimawandel häufigeren Schadereignissen stehen. Weiterhin geht aus dem Artikel nicht eindeutig hervor, ob Vorrats- oder Erntefestmeter gemeint sind; der zu erntende, aber noch stehende Vorrat eines Bestandes ist aufgrund von Ernteverlusten ca. 10 % höher als die tatsächliche Erntemenge. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind vor allem durch die unterschiedlichen Annahmen zu den Umtriebszeiten begründet (Gutsch et al. 2018).

Mehrere Publikationen betrachten Europa und geben teilweise auch Daten für Deutschland aus. Jonsson et al. (2018) modellieren das maximale Holzaufkommen, welches ohne Absenkung des stehenden Vorrats potenziell verfügbar ist, in zwei Szenarien. Im Szenario „Business as usual“ (BAU) wird

angenommen, dass sich die Nutzung von Holzressourcen und die Dynamik auf den Holzmärkten in der Zukunft nicht wesentlich verändert. Im zweiten Szenario (HM) wird von einer hohen Holzmobilisierung ausgegangen. Dabei soll der potenziell nutzbare Vorrat vollständig genutzt werden und die energetische Holznutzung erheblich ansteigen. Im Ergebnis liegt das maximale Holzaufkommen in 2030 im BAU bei 118,7 Mio. m³ m. R. und im Mobilisierungsszenario bei 106,4 Mio. m³ m. R. Die Mengen im BAU liegen höher, da im Zeitraum 2020-2030 im HM durchgängig mehr Holz genutzt wird und dann 2030 weniger zur Verfügung steht. Im BAU ist in 2030 noch mehr Vorrat nutzbar. Panoutsou und Maniatis (2021) schätzen Biomassepotenziale für die EU. Einzeldaten für Deutschland sind nur für ein Szenario, welches von einer Fortsetzung der aktuellen Bewirtschaftung (im Jahr 2020) ausgeht (LOW), im Jahr 2030 ablesbar: die Stammholzproduktion wird auf ca. 81 Mio. Efm m. R. geschätzt. Päivinen et al. (2022) schätzen die Rundholzproduktion zum einen als einfache, lineare Trendfortschreibung basierend auf FAOSTAT-Daten der Jahre 2000-2019. Im Ergebnis werden im Jahr 2030 in Deutschland 94,2 Mio. m³ Rundholz (m. R.) geerntet. Dem gegenüber stehen 82,7 Mio. m³ (m. R.), welche die Rundholzmenge beziffern, die unter Berücksichtigung der national zu erzielenden C-Senkenleistung der Wälder geschätzt wurden. Aus dem Vergleich der Zahlen kann geschlossen werden, dass bei einer unveränderten Waldbewirtschaftung und einem damit einhergehenden hohen Rohholzaufkommen die zu erzielende C-Speicherleistung der Wälder möglicherweise nicht erreicht wird. Die Holzernte müsste dann beschränkt werden, um höhere C-Vorräte im stehenden Bestand aufbauen zu können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Modellierungen aus WEHAM (Rock et al. 2016a; Oehmichen et al. 2018) und vom Öko-Institut (Böttcher et al. 2018) die differenziertesten Schätzungen des potenziellen Rohholzaufkommens für Deutschland bereitstellen. Die im Jahr 2052 potenziell verfügbaren Rohholzmengen liegen demnach zwischen 41 und 86 Mio. m³, je nach der zukünftigen Ausrichtung der Waldbewirtschaftung. Die in der Literatur weiterhin veröffentlichten Datenpunkte liegen überwiegend in diesem sehr breiten Bereich. Deutlich darüber liegen die Modellierungsergebnisse von Gutsch et al. (2018). Da diese Mittelwerte über einen langen Zeitraum und über verschiedene Klimawandelszenarien darstellen, können sie nur bedingt mit den anderen Mengenangaben verglichen werden.

Die Entwicklung der technischen Potenziale von Sägenebenprodukten (SNP), sonstigem Industrierestholz (sIRH), Ablauge, Altholz, Altpapier und Rinde hängen maßgeblich von der Holzverwendung in der Holzbe- und -verarbeitenden Industrie (SNP, sIRH, Ablauge), von der Verwendung von Holz- und Papierprodukten insgesamt (Altholz, Altpapier) und von der Rohholzverwendung (Rinde) ab. Für die Biomassen Sägenebenprodukte, Rinde, Ablauge und Altpapier können Entwicklungen zum zukünftigen Potenzial neben der Literatur auch aus den Ergebnissen der BEPASO-Modellierungen abgeleitet werden. Eine Beschreibung der drei BEPASO-Szenarien findet sich im Abschnitt 3.2.1.1. Die Werte aus den drei BEPASO-Szenarien werden mit einer vergleichbaren Methodik wie für den Status quo berechnet. Allerdings sind die Ergebnisse nur eingeschränkt mit dem Status quo vergleichbar. Die Daten im Modell GFPM, das für die BEPASO-Szenarien verwendet wurde, durchlaufen vor der eigentlichen Simulation verschiedene Bearbeitungsschritte inkl. einer Kalibrierung. Daher können sich bereits im Startjahr einer Simulation Abweichungen zu den ursprünglichen Eingangsdaten ergeben. Bei einem Vergleich von Szenarienberechnungen und dem Status quo ist dies zu berücksichtigen. Für die Biomassen sonstiges Industrierestholz, Altholz, Landschaftspflegeholz und Holz von Kurzumtriebsplantagen ist das nicht möglich. Hier werden ausschließlich Informationen aus der Literatur betrachtet.

Die zukünftige Verfügbarkeit bzw. Produktion von Sägenebenprodukten wird für nachfolgende Darstellung von der simulierten Schnittholzproduktion aus den BEPASO-Szenarien³ nach Hirschler et al. 2022 abgeleitet. Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, nimmt die Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten aufgrund der steigenden Schnittholzproduktion in allen drei Szenarien zu. Die Zunahme des Angebots an Sägenebenprodukten ist dabei im Inseln-Szenario mit rund 1,9 Mio. m³ bzw. einer Steigerung von 14,6 Mio. m³ im Jahr 2015 auf 16,6 Mio. m³ im Jahr 2050 am größten. Im Wende-Szenario steigt die Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten zunächst auf 16,3 Mio. m³ im Jahr 2040, verringert sich dann leicht um rund 80.000 m³ und steigt anschließend bis ins Jahr 2050 auf insgesamt rund 16,4 Mio. m³. Insgesamt entspricht dies einer Zunahme von 1,8 Mio. m³ von 2015 bis 2050. Im Tropf-Szenario ist der Zuwachs der Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten am geringsten. Die Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten steigt um knapp 1 Mio. m³ auf rund 15,6 Mio. m³ im Jahr 2050 (BEPASO; FAO et al. 2020).

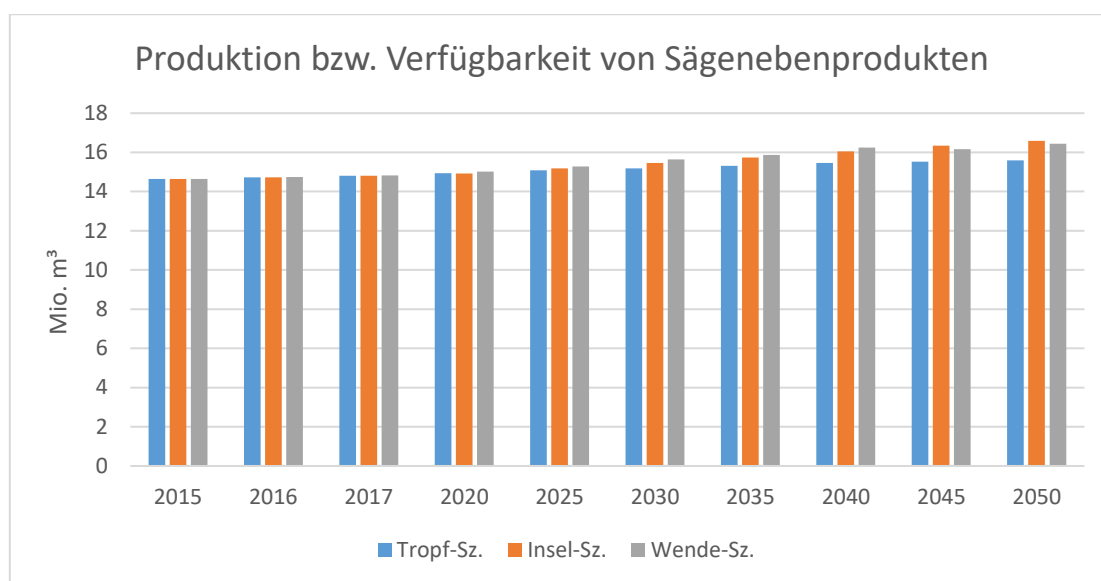


Abbildung 26: Zukünftige Produktion bzw. Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten.

Quelle: eigene Darstellung basierend auf BEPASO; FAO/ITTO/UN 2020; Hirschler et al. 2022.

Lindner et al. (2017) ermittelten das Aufkommenspotenzial an Sägenebenprodukten in europäischen Ländern. Für die Jahre 2020 und 2030 lagen die berechneten Werte für Deutschland jeweils bei rund 6 Mio. m³ und damit deutlich niedriger als die oben hergeleiteten Werte aus dem BEPASO-Projekt. Es ist unklar, auf welcher Datengrundlage und mit welcher Methodik diese Daten berechnet wurden. Im Vergleich mit anderen vorliegenden Publikationen muss die von Lindner et al. (2017) genannte Größenordnung als zu niedrig eingeschätzt werden. Lindner et al. (2017) nahmen für das zukünftige Aufkommen von sonstigem Industrierestholz in Europa und Deutschland ebenfalls Berechnungen vor. Die errechneten Potenziale an sonstigem Industrierestholz lagen in den Jahren 2012, 2020 und 2030 bei rund 5 Mio. m³. Hierbei ist ebenfalls zu beachten, dass Datengrundlage und Methodik zur Berechnung dieser Ergebnisse unklar sind. Wie bei Sägenebenprodukten kann eine Fehl- oder Unterschätzung nicht ausgeschlossen werden.

³ Für den Bereich Wald und Holz relevante Publikationen aus dem Projekt BEPASO sind Banse et al. 2020 und Morland und Schier 2020. Für diese Stellungnahme werden bislang nicht veröffentlichte Daten aus den Szenarienmodellierungen aus dem Projekt BEPASO präsentiert. Eine detailliertere Beschreibung zu den BEPASO-Szenarien findet sich in Kapitel 3.2.

Die Verfügbarkeit von Rinde kann aus den BEPASO-Szenarien von der Produktion von Rohholz nach Hirschler et al. 2022 abgeleitet werden (vgl. zur Produktion von Rohholz auch Abschnitt 3.2.1.2). Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert, wird zur Berechnung des Rindenaufkommens der Rindenanteil von Rohholz in Höhe von ca. 10 % als geometrisches Mittel des Rindenanteils von Laub- und Nadelholz verwendet (FAO et al. 2020).

In Abbildung 27 ist zu sehen, dass das Rindenaufkommen einzig im Inseln-Szenario steigt, von 8,3 Mio. m³ im Jahr 2015 bis auf 8,5 Mio. m³ im Jahr 2050. Ein Rückgang ist im Wende-Szenario zu erkennen um 0,3 Mio. m³ auf 8,0 Mio. m³ im Jahr 2050. Ein deutlicherer Rückgang zeigt sich im Tropf-Szenario um knapp 0,8 Mio. m³ auf 7,5 Mio. m³ im Jahr 2050.

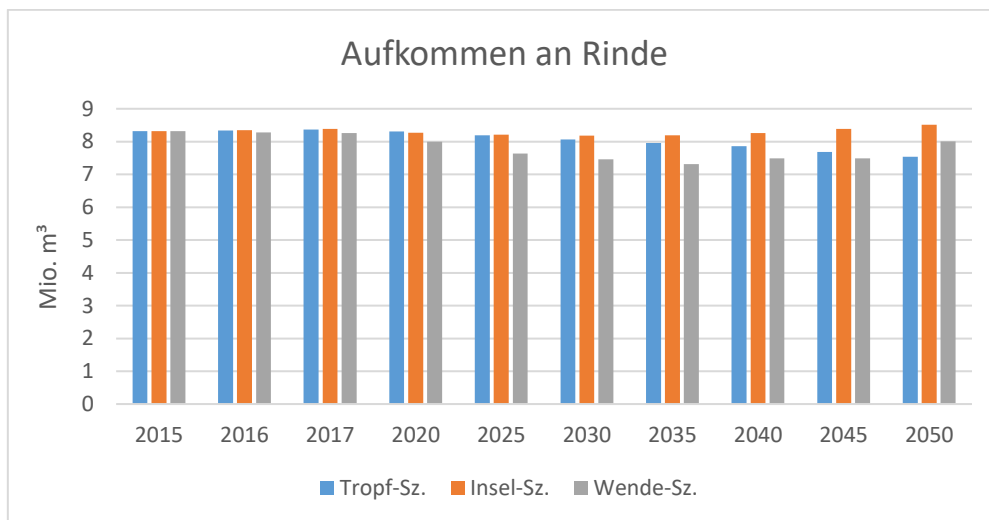


Abbildung 27: Zukünftige Produktion bzw. Verfügbarkeit von Rinde.
Quelle: eigene Darstellung basierend auf BEPASO, FAO, Hirschler et al. 2022.

Analog zum Vorgehen bei Sägenebenprodukten und Rohholz kann das Aufkommenspotenzial von Ablauge mittels Koeffizienten über die Produktion von Zellstoff abgeleitet werden (vgl. Tabelle 10). Das Aufkommen von Ablauge steigt durch die verstärkte Produktion von Chemiezellstoff im Wende-Szenario deutlich an, von knapp 3,0 Mio. t_{FM} (bzw. 1,2 Mio. t_{TM}) im Jahr 2015 auf 4,7 Mio. t_{FM} (bzw. 1,8 Mio. t_{TM}). Ein deutlicher Rückgang ergibt sich im Tropf-Szenario. Das Aufkommenspotenzial von Ablauge reduziert sich hier um knapp 2,0 Mio. t_{FM} (bzw. 0,8 Mio. t_{TM}) auf knapp 1,0 Mio. t_{FM} (bzw. 0,4 Mio. t_{TM}). Ebenfalls ein Rückgang, wenn auch nur geringfügig, zeigt sich im Inseln-Szenario um 0,7 Mio. t_{FM} (bzw. knapp 0,3 Mio. t_{TM}) auf 2,3 Mio. t_{FM} (bzw. 0,9 Mio. t_{TM}) im Jahr 2050.

Aus den Modellergebnissen von BEPASO sind Entwicklungen zum genutzten Aufkommenspotenzial von Altpapier verfügbar. In allen drei Szenarien sind Rückgänge beim Aufkommen von Altpapier zu beobachten (vgl. Tabelle 10). Der größte Rückgang mit 7,3 Mio. t_{FM} (bzw. 5,7 Mio. t_{TM}) von 15,2 Mio. t_{FM} (bzw. 11,9 Mio. t_{TM}) im Jahr 2015 auf 7,9 Mio. t_{FM} (bzw. 6,2 Mio. t_{TM}) zeigt sich im Wende-Szenario. Hier ist zu beachten, dass ein Großteil der insgesamt steigenden Zellstoffproduktion durch die Herstellung von Chemiezellstoff erfolgt und nicht durch Papierzellstoff. Ebenfalls deutliche Rückgänge von 3,9 Mio. t_{FM} (bzw. 3,0 Mio. t_{TM}) zeigen sich im Inseln-Szenario auf 11,3 Mio. t_{FM} (bzw. 8,8 Mio. t_{TM}) im Jahr 2050. Geringere Rückgänge zeigen sich im Tropf-Szenario mit einem Rückgang von 1,2 Mio. t_{FM} (bzw. 0,9 Mio. t_{TM}) auf 14,0 Mio. t_{FM} (bzw. 11,0 Mio. t_{TM}) im Jahr 2050.

Tabelle 10: Entwicklung der Aufkommenspotenziale von Ablauge und Altpapier.

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf BEPASO.

| Biomasse, in Mio. t _{FM} | Szenario | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|-----------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ablauge | Wende | 3,0 | 2,7 | 2,5 | 2,4 | 2,4 | 2,8 | 3,4 | 4,7 |
| | Tropf | | 2,6 | 2,3 | 2,0 | 1,8 | 1,5 | 1,3 | 1,0 |
| | Inseln | | 2,5 | 2,1 | 1,8 | 1,6 | 1,5 | 1,8 | 2,3 |
| Altpapier | Wende | 15,2 | 13,8 | 12,5 | 11,2 | 10,1 | 9,2 | 8,3 | 7,9 |
| | Tropf | | 15,0 | 14,7 | 14,5 | 14,3 | 14,3 | 14,1 | 14,0 |
| | Inseln | | 14,3 | 13,5 | 12,8 | 12,2 | 11,8 | 11,6 | 11,3 |
| Biomasse, in Mio. t _{FM} | Szenario | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Ablauge | Wende | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 0,9 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,8 |
| | Tropf | | 1,0 | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 0,4 |
| | Inseln | | 1,0 | 0,8 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |
| Altpapier | Wende | 11,9 | 10,8 | 9,8 | 8,8 | 7,9 | 7,2 | 6,5 | 6,2 |
| | Tropf | | 11,7 | 11,5 | 11,4 | 11,2 | 11,2 | 11,1 | 11,0 |
| | Inseln | | 11,2 | 10,6 | 10,0 | 9,6 | 9,2 | 9,1 | 8,8 |

Zur Berechnung eines Aufkommenspotenzials von Altholz analysierten Szichta et al. (2022) die Stoffströme des Holzmarktes unter Verwendung des PrecTimber (Prediction of Recovery of Timber)-Modells. Sie leiteten daraus Angaben zu möglichen Altholzpotenzialen ab. Es wurden drei Szenarien, das Basis-Szenario (S0), Wahrscheinlichste-Szenario (S1) und Ungewiss-Szenario (S2) entwickelt, um das zukünftige Altholzaufkommen zu bestimmen. Wie in Abbildung 28 zu sehen, steigt das verfügbare Altholzaufkommen zwischen den Jahren 2035 bis 2050 in allen drei Szenarien an. Im Szenario S0 ist der Anstieg von 13,5 Mio. m³ im Jahr 2035 auf 14,2 Mio. m³ am niedrigsten. Im Szenario S1 liegt das verfügbare Altholz im Jahr 2035 bei 13,7 Mio. m³ und im Jahr 2050 bei 14,7 Mio. m³. Den größten Anstieg erfährt das Altholzaufkommen unter den Annahmen von Szenario S2. Hier steigt das Altholzaufkommen von 13,9 Mio. m³ im Jahr 2035 auf 15,2 Mio. m³.

Neben der Altholzverfügbarkeit modellierten Szichta et al. (2022) auch die Sektoren, in denen Altholz anfällt. Wie Abbildung 28 zeigt, ist der Bausektor für rund die Hälfte des zukünftigen Altholzaufkommens die wichtigste Quelle, gefolgt vom Möbelsektor mit einem Anteil von rund einem Drittel. Das weitere Aufkommen entfällt auf Altholz aus dem Verpackungssektor sowie aus sonstigen Sektoren.

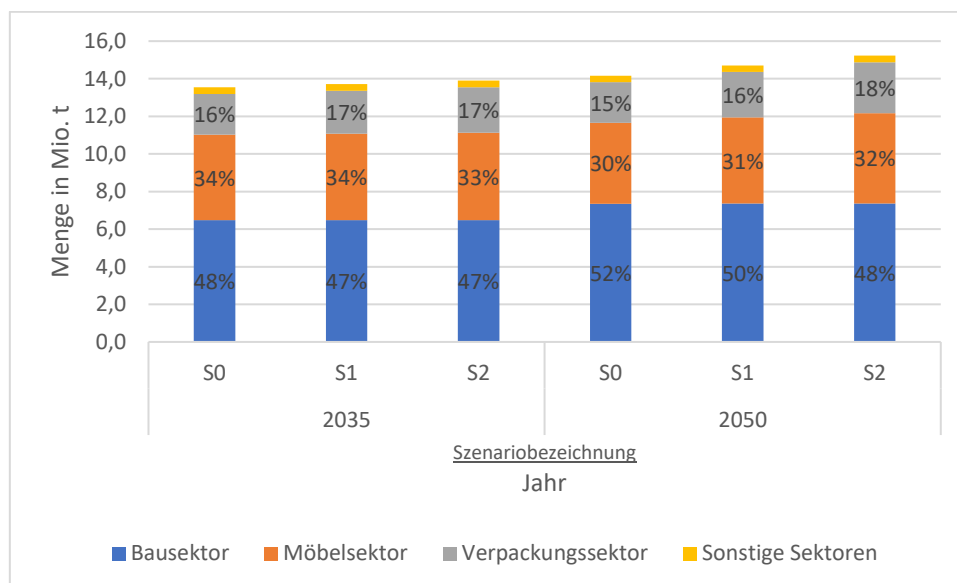


Abbildung 28: Zukünftiges Altholzaufkommen.

Quelle: eigene Darstellung basierend auf Szichta et al., 2022.

Informationen zur künftigen Verfügbarkeit von Landschaftspflegeholz sind nicht bekannt. In einer Studie von Searle und Malins 2016 sind modellierte Werte für 2020 und 2030 nur als Summe veröffentlicht, es kann nicht zwischen Holz, Altpapier, landwirtschaftlicher Biomasse etc. differenziert werden.

2.3.3 Entwicklung der landwirtschaftlichen Biomasseverfügbarkeit in den BEPASO-Szenarien

Autoren: Martin Banse, David Kilian | Thünen-Institut für Marktanalyse

Von den im Projekt BEPASO entwickelten Szenarien werden in diesem Bericht für den Bereich der landwirtschaftlichen Biomasse die Szenarien „Bioökonomie am Tropf“ und „Bioökonomie-Wende“ verwendet. Die Ausgangssituation entspricht bei beiden Szenarien der Situation des Jahres 2015, diese Ausgangslage wurde für die vorliegenden Analysen für das Bezugsjahr 2020 aktualisiert. Als Basisjahr wird das Jahr 2020 gewählt, da hier alle Daten in den Statistiken vorliegen (vgl. Kapitel 2.2.2). Dabei dient für die vorliegende Analyse das Szenario „Bioökonomie am Tropf“ als Referenz- oder „Business as Usual (BAU)“-Szenario. Ein solcher Ansatz, bei dem die Entwicklung der Nutzung von Biomasse in unterschiedlichen Nutzungsformen (Nahrungs-, Futter-, energetische und stoffliche Nutzung) modellbasiert in verschiedenen Szenarien projiziert wird, ist aus wissenschaftlicher Sicht streng geboten. Denn nur durch den **relativen** Vergleich der in den Szenarien projizierten Nutzungspfade lassen sich hier Schlussfolgerungen nachvollziehbar ableiten. Der alleinige Blick auf ein einziges Szenario ohne den Vergleich auf ein BAU-Szenario kann zu Fehlinterpretationen führen.

Bei der Interpretation der in dem BAU-Szenario projizierten Werte für die energetische Nutzung ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen der BEPASO-Projektionen noch von einer relativ hohen energetischen Nutzung von Biomasse aus erster Generation ausgegangen wurde. Obwohl die Werte im Laufe der Projektion sinken, wäre bei erneuter Projektion hier aufgrund niedrigerer Startwerte in 2020 von einem geringeren Verlauf auszugehen.

In dem BAU-Szenario „Bioökonomie am Tropf“ wird für die inländische Biomasseproduktion eine Ertragssteigerung projiziert, sodass das landwirtschaftliche Biomasseaufkommen kontinuierlich ansteigt

und im Jahr 2050 rund 121 Mio. t_{TM} erreicht. In dem Szenario „Bioökonomie-Wende“ ist die Menge der in Deutschland geerntete Biomasse bis 2040 konstant und sinkt bis zum Jahr 2050 leicht auf rund 111 Mio. t_{TM} (Abbildung 29). Bei der Interpretation der Zahlen ist zu beachten, dass in den BEPASO-Szenarien kein zusätzlicher Flächenbedarf für die Wiedervernässung von Mooren und den Ausbau erneuerbarer Energien berücksichtigt wurde.

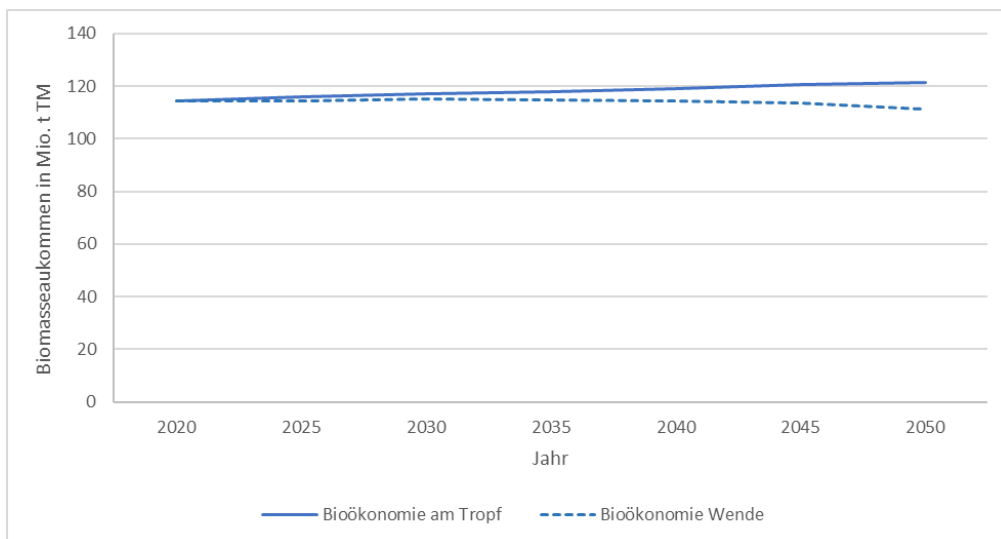


Abbildung 29: Landwirtschaftliche Biomasseproduktion in Deutschland in Trockenmasse bis 2050. Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

2.3.4 Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe

Autor: Karl-Friedrich Cyffka | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Die Analyse der Entwicklung der Potenziale (Fokus Top Biomassen) bis 2050 erfordert einen Bezug zu maßgeblichen Datenpunkten. Um eine Konsistenz zu BEPASO zu gewährleisten, wurden entsprechende Datenpunkte bzw. Trendentwicklungen in der BEPASO-Modellierung identifiziert und mit den entsprechenden Biomassen bzw. Reststoffen verknüpft. Eine detaillierte Darstellung der Methodik für die Berechnung von zukünftigen Potenzialen ausgewählter Biomassen (Top 15) inklusive relevanter Datenpunkte aus BEPASO sowie möglicher Nachhaltigkeitsaspekte ist in Anhang II dargelegt. Beispielhaft werden berechnete Datengrundlagen anhand der BEPASO-Modellierung in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Datengrundlage aus BEPASO für die Berechnung zukünftiger Potenziale.

| | Daten Bepaso | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bioökonomie am Tropf | Rinder in Mio. | 11,3 | 11,4 | 11,4 | 11,3 | 11,3 | 11,2 | 11,2 |
| | Schweine in Mio. | 26,1 | 26,6 | 27,0 | 27,3 | 27,7 | 28,0 | 28,2 |
| | Hühner in Mio. | 159,1 | 159,9 | 160,5 | 161,0 | 161,5 | 162,0 | 162,4 |
| | Bevölkerung in Mio. | 81,4 | 81,2 | 80,9 | 80,4 | 79,9 | 79,3 | 78,5 |
| | Getreidefläche in Mio. ha | 5,7 | 5,7 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,6 |
| Wende oder (R)Evolution | Rinder in Mio. | 11,3 | 10,1 | 9,1 | 7,7 | 7,0 | 6,4 | 5,9 |
| | Schweine in Mio. | 26,1 | 24,3 | 22,7 | 21,0 | 20,0 | 19,1 | 18,1 |
| | Hühner in Mio. | 159,1 | 156,4 | 153,9 | 151,3 | 149,8 | 148,4 | 147,0 |
| | Getreidefläche in Mio. ha | 5,7 | 5,7 | 5,6 | 5,6 | 5,6 | 5,7 | 5,7 |
| | Bevölkerung in Mio. | 81,9 | 82,1 | 82,1 | 82,1 | 82,1 | 82,0 | 81,8 |

Die Entwicklung der Tierzahlen aus BEPASO dient der Abschätzung von tierischen Exkrementen bis 2050. Getreidestroh wird mittels der Entwicklung von Getreideflächen abgeschätzt und die Bevölkerungsentwicklung des jeweiligen Szenarios dient der Abschätzung von Biogut, Grüngut und Altpapier. Reststoffe aus Ölmühlen und der biogene Anteil von Abwässern aus verschiedenen Industriebereichen (7 Lebensmittelsektoren, Ethanol- und Zellstoff-/Papierproduktion) werden mittels zukünftiger Produktionsvolumina der jeweiligen Sektoren berechnet. Holz von Landschaftspflegeflächen wird konstant fortgeschrieben, da BEPASO keine Angaben zu den Flächenentwicklungen der relevanten Flächen (Moor, Heide, Fließgewässer, Streuobstflächen, etc.) macht. Tabelle 12 und Tabelle 13 fassen die Ergebnisse der zukünftigen Entwicklung des technischen Potenzials (Angebot) ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15) basierend auf den BEPASO-Szenarien (Bioökonomie am Tropf & Wende/Revolution) von 2020-2050 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM} , Mittelwerte) zusammen. Insgesamt sind die Veränderungen im Szenario Bioökonomie am Tropf (Tabelle 12) in Summe aller Biomassen gering (-2,4%). Größere Veränderungen treten vor allem bei Biomassen auf, welche in Abhängigkeit zu Produktionsvolumina der oben beschriebenen Produktionssektoren stehen. Aufgrund anwachsender Schweine- und Hühnerzahlen steigen deren Exkremente, wobei die Exkremente von Rindern sehr leicht sinken. Die technischen Potenziale von Biogut und Grüngut fallen aufgrund von sinkenden Bevölkerungszahlen in dem Szenario.

Tabelle 12: Zukünftige Entwicklungen des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15). Basierend auf BEPASO-Szenario Bioökonomie am Tropf von 2020-2050 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) – Mittelwerte
Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), BEPASO Thünen

| Bioökonomie am Tropf - Mio. t_{TM} | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | Veränderung 2050/2020 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------------------|
| Altpapier | 14,47 | 14,67 | 14,62 | 14,53 | 14,44 | 14,33 | 14,19 | -2% |
| Getreidestroh | 12,22 | 12,07 | 12,05 | 11,99 | 11,96 | 11,92 | 11,88 | -3% |
| Grüngut | 8,50 | 8,28 | 8,26 | 8,23 | 8,20 | 8,16 | 8,10 | -5% |
| Rindergülle | 8,24 | 8,28 | 8,28 | 8,26 | 8,23 | 8,19 | 8,14 | -1% |
| Reststoffe Ölmühlen | 6,79 | 6,28 | 5,92 | 5,99 | 6,05 | 6,09 | 6,12 | -10% |
| Rindermist | 5,91 | 5,94 | 5,94 | 5,93 | 5,90 | 5,88 | 5,84 | -1% |
| Biogener Anteil Abwässer | 3,24 | 3,28 | 3,77 | 3,75 | 3,71 | 3,67 | 3,62 | 12% |
| Biogut aus privaten Haushalten | 2,82 | 2,71 | 2,70 | 2,68 | 2,67 | 2,65 | 2,62 | -7% |
| Holz von Landschaftspflegeflächen | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 0% |
| Schweinegülle | 1,00 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 8% |
| Hühnertrockenkot | 0,63 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,64 | 0,65 | 0,65 | 2% |
| Schweinemist | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 8% |
| Rinderjauche | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | -1% |
| Hühnerflüssigmist | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 2% |
| Schweinejauche | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 8% |
| Summe der oberhalb gelisteten Biomassen | 66,37 | 65,73 | 65,78 | 65,60 | 65,41 | 65,16 | 64,78 | -2,4% |

Im Gegensatz zum Szenario Bioökonomie am Tropf fällt das technische Potenzial der ausgewählten Biomassen in Summe (-16%) im Szenario Wende/Revolution geringer aus. Der größte Treiber dafür sind die sinkenden Rinder- und Schweinezahlen, wodurch die tierischen Exkremente von Rindern (-48%) und Schweinen (-30%) stark rückläufig sind. Die Hühnerzahlen und damit deren Exkremente fallen um 8%. Durch eine fallende Ölmühlenproduktion (crude vegetable oil (cvol)/oilcake in BEPASO) sinken zudem die Reststoffe aus Ölmühlen stark. Bei den in Tabelle 12 und Tabelle 13 dargestellten Potenzialen handelt es sich um technische Potenziale. Gleichzeitig gibt es noch landwirtschaftliche Biomassen, die in der

Regel untergepflügt werden und somit derzeit in der DBFZ-Datenbasis umfassend in die Humusbildung gehen. Ein Beispiel dafür ist Maisstroh, das ein hohes theoretisches Potenzial (ca. 3,4 Mio. t_{TM}) aufweist. Bei einer angenommenen Entnahmerate von 45% könnte ein zusätzliches technisches Potenzial von 1,5 Mio. t_{TM} Maisstroh bereitgestellt werden, das hier noch nicht abgebildet ist.

Tabelle 13: Zukünftige Entwicklungen des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15). Basierend auf BEPASO-Szenario Wende (Revolution) von 2020-2050 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) – Mittelwerte
Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), BEPASO Thünen.

| Wende oder (R).Evolution - Mio. t _{TM} | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | Veränderung 2050/2020 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Altpapier | 14,47 | 14,84 | 14,84 | 14,84 | 14,84 | 14,82 | 14,78 | 2% |
| Getreidestroh | 12,22 | 12,11 | 11,97 | 11,97 | 11,99 | 12,18 | 12,16 | 0% |
| Grüngut | 8,50 | 8,34 | 8,34 | 8,34 | 8,34 | 8,34 | 8,32 | -2% |
| Rindergülle | 8,24 | 7,40 | 6,64 | 5,59 | 5,08 | 4,65 | 4,29 | -48% |
| Reststoffe Ölmühlen | 6,79 | 5,42 | 4,98 | 4,48 | 4,22 | 4,01 | 3,76 | -45% |
| Rindermist | 5,91 | 5,31 | 4,77 | 4,01 | 3,64 | 3,34 | 3,08 | -48% |
| Biogener Anteil Abwässer | 3,20 | 2,94 | 4,03 | 3,76 | 3,44 | 3,20 | 3,07 | -4% |
| Biogut aus privaten Haush. | 2,82 | 2,74 | 2,74 | 2,74 | 2,74 | 2,74 | 2,73 | -3% |
| Holz von Landschaftspfleg | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 0% |
| Schweinegülle | 1,00 | 0,93 | 0,87 | 0,80 | 0,76 | 0,73 | 0,69 | -30% |
| Hühnertrockenkot | 0,63 | 0,62 | 0,61 | 0,60 | 0,60 | 0,59 | 0,59 | -8% |
| Schweinemist | 0,18 | 0,17 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | -30% |
| Rinderjauche | 0,20 | 0,18 | 0,16 | 0,14 | 0,13 | 0,11 | 0,11 | -48% |
| Hühnerflüssigmist | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | -8% |
| Schweinejauche | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | -30% |
| Summe der oberhalb gelisteten Biomassen | 66,33 | 63,16 | 62,28 | 59,58 | 58,07 | 56,99 | 55,86 | -15,8% |

Im Rahmen von Potenzialberechnungen und insbesondere im Rahmen der NABIS wird die Frage der Nachhaltigkeit von Biomassepotenzialen in den Vordergrund gestellt. Im Gegensatz zu nachhaltiger Biomasse, welche gemäß den Nachhaltigkeitsverordnungen (Biokraft-NachV und BioSt-NachV) definiert ist, gibt es keine juristische bzw. einheitliche Definition für nachhaltige Biomassepotenziale. Gleichwohl wird diese Begrifflichkeit im politischen Kontext als Schlagwort und bereits im Eckpunktepapier der NABIS verwendet. Was mit der Verwendung der Begrifflichkeit nachhaltiges Biomassepotenzial wohl gemeint ist, ist die Gesamtgegenüberstellung von Biomasseangebot abzüglich reduzierender Nachhaltigkeitsaspekte und der Nachfrage nach Biomasse(n) in der Bioökonomie. Diese Gegenüberstellung, welche etwaige zusätzliche Biomasseimporte einbezieht, ergibt sich bereits aus den Berichtspflichten des Governance-Systems für die Energieunion (Anhang IX und X), welche folgende Berichtsangaben enthält: „Daten und Analysen zur gegenwärtigen und prognostizierten Verfügbarkeit nachhaltiger Biomasse und der Nachfrage danach, einschließlich der Auswirkungen einer höheren Nachfrage nach Biomasse auf die Sektoren, die Biomasse nutzen“ (Europäische Union 2018).

Die vom ifeu-Institut dargelegten Kriterien⁴ für eine nachhaltige Biomassebereitstellung mit Relevanz für biogene Abfälle und Reststoffe wurden soweit möglich in den oben beschriebenen Potenzial-

⁴ Fehrenbach und Köppen (2022): Wissenschaftliche Begleitung des Umsetzungsplans zur Nationalen Bioökonomiestrategie.

abschätzungen bis 2050 berücksichtigt. Daraus ergibt sich jedoch keine Zusammenfassung eines nachhaltigen Biomassepotenzials, da dieses nicht einheitlich definiert ist und verschiedene Nachhaltigkeitsaspekte (z. B. Umsetzung der EU-Biodiversitätsstrategie und Ökolandbau) in der BEPASO-Modellierung nicht abgebildet sind. Im Folgenden wird auf die vom ifeu-Institut dargelegten Nachhaltigkeitskriterien mit Bezug zu biogenen Abfällen und Reststoffen eingegangen. Die Einhaltung der Humusbilanz ist mit entsprechenden Entnahmeraten unter Berücksichtigung der Humusbilanz und Faktoren für technische Bergungsraten gewährleistet. Um jedoch den Ansprüchen seitens der Ministerien zu Kaskadeneffekten teilweise gerecht zu werden, wird in der späteren Analyse (Modellierung) der Use-Case einer Strohvergärung zur Erzeugung von Biomethan inklusive einer Gärrestrückführung zum Erhalt der Humusbilanz Berücksichtigung finden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit einer höheren Strohentnahmerate vom Feld, welche den nutzbaren Ressourcenpool von Getreidestroh steigern kann. Der erhöhte Einstreubedarf von Getreidestroh in der Tierhaltung im Ökolandbau hängt stark von der Entwicklung der Tierzahlen ab. Erste auf einer dünnen Datenbasis [schwierige Datenlage für Einstreubedarf im Ökolandbau (Klöble 2019)] beruhende Ergebnisse weisen jedoch darauf hin, dass der Effekt der zunehmenden Stroheinstreubedarfe aufgrund des Ökolandbaus (Ziel Ökolandbau 30%) geringer ausfällt als der Effekt der sinkenden Stroheinstreubedarfe aufgrund sinkender Tierzahlen wie im BEPASO-Szenario Wende/Revolution. Aufgrund der gleichbleibenden bzw. leicht steigenden Tierzahlen im BAU-Szenario steigt dort der Strohbedarf bei einem höheren Ökolandbau in der Tierhaltung dagegen. Bei sinkenden Tierzahlen könnten daher langfristig Strohpotenziale frei werden, falls diese in der Tierhaltung eingesetzten Mengen bislang keiner Vergärung zugeführt werden. Eine quantitative Integration in die Potenzialdaten, welche aus BEPASO hergeleitet wurden, wird jedoch nicht angestrebt, da der Ökolandbau dort nicht modelliert wurde. Da es sich bei BEPASO bzw. Magnet um Marktmodelle handelt, hätte insbesondere der Ökolandbau aufgrund unterschiedlicher Produktionskosten/-preise ggf. erheblichen Einfluss auf den Anbau und somit auf die von den Modellierungsergebnissen abgeleiteten Potenziale. Der Rückgang des Getreideanbaus (Fläche) als Nachhaltigkeitsrestriktion (ifeu-Institut) wird insofern berücksichtigt, wenn sich dieser aus den BEPASO-Daten ergibt (Tabelle 11). Ein Rückgang der Tierzahlen als Nachhaltigkeitskriterium wird insbesondere im BEPASO-Wende/Revolution-Szenario umgesetzt. Der Vorschlag, die Potenziale von Gülle/Mist auf die Tierproduktion für die inländische Versorgung unter Berücksichtigung eines Rückgangs des Fleischkonsums um 30 % zu begrenzen, wird aus verschiedenen Gründen als nicht sinnvoll erachtet. So würde dies zu Inkonsistenzen in der Potenzialberechnung im Vergleich zu anderen Biomassen führen. Zudem ist der Ansatz aus Klimagesichtspunkten nicht zielführend, da die Gülle-/Mistanteile aus der Tierproduktion für den Export den gleichen Klimawandeleffekt aufweisen wie jene aus inländischer Produktion und entsprechende Effekte ansonsten vernachlässigt werden würden. Zudem beziehen sich politische Zielsetzungen der energetischen Nutzung von Gülle/Mist, welche in der Potenzialberechnung durch Mobilisierungsfaktoren für eine energetische Nutzung abgebildet sind, nicht auf inländische Produktionsanteile, sondern auf die Gesamtmengen tierischer Exkremente. Zusammenfassend ist festzustellen, dass nicht alle der vom ifeu-Institut vorgeschlagenen Nachhaltigkeitskriterien für biogene Abfälle und Reststoffe integriert werden konnten. Neben den vom ifeu-Institut genannten Nachhaltigkeitskriterien gibt es noch weitere, v.a. regulatorische, Anforderungen (z. B. EU-Biodiversitätsstrategie, LULUCF-Verordnung etc.), welche sich z. B. durch Flächen- oder Entnahmerestriktionen perspektivisch auf die Potenziale von Rest- und Abfallstoffen auswirken. Auch die Biomassepotenziale der DBFZ-Ressourcendatenbank integrieren diese oben beispielhaft genannten regulatorischen Nachhaltigkeitsanforderungen bislang nicht.

3 Arbeitspaket 2

Aktuelle und zukünftige Nutzung von Biomassepotenzialen

3.1 Status quo der Biomassenutzung in Deutschland

3.1.1 Holzbiomasse sowie Rinde

Autor:innen: Holger Weimar, Susanne Iost, Sebastian Glasenapp, Dominik Jochem | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Nachstehende Tabelle zeigt die Nutzung von Holzbiomassen und Rinde nach aktuellsten verfügbaren Daten.

Tabelle 14: Nutzung der Holzbiomassen sowie Rinde.

| Biomasse | Bezugsjahr bzw. -zeitraum | Nutzung | Quelle |
|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Rohholzentnahme (Derbholz) | 2021 | 78,4 Mio. m ³ | TI-WF 2023 |
| Nichtderbholzentnahme | 2021 | 4,0 Mio. m ³ | TI-WF 2023 |
| Rinde | 2020 | 2,2 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |
| Sägenebenprodukte* | 2020 | 20,5 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |
| Sonstiges Industrierestholz* | 2020 | 2,5 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |
| Altholz | 2020 | 16,2 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |
| Ablauge | 2021 | 4,5 Mio. t _{FM} | PAPIERINDUSTRIE e. V. 2022 |
| Altpapier | 2021 | 18,3 Mio. t _{FM} | PAPIERINDUSTRIE e. V. 2022 |
| Landschaftspflegeholz | 2020 | 4,8 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |
| Holz von Kurzumtriebsplantagen | 2020 | 0,1 Mio. m ³ | Infro e.K. 2023 |

Anmerkungen: Die Einheit Kubikmeter m³ entspricht einem Erntefestmeter bzw. Festmeter ohne Rinde (EFm o. R. bzw. Fm o. R.); t_{FM}: Tonne Feuchtmasse; *Die Werte zur Nutzung von Sägenebenprodukten und sonstiges Industrierestholz von Infro (2023) stellen in der Summe vermutlich das korrekte Gesamtvolumen dar. Bei der Differenzierung in Sägenebenprodukte und sonstiges Industrierestholz muss beachtet werden, dass z. B. „Rohstoffeinsatz für Energieholzprodukte (z. B. Pellets) in das Rohstoffaufkommen (z. B. Sägenebenprodukte) eingerechnet“ ist (Infro 2023). Dadurch wird der Nutzungswert von Sägenebenprodukten überschätzt.

Der Holzeinschlag (nur Derbholz) ist nach Berechnungen des Thünen-Instituts in den letzten Jahren beeinflusst durch das hohe Schadholzaufkommen von 75,0 Mio. m³ im Jahr 2018 auf 84,2 Mio. m³ im Jahr 2021 angestiegen (s. Abbildung 30). Daten des amtlichen Holzeinschlags unterschätzen den Holzeinschlag in der langen Zeitreihe deutlich und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

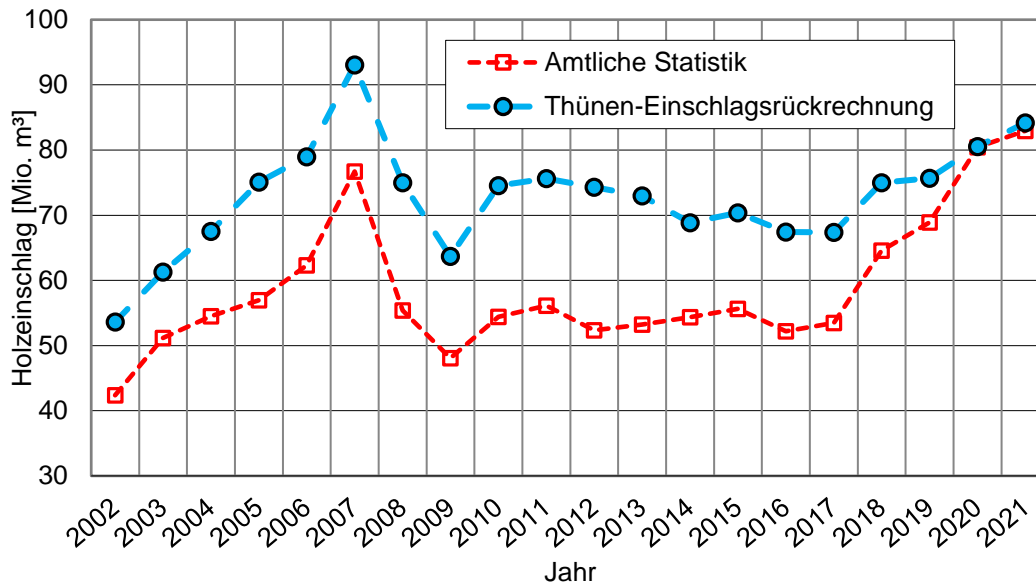


Abbildung 30: Entwicklung des Holzeinschlags in Mio. m³ nach amtlicher Statistik und Thünen-Einschlagsrückrechnung.
Quelle: TI-WF, 2023.

Zu beachten ist, dass nicht das gesamte eingeschlagene Holz aus dem Wald entnommen wird. Geringe Mengen verbleiben im Wald (NVD⁵). Daher wird zwischen Holzeinschlag und Holzentnahme unterschieden. Beim Holzeinschlag wird per Definition in Deutschland ausschließlich das eingeschlagene Derbholz⁶ (inkl. des NVD) betrachtet. Bei der Holzentnahme wird das dem Wald entnommene Derbholz (ohne NVD) und zusätzlich das entnommene Nichtderbholz berücksichtigt. Die Entnahme von Rohholz aus dem Wald lag im Jahr 2021 bei 82,4 Mio. m³, davon 78,4 Mio. m³ Derbholz und 4,0 Mio. m³ Nichtderbholz (TI-WF 2023). Der Anteil des Nadelholzes an der Entnahme lag 2021 bei 78 %, knapp 22 % waren Laubholz. Das hohe Schadholzaufkommen der vergangenen Jahre hat zu einem deutlichen Anstieg der Exporte von Nadelrohholz geführt. In den Jahren 2019, 2020 und 2021 war Deutschland Nettoexporteur von Rohholz, während von 2009 bis 2018 Nettoimporte von Rohholz zu verzeichnen waren. In den Jahren 2020 und 2021 basierten die Nettorohhollexporte zu mehr als 90 % auf Nadelholz. Im Jahr 2021 lagen die Nettoexporte nach vorläufigen Angaben bei 5,2 Mio. m³, davon 4,6 Mio. m³ Nadelholz und 0,5 Mio. m³ Laubholz. Daten von 2022 sind noch nicht ausgewertet.

Abbildung 31 zeigt eine Aufschlüsselung der Rohholzentnahme nach Nadel- und Laubholz sowie nach stofflicher und energetischer Verwendung. Hierbei werden Lagerbestandsveränderungen sowie Rohhollexporte der stofflichen Entnahme zugerechnet. Seit dem Jahr 2018 ist ein Anstieg der inländischen Rohholzentnahme für stoffliche Verwendungszwecke zu verzeichnen. Im Vergleich zum Jahr 2017 stieg die stoffliche Nutzung im Jahr 2021 um 14,8 Mio. m³ an. Im Jahr 2018 war der Anstieg (im Vergleich zum Jahr 2017) hauptsächlich auf den Aufbau von Rohholzlagern im Wald zurückzuführen, während im Jahr 2019 das höhere Entnahmeniveau auf gestiegene Exporte (+3,7 Mio. m³) und einen Rückgang der Importe (-1,6 Mio. m³) zurückzuführen war. Das gleiche Muster wiederholte sich im Jahr 2020. Die Exporte stiegen um weitere 4,3 Mio. m³ (+47 % im Vergleich zu 2019) auf insgesamt 13,3 Mio. m³ (davon 92 % Nadelrohholz) an. Die Importe im Jahr 2020 gingen um 1,3 Mio. m³ im Vergleich zum

⁵ NVD ist die Abkürzung für nicht verwertetes Derbholz. Es umfasst geschlagenes Derbholz, welches im Wald verbleibt und nicht genutzt wird.

⁶ Stamm und Äste (einschl. Rinde) mit einem Durchmesser von mindestens 7 cm

Jahr 2019 zurück. Im Jahr 2021 blieben die Nettoexporte trotz eines Rückgangs um 26 % im Vergleich zum Vorjahr auf einem sehr hohen Niveau (5,2 Mio. m³).

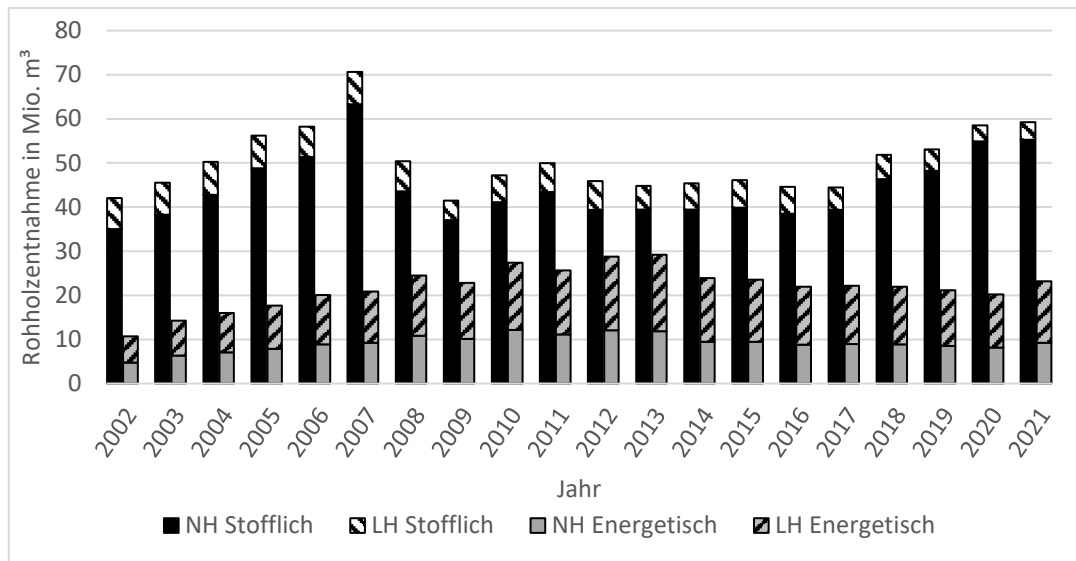


Abbildung 31: Entwicklung der Rohholzentnahme gegliedert nach Holzart und Art der Verwendung.
Quelle: TI-WF, 2023.

Knapp 30 % des Rohholzes wurden 2021 im Inland energetisch verwendet (s. Abbildung 31). Mit etwa 23 % (17,7 Mio. m³) erfolgte dies hauptsächlich in privaten Haushalten (s. Abbildung 32). Seit 10 Jahren liegt der Laubholzanteil der Rohholzverwendung in privaten Haushalten bei über 60 % (62 % im Jahr 2021). Ca. 7 % (5,4 Mio. m³) des Rohholzes wurden in gewerblichen Feuerungsanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Davon wurden etwa 3,7 Mio. m³ in Biomassefeuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung (FWL) kleiner 1 MW und 1,7 Mio. m³ in Biomassefeuerungsanlagen mit einer FWL größer 1 MW energetisch zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt. Auch in diesem Sektor überwiegt der Laubholzanteil mit Werten zwischen 51 und 55 % in den vergangenen 10 Jahren. Im Mittel über alle energetischen Verwendungssektoren lag der Laubrohholzanteil der Jahre 2019, 2020 und 2021 bei 60 % (TI-WF 2023).

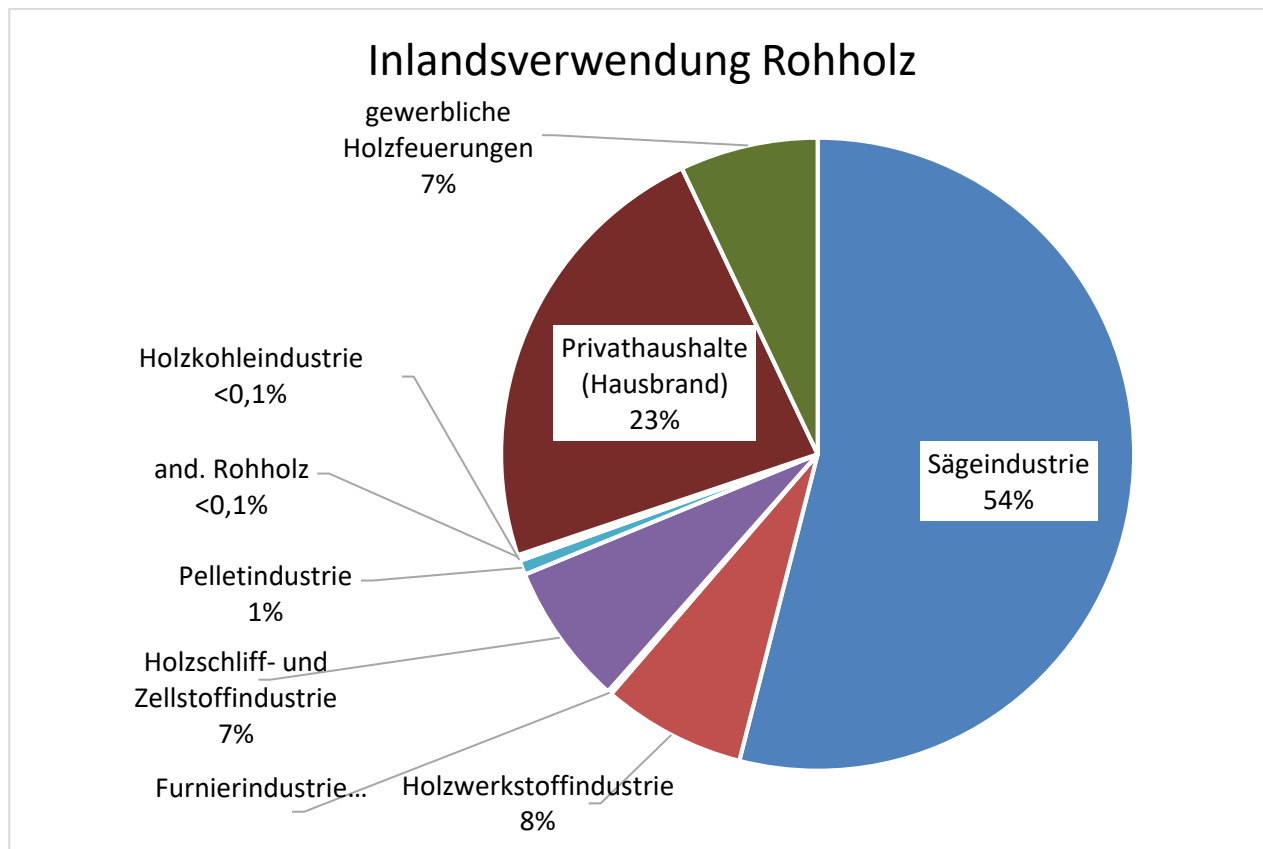


Abbildung 32: Inlandsverwendung von Rohholz (ohne Lager) nach Verwendungssektor im Jahr 2021.
Quelle: TI-WF, 2023.

Im Jahr 2021 wurden etwa 70 % (59,3 Mio. m³) des Rohholzes im Inland stofflich genutzt. Der Nadelholzanteil in der stofflichen Verwendung liegt auch langfristig bei über 90 % (93 % im Jahr 2021). Größter Verwender des Rohholzes mit 54 % (41,4 Mio. m³) des Gesamtvolumens ist die Sägeindustrie (s. Abbildung 32), die ihre Produktion aufgrund der gestiegenen Nachfrage im In- und Ausland und der hohen Nadelrohholzverfügbarkeit durch die Kalamitäten im Vergleich zu den Vorjahren um mehr als 10 % ausweitete. Hauptabnehmer von Schnittholz ist das Bauwesen. Da in diesem Sektor aufgrund der technischen Eigenschaften überwiegend Nadelschnittholz eingesetzt wird, wird und wurde in der deutschen Sägeindustrie auch überwiegend Nadelschnittholz produziert. Im Jahr 2021 waren 94 % des eingesetzten Rohholzes in der Sägeindustrie Nadelholz, nur 6 % Laubholz. Ähnlich hohe Nadelholzanteile gab es bei der Schnittholzerzeugung auch in den Vorjahren. In kleinerem Umfang nutzen die Holzwerkstoffindustrie (8 %) und die Holz- und Zellstoffindustrie (7 %) Rohholz. In der Holz- und Zellstoffindustrie lag der Nadelholzanteil an der Rohholzverwendung im Jahr 2021 bei 89 %. Der Nadelholzanteil in den Vorjahren war ähnlich hoch. Laubrohholz kommt in diesem Sektor nur in geringeren Mengen zum Einsatz (0,6 Mio. m³ im Jahr 2021). Ähnliches gilt auch für die Holzwerkstoffindustrie. Hier beträgt der Nadelholzanteil am Rohholzeinsatz ebenfalls 89 %, wobei die Nadelholzanteile – vermutlich durch die hohe Verfügbarkeit von Kalamitätshölzern – um fast 10 Prozentpunkte im Vergleich zu den Vorjahren deutlich angestiegen sind. Für die Herstellung von Pellets, Holzkohle und Furnieren werden zusammen nur etwa 1 % des Rohholzes verwendet (TI-WF 2023). Der Laubholzanteil in der Furnierproduktion lag im Jahr 2021 bei 88 % (0,1 Mio. m³) mit ähnlich hohem Niveau in den Vorjahren. Der relativ kleine Rohholzanteil am Rohstoffmix der Pelletproduktion basiert hingegen auch langfristig fast ausschließlich auf Nadelholz (98 % bzw. 0,6 Mio. m³ im Jahr 2021). Der Rohholzeinsatz in der Holzkohleproduktion ist marginal, beträgt auch langfristig betrachtet weniger als 0,1 Mio. m³ und basiert zu 100 % auf Laubrohholz (TI-WF 2023).

Die Nutzung von Rinde erfolgte hauptsächlich zur Energieerzeugung (Infro e.K. 2023). Kleinere Anteile werden als Mulch, Einstreu und zur Herstellung von Substraten verwendet. Sägenebenprodukte und sonstiges Industrierestholz werden sowohl stofflich als auch energetisch verwendet. Wie in Abbildung 33 zu sehen, hat die Nutzung von Sägenebenprodukten kontinuierlich, von 8,9 Mio. m³ im Jahr 1990 auf 20,5 Mio. m³ im Jahr 2020, zugenommen. In den Jahren 1990 und 2000 überwog mit 63 % bzw. 78 % die stoffliche Nutzung, v.a. zur Herstellung von Holzwerkstoffen und Holz- und Zellstoff. Bis ins Jahr 2020 hat sich dieser Anteil zugunsten der energetischen Nutzung auf 55 % reduziert. Ein hoher Anteil der energetisch genutzten Mengen wird zunächst zur Herstellung von Holzpellets und -briketts verwendet, ein geringerer Teil wird direkt energetisch genutzt (Infro e.K. 2023). Die Verwendung von sonstigem Industrierestholz lag im Zeitraum von 1990 bis 2020 zwischen 2,5 und 5,1 Mio. m³. Dabei überwog im Jahr 2020 die energetische Nutzung sowohl zur Herstellung von Pellets und Briketts als auch zur direkten Energieerzeugung mit 84 % deutlich (Infro e.K. 2023).

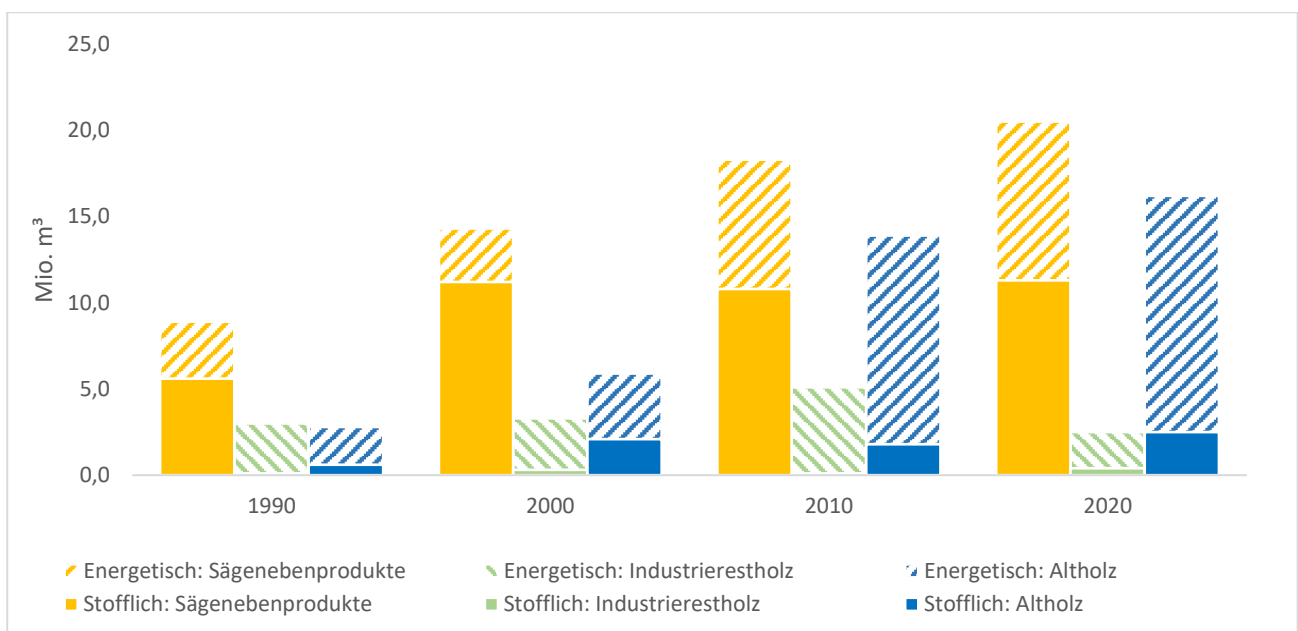


Abbildung 33: Energetische und stoffliche Nutzung von Holzreststoffen in den Jahren 1990, 2000, 2010 und 2020.
Quelle: Infro e.K. 2023.

Die Verwendung von Altholz hat von 2,8 Mio. m³ im Jahr 1990 auf 16,2 Mio. m³ im Jahr 2020 deutlich zugenommen. Der Hauptteil wird dabei energetisch genutzt. Im Jahr 2020 lag dieser Anteil bei knapp 85 %. Die stoffliche Altholznutzung findet nahezu ausschließlich zur Herstellung von Spanplatten statt, 15,4 % der Gesamtmengen werden dazu verwendet (Infro e.K. 2023).

Die Verwendung von Landschaftspflegeholz, Holz von Kurzumtriebsplantagen und Ablauge aus der Holz- und Zellstoffindustrie erfolgt ausschließlich zur Energieerzeugung (Infro e.K. 2023).

Die in Tabelle 14 angegebene Altpapiermenge wird fast ausschließlich zur Herstellung von Papier und Pappe verwendet. Geringe Mengenanteile werden entsorgt oder thermisch beseitigt.

3.1.2 Landwirtschaftliche Biomasse

Autoren: David Kilian, Martin Banse | Thünen-Institut für Marktanalyse

Die Abbildung 34 zeigt die Biomassenutzung (Inlandsproduktion und Importbiomasse) in Deutschland im Jahr 2020. Datenbasis der Abbildung sind Zahlen aus dem Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Tabellen 3090200, 4010400 und 4090200) (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2023b), der Statistikdatenbank der FNR (Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe 2023) und den Futtermittelbilanzen der BLE (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2023). Rund 79 Mio. t_{TM} wurden im Jahr 2020 an Tiere verfüttert. Knapp 24 Mio. t_{TM} dienten der Energieerzeugung und rund 21 Mio. t_{TM} der menschlichen Ernährung. Nur rund 3 Mio. t_{TM} wurden als nachwachsende Rohstoffe stofflich genutzt. Zu beachten ist, dass sich die Wertigkeit der Biomassen unterscheidet. Rohfaserreiche Biomassen (Grünlandaufwuchs, Maissilage, etc.) werden vor allem für die Fütterung von Nutztieren und zur Energieerzeugung verwendet, während die für die menschliche Ernährung genutzten Biomassen hinsichtlich der Inhaltsstoffe und des Energiegehalts deutlich höherwertig sind. Ebenso ist zu beachten, dass in allen Bereichen Biomassen tierischen Ursprungs eingesetzt werden. Eine Summenbildung würde daher zu Doppelzählungen führen, da die als Futtermittel genutzte Biomasse das Ausgangsmaterial für tierische Biomasse ist. Ein direkter Vergleich mit den ermittelten Biomassepotenzialen ist daher nicht möglich.

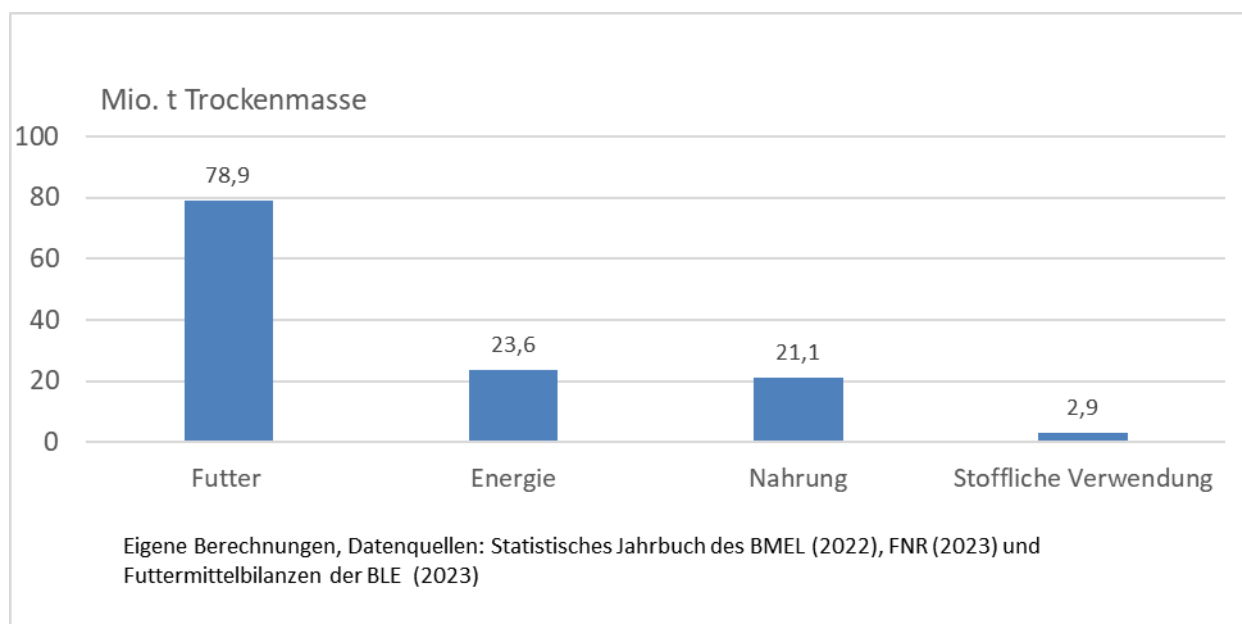


Abbildung 34: Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse in Deutschland im Jahr 2020.

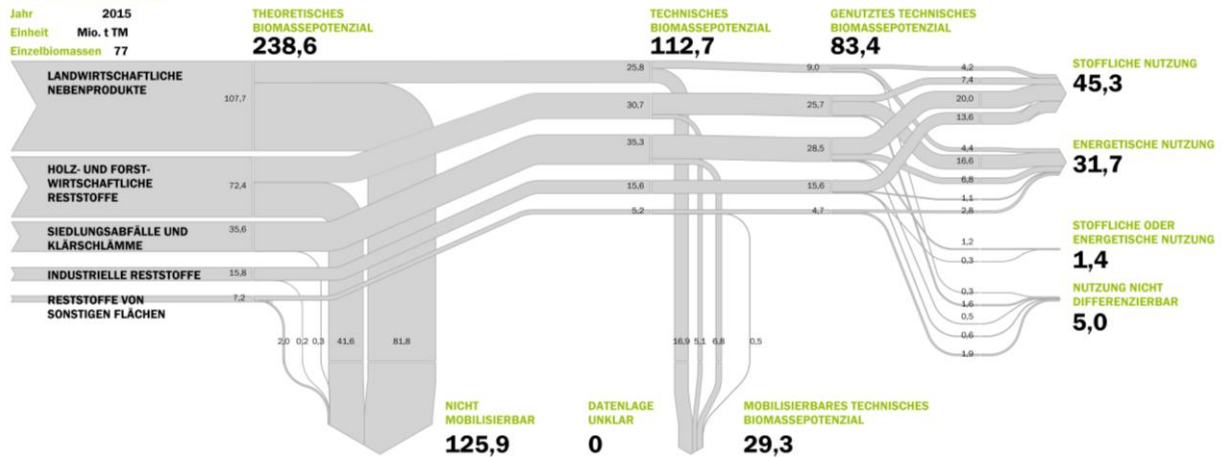
3.1.3 Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe

Autoren: Karl-Friedrich Cyffka, Stefan Majer | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Landwirtschaftliche und sonstige Reststoffe werden sowohl energetisch als auch stofflich genutzt. Abbildung 35 gibt einen Gesamtüberblick als Sankey-Abbildung für fünf Sektoren. Landwirtschaftliche Nebenprodukte wurden im Jahr 2015 in einer Größenordnung von 4,2 Mio. t_{TM} stofflich und 4,4 Mio. t_{TM} energetisch genutzt. Die Verwendung von Siedlungsabfällen und Klärschlamm überwiegt mit einer stofflichen Verwendung von 20 Mio. t_{TM} gegenüber einer energetischen Verwendung mit 6,9 Mio. t_{TM}.

Industrielle Reststoffe werden zu 13,6 Mio. t_{TM} stofflich und nur zu 1,1 Mio. t_{TM} energetisch genutzt. Reststoffe von sonstigen Flächen werden gemäß DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 12/2020) nicht stofflich, sondern energetisch genutzt (2,8 Mio. t_{TM}). Zudem gibt es kombinierte stofflich-energetische Nutzungen (z. B. Kompostierung inkl. Wärmeerzeugung) und Nutzungen, die nicht differenzierbar sind.

BIOGENE RESTSTOFFE IN DEUTSCHLAND MITTELWERTE



Monitoring der Bioökonomie Ressourcenbasis und Nachhaltigkeit

Arbeitsgruppe Biomassereststoffmonitoring (AG BioRestMon)
Quelle: DBFZ Ressourcendatenbank 12/2020



Abbildung 35: Sektorenübergreifende Ergebnisse des Reststoff-Monitorings, hier als Mittelwerte für das Jahr 2015.

Quelle: DBFZ Ressourcendatenbank (12/2020).

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die stoffliche Nutzung verschiedener biogener Reststoffe mit Fokus auf die Nutzung von Getreidestroh, Altpapier und biogenen Abfällen aus privaten Haushalten, Küchen- und Kantinenabfällen, etc.

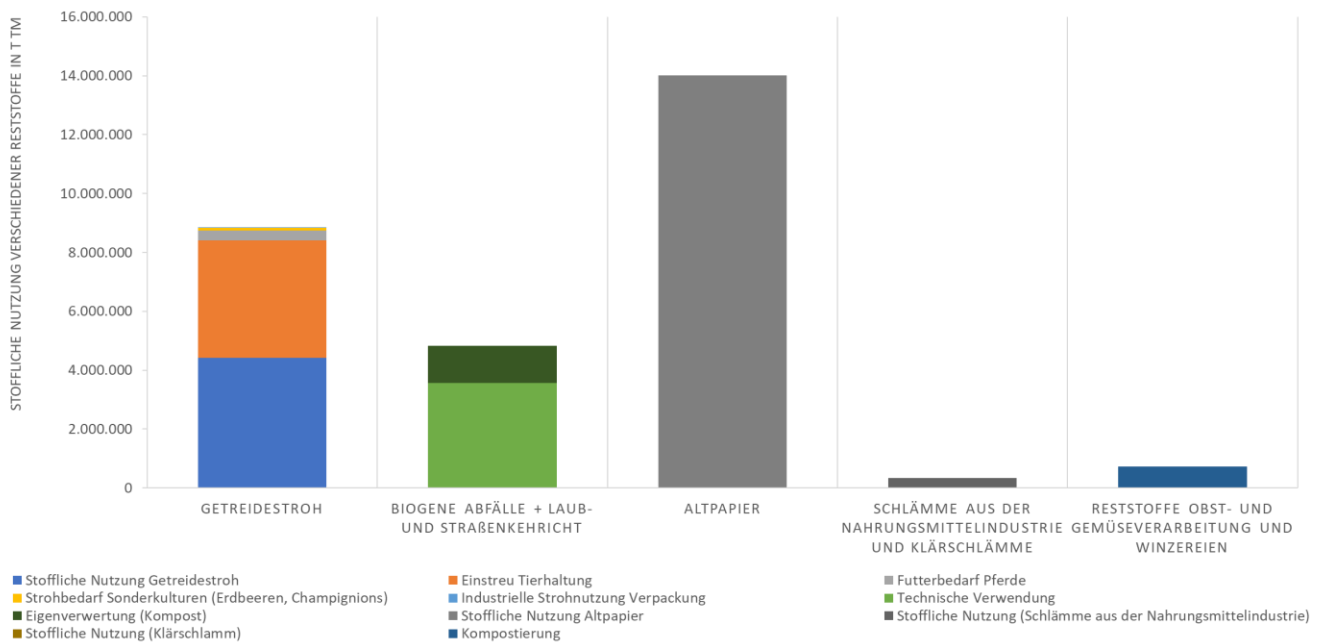


Abbildung 36: Stoffliche Nutzung ausgewählter biogener Reststoffe.

Quelle: eigene Abbildung DBFZ 2023.

Folgend findet eine Aufschlüsselung der Nutzung von landwirtschaftlichen und sonstigen Reststoffen anhand einzelner Nutzungssektoren statt. Im Wärmesektor werden landwirtschaftliche Reststoffe in der Regel nicht zur Verbrennung eingesetzt, da dort eher holzige Reststoffe verwendet werden. Bei der Verbrennung von Klärgas, Deponiegas und Abfällen (gemäß Statistik biogener Anteil bei 50 %) dienen vor allem Siedlungsabfälle und Klärschlamme als Ressourcenbasis (AGEE-Stat 2023). Bei der Biogaserzeugung für Strom (und Wärme) werden insbesondere landwirtschaftliche Reststoffe verwendet. Die Betreiberbefragung des DBFZ (Abbildung 37) schlüsselt die Substrateinsatzmengen in Biogasanlagen für das Jahr 2020 auf, wobei vor allem tierische Exkremente sowie zu geringen Anteilen andere landwirtschaftliche Reststoffe sowie kommunaler Bioabfall genutzt werden. Aufgrund der geringeren Energiedichte gegenüber Energiepflanzen ist der Anteil von Reststoffen massebezogen höher als energiebezogen. Insbesondere die Vergärung von bisher ungenutzten landwirtschaftlichen Reststoffen bietet noch Potenzial für die Erzeugung von Biomethan (Dotzauer et al. 2022).

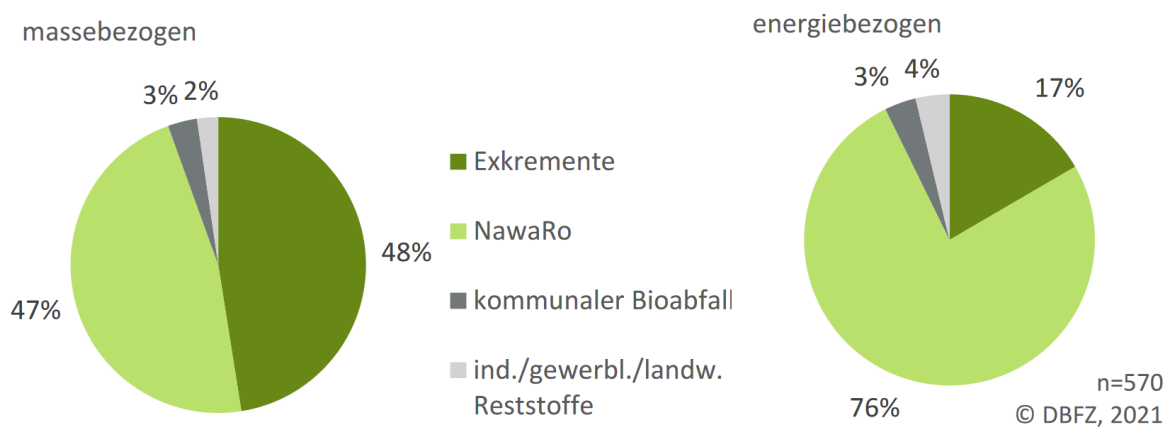


Abbildung 37: Masse- und energiebezogener Substratinput in Biogasanlagen in Deutschland (ohne Biogasaufbereitungsanlagen). Datenbasis: DBFZ Betreiberbefragung 2021, Bezugsjahr 2020
Quelle: Dotzauer et al. 2022.

Im Verkehrssektor werden primär gebrauchte Speiseöle und Fette eingesetzt (Abbildung 38), welche zu REDII Anhang IX Teil B zählen. Der Großteil der in Deutschland verwendeten fortschrittlichen Biokraftstoffe (Annex IX Teil A) wird aus nur drei Abfall- bzw. Reststoffkategorien produziert. Insgesamt entstammen rund 75 % aller abfallbasierten Biokraftstoffe aus dem Ausland. Die Einsatzmenge von fortschrittlichen Biokraftstoffen von 9,1 PJ in 2021 könnte bis 2030 auf ca. 100 PJ anwachsen. Diese Entwicklung ergibt sich aufgrund einer ansteigenden Mindestquote sowie Anreizen (Doppelanrechnung der THG-Minderung) zur Übererfüllung (Schröder und Naumann 2023, S. 60; BMUV 2022).

| Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen - fortschrittlich gemäß 38. BImSchV Anlage 1 Nr. Jahr 2019 Jahr 2020 Jahr 2021 (Annex IX Teil A) In TJ | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|---------------|---------------|---------------|
| 2 (Biomasse-Anteil an gemischten Siedlungsabfällen) | | 0 | 37 |
| 3 (Bioabfälle aus privaten Haushaltungen) | 106 | 94 | 59 |
| 4 (Biomasse-Anteil an Industrieabfällen) | 476 | 1.112 | 3.463 |
| 5 (Stroh) | | 129 | 302 |
| 6 (Gülle und Klärschlamm) | | 184 | 228 |
| 7 (Abwasser aus Palmölmühlen und leere Palmfruchtbündel) | 1 | 3.290 | 2.835 |
| 9 (Rohglycerin) | 36 | 47 | 697 |
| 11 (Traubentrester und Weintrub) | | 0 | 0 |
| 15 (Biomasse-Anteile an Abfällen und Reststoffen aus der Forstwirtschaft) | | 1.433 | 1.495 |
| 16 (anderes zellulosehaltiges Non-Food-Material) | 129 | | 4 |
| Zwischensumme fortschrittliche Biokraftstoffe | 748 | 6.288 | 9.119 |
| Anteil Top 3 Abfälle/Reststoffe (Ziffern 4, 7 und 15) | | 93% | 85% |
| Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen - nicht fortschrittlich gemäß 38. BImSchV Jahr 2019 Jahr 2020 Jahr 2021 (Annex IX Teil B) In TJ | | | |
| Gebrauchte Speiseöle, tierische Fette und sonstige | 33.849 | 39.473 | 30.982 |
| Abfälle und Reststoffe Gesamt (Annex IX Teil A und B) | 34.598 | 45.761 | 40.102 |
| Abfälle und Reststoffe mit Herkunft Deutschland | 7.231 | 9.920 | 10.531 |
| Abfälle und Reststoffe mit Herkunft Deutschland (%) | 21% | 22% | 26% |

Abbildung 38: Nutzung von Biokraftstoffen aus Abfällen und Reststoffen 2019-2021.
Quelle: (BLE 2022a, 2022b).

In der Chemieindustrie werden gemäß Statistik der FNR (Becker et al. 2022) tendenziell keine Reststoffe (mit Ausnahme tierischer Fette), sondern vor allem Nawaro eingesetzt. Im Pflanzenbau werden aufgrund der Torfminderungsstrategie zunehmend alternative Substrate eingesetzt. Im Jahr 2021 wurden bereits 33 % aller Torfsubstrate aus alternativen Substratstoffen hergestellt (Ziel 2030: 100 %) (BMEL 2022b).

Tabelle 15: Einsatz alternativer Substratausgangsstoffe in 2021.
Quelle: (Hirschler et al. 2022; BMEL 2022b).

| Alternativer Substratausgangsstoff | Mio. m ³ | Mio. t _{TM} |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Grünkompost | 1,6 | 0,9 |
| Holzfasern/Holz (Umrechnung mit Holz) | 1,4 | 0,7 |
| Rindenumus | 0,3 | 0,063 |
| Kokosprodukte | 0,2 | 0,1 |
| Pinienrinde (Holznebenprodukte) | 0,035 | 0,014 |

3.2 Trends der Biomassenachfrage

3.2.1 Holzbiomasse sowie Rinde

Autor:innen: Holger Weimar, Christian Morland, Susanne Iost | Thünen-Institut für Waldwirtschaft

Im folgenden Abschnitt 3.2.1.1 werden zunächst die Szenarien aus dem Projekt BEPASO erläutert, um den Rahmen der Modellierungsergebnisse zu erläutern. Im darauffolgenden Abschnitt 3.2.1.2 werden die Ergebnisse der BEPASO-Szenarien dargestellt sowie weitere Modellierungsergebnisse aus der Literatur, soweit Daten für Deutschland verfügbar waren.

3.2.1.1 Die BEPASO-Szenarien

Die Analyse von Szenarien zielt darauf ab, alternative Versionen möglicher Zukünfte zu untersuchen. Szenarien sind daher nicht als Prognosen zu interpretieren, sondern beschreiben Zukünfte, wie sie unter den jeweils beschriebenen Rahmenbedingungen sein könnten („what if“; vgl. z. B. Jonsson et al. 2018). Meist werden mehrere unterschiedliche Szenarien berechnet, um die Entwicklungen der verschiedenen Modellierungsergebnisse der verschiedenen Szenarien gegenüberstellen zu können.

Der folgende erläuternde Text zu den BEPASO-Szenarien liegt in sehr ähnlicher Form bereits als Word-Dokument „BEPASO-Szenarien“ vor. In dem Projekt BEPASO wurden in verschiedenen Workshops die Szenarien „(1) Bioökonomie am Tropf“, „(2) Bioökonomie-Inseln“ und „(3) Bioökonomie-Wende“ entwickelt. Die Ausgangssituation ist in allen Szenarien identisch, Startpunkt ist das Jahr 2015.

Das Szenario **„Bioökonomie am Tropf“** („Tropf“) stützt sich für ökonomische und demographische Entwicklungen auf das SSP-2-Szenario („Middle of the Road“). Biomasse spielt hier auch für die energetische Nutzung kaum eine Rolle. In dem Szenario haben Klima- und Umweltschutz in der Gesellschaft einen geringen Stellenwert. Die Folgen des Klimawandels werden in Deutschland zwar wahrgenommen, bewirken aber keine grundlegende Umkehr der gegenwärtigen Wirtschaftsweise. Einer nachhaltigen Entwicklung wird keine Bedeutung beigemessen, weil andere gesellschaftliche Herausforderungen (z. B. innere Sicherheit, Arbeitsplätze) als wichtiger angesehen werden. Dies spiegelt sich auch in der politischen Schwerpunktsetzung wider. Anreize im Umweltschutz (z. B. die Ausweitung von Schutzgebieten) fehlen genauso wie eine explizite Förderung von bioökonomischen Technologien und Prozessen. Dies beeinträchtigt Investitionsaktivitäten in der bio-basierten Wirtschaft. Lediglich einzelne Nischenprodukte sind auf dem Markt. Die „Egal-Haltung“ gegenüber Nachhaltigkeit und Umwelt bewirkt, dass die Menschen sich kaum ressourcen- und umweltbewusst verhalten, bio-basierte Produkte finden keine Akzeptanz in der breiten Bevölkerung. Der Zielkonflikt „Tank oder Teller“ ist Gegenstand der Diskussion.

Die Technologieentwicklung in der Bioökonomie ist aufgrund fehlender Förderung gering. Auch in der Industrie wird kein strategischer Schwerpunkt auf die Entwicklung der Bioökonomie gelegt. Gründe hierfür sind nicht ausreichende bzw. in ihren Wirkungen widersprüchliche politische Unterstützung, geringe Markterwartungen und eine geringe Investitionssicherheit. Auch die gesellschaftliche Skepsis in Bezug auf „nachhaltige“ Produkte und deren Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung lässt viele Produzenten an der Wirtschaftlichkeit und Zukunftsfähigkeit der Bioökonomie zweifeln.

Der internationale Handel ist durch Konflikte geprägt, da vorwiegend nationale Interessen verfolgt werden. Zollschränken und die Protektion der heimischen Erzeugung werden beibehalten.

Der jährliche Energieverbrauch verringert sich in Deutschland nur leicht. Auch im Jahr 2050 wird der größte Teil von fossilen Energieträgern (Öl, Gas) gedeckt. Im Verkehrssektor steigt die Nachfrage nach fossilen Energieträgern vor allem im Straßen- und insbesondere im Flugverkehr, wo kaum bezahlbare erneuerbare Alternativen existieren, so dass es zu steigenden CO₂-Emissionen kommt. Die Emissionen aus der Landwirtschaft können zwar leicht reduziert werden, dennoch steigen die deutschlandweiten Gesamtemissionen bis 2050 an.

Die Nachfrage nach Energieholz bleibt bis 2050 konstant und wird größtenteils durch inländische Produktion gedeckt. Auch in den chemischen Sektoren steigt der Anteil von Biomasse am Gesamtinput

nur leicht. Die deutsche Nachfrage nach Holz für die stoffliche Verwertung verringert sich aufgrund einer Konsumverschiebung hin zu kostengünstigeren mineralölbasierten Produkten (z. B. Plastikmöbeln).

Global ist die Landnutzung nur unzureichend reguliert, sodass in vielen Ländern bis 2030 steigende Entwaldungsraten durch Ausweitung der Landwirtschaft festzustellen sind. Ab 2030 wird dieser Trend durch Aufforstungen in Europa und China teilweise ausgeglichen.

Das Szenario **„Bioökonomie-Inseln“** („Inseln“) ist für die Bereiche der ökonomischen und demographischen Entwicklung angelehnt an das SSP-Szenario 4 (“Inequality—A Road Divided”). Dem Anstieg der Pro-Kopf-Einkommen und des Wohlstands folgt auch ein steigendes Umweltbewusstsein. In wohlhabenden Bevölkerungsschichten wird die schon starke Nachfrage nach bio-basierten Produkten so weiter erhöht, während sich die weniger wohlhabenden Gesellschaftsschichten diese Produkte aufgrund der hohen Preise kaum leisten können. Der Diskurs über eine nachhaltige (und wahrgenommen gesunde), aber auch teure Produktion gegenüber einer Produktion von Gütern, die für alle erschwinglich sind, wird zunehmend intensiv geführt.

Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Folgen des Klimawandels steigt an und führt zusammen mit optimierten Herstellungsprozessen und einer verbesserten Rohstoffausbeute zu technologischem Fortschritt hauptsächlich in einkommensstarken Ländern.

Bestimmte bioökonomierelevante Aktivitäten werden gefördert. Hierzu zählen Ertragssteigerungen in der Landwirtschaft, Verringerung des Rohstoffeinsatzes bei bio-basierten Produkten, Kaskadennutzungen, verbesserter Materialaufschluss in Prozessnutzungen und die Schließung von Stoffkreisläufen. Fortschritte im Bereich der Bioökonomie werden hauptsächlich von der Industrie initiiert oder als Reaktion auf entsprechende Marktsignale in den Markt geschoben.

Der internationale Handel wird gelockert und ist weitgehend unbeschränkt, Zölle und Protektionen werden abgebaut.

Der jährliche Energieverbrauch verringert sich in Deutschland. Im Jahr 2050 wird ein Großteil des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt. Biomasse hat einen hohen Anteil an der Energiebereitstellung. In den chemischen Sektoren steigt der Anteil von Biomasse am Gesamtinput. Die für die stoffliche oder energetische Verwertung erforderliche Biomasse wird weiterhin zu einem größeren Teil importiert. Die Holznachfrage für eine traditionelle stoffliche Verwertung sowie die Nachfrage nach Energieholz steigen in Deutschland moderat an. Aufgrund der Digitalisierung sinkt der Papierkonsum.

In moderatem Umfang werden Flächen als ökologisch geschützte Flächen neu ausgewiesen. Aufgrund des deutlich gestiegenen Bedarfs an Biomasse orientiert sich die Flächennutzung in Deutschland hauptsächlich am Prinzip des Funktionsschutzes, wonach Flächen zwar für eine Nutzung freigegeben werden, diese Nutzung aber nachhaltig erfolgen muss. Aufforstungen in Europa und China führen zu einer nur geringen Zunahme der globalen Waldfläche.

Das Szenario **„Bioökonomie Wende“** (“Wende“) beschreibt eine umfassende Transformation zu einer Bioökonomie. Für ökonomische und demographische Entwicklungen ist dieses Szenario an das SSP-1-Szenario (“Sustainability—Taking the Green Road“) angelehnt. In dem Szenario wächst unter sich rasant verändernden Umweltbedingungen eine junge, nachhaltig gebildete Generation heran, die ein gesteuertes Umdenken und Umlenken hin zu einer nachhaltigen und gerechten Weltordnung einfordert.

Die Erhöhung des Pro-Kopf-Einkommens und des Wohlstands in der gesamten deutschen Gesellschaft fördern eine Steigerung von Umweltbewusstsein und der bewussten Wahrnehmung der Folgen des Klimawandels. Der Konkurrenz-Diskurs um Tank oder Teller verschärft sich zunächst, wird jedoch durch die Verbreitung innovativer Lösungen entschärft.

Die Politik ist konsequent auf den gesamtgesellschaftlichen Umbau zu einer zirkulären, bio-basierten Ökonomie ausgerichtet und setzt Anreizinstrumente wie Subventionen und Steuern, aber auch Regelungsmechanismen, konsequent ein. Eine Konsumgütersteuer basierend auf dem ökologischen Fußabdruck von Produkten (inkl. Nahrungsmittel) verteuert ressourcenintensive Produkte und Dienstleistungen und begünstigt nachhaltigen Konsum einschließlich Konsumverzicht (Suffizienz). Soziale Härten durch steigende Verbraucherpreise werden durch geeignete Kompensationsmechanismen abgefedert, die auch eine Umverteilung von Vermögen beinhalten.

Die rasante Transformation ist durch technologische Sprünge geprägt: Neue Technologien zur Energieerzeugung und zur Verarbeitung von Biomasse, neue landwirtschaftliche Systeme und Züchtungsmethoden ermöglichen die Entkopplung der Biomasseproduktion von der Fläche. Gleichzeitig ermöglicht die industrielle Produktion von Rohstoffen mit Hilfe von Mikroorganismen (insbesondere für den chemischen Sektor) eine Freisetzung von Produktionsflächen. Dadurch verringert sich der Biomassebedarf terrestrischen Ursprungs in der energetischen wie auch in der stofflichen Nutzung deutlich. Dieser verminderte Bedarf kann hauptsächlich durch inländische Produktion gedeckt werden. Innovative Lösungen ersetzen den Fleischbedarf für Ernährungszwecke durch in-vitro-Fleischsynthese, erlauben die Synthese von Chemikalien auf Basis artifizierender Fotosynthese oder die Kohlenstoffgewinnung aus CO₂.

Der internationale Handel ist ab 2030 weitgehend barrierefrei.

Da die Herstellung von Möbeln und Gebäuden zunehmend auf Holz und Holzkomponenten basiert, steigt zwar die Holznachfrage für eine stoffliche Verwertung, allerdings kann aufgrund der technologischen Fortschritte in der Holzverarbeitung der Einsatz von Primärholz je Endprodukt deutlich gesenkt werden.

Der Energieverbrauch pro Jahr in Deutschland sinkt stark. In 2050 wird ein sehr großer Anteil des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt. Die Nachfrage nach Kraftstoffen im Verkehr sinkt aufgrund des stark ausgebauten und subventionierten öffentlichen Nahverkehrs beträchtlich. In der Gesamtheit führt dies auch zu einer starken Reduzierung der deutschlandweiten Gesamtemissionen bis 2050 im Vergleich zum Niveau von 2015.

Eine global stark regulierte Landnutzung, Aufforstungen, Waldregeneration sowie die Übertragung europäischer Umweltpolitik auf die globale Ebene tragen zu einer deutlichen Reduktion der globalen Entwaldungsraten bei. Die globale Entwaldung wird gestoppt, so dass bis 2050 eine deutliche Zunahme von Waldgebieten zu beobachten ist.

Die Ausweisung neuer geschützter Flächen befindet sich auf einem moderaten Niveau. Dies wird auch durch den durch die Innovationen bedingten Rückgang der benötigten landwirtschaftlichen Fläche ermöglicht. Freiwerdende Flächen werden vorrangig für den Naturschutz und die Wiederherstellung funktionierender Waldökosysteme genutzt.

Aufgrund einer konsequenten und flächendeckenden Förderung der ökologischen Produktion durch die Politik kommt es bis 2050 zu einem schrittweisen Wandel hin zu einer ökologischen Landwirtschaft. Der Einsatz von Pestiziden und Düngern kann daher deutlich reduziert werden. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung des Zustands der anthropogen geschaffenen sowie natürlichen Ökosysteme.

3.2.1.2 Ergebnisse aus BEPASO und weitere Literatur

Wie bereits weiter oben erläutert, ist bei den folgenden Daten zu beachten, dass es sich um die Produktion von Rohholz (Entnahme aus dem Wald) handelt und nicht um das potenzielle Rohholzaufkommen wie durch die weiter oben beschriebenen Modellierungen mit WEHAM oder vom Öko-Institut. Ein Modell zur Simulation von Aufkommenspotenzialen für Waldholz (wie z. B. WEHAM) wurde im Projekt BEPASO nicht verwendet. Die Rohholzproduktion wurde, grundsätzlich endogen begrenzt durch Annahmen zur maximalen Produktionsmenge von Rohholz in Verbindung mit der Nachfrage nach Holzprodukten, mit dem Modell GFPM berechnet. Die Potenzialdaten zum Status quo (s. Abschnitt 2.2.1) können daher nur eingeschränkt mit den Ergebnissen zur Rohholzproduktion aus den BEPASO-Szenarien verglichen werden.

Abbildung 39 zeigt Ergebnisse aus dem BEPASO-Projekt für die Rohholzproduktion in Deutschland von 2015 bis 2050. Im Inseln-Szenario steigt die Rohholzproduktion um 7,5 % (von 74,8 auf 80,4 Mio. m³), während die Produktion im Wende-Szenario um 3,7 % (auf 72,0 Mio. m³) und im Tropf-Szenario um 7,6 % (auf 69,1 Millionen m³) sinkt. Dabei reduziert sich der Nettohandel⁷ (Exportmenge minus Importmenge) in allen Szenarien, am stärksten aber im Inseln-Szenario (von -5,4 auf -3,5 Mio. m³)⁸, gefolgt vom Tropf-Szenario (auf -4,3 Mio. m³)⁹ und dem Wende-Szenario (auf -5,0 Mio. m³)¹⁰. Damit ergibt sich für das Jahr 2050 somit ein rechnerischer Rohholzverbrauch von 83,9 Mio. m³ im Inseln-Szenario (+4,6 % ggü. 2015), von 73,4 Mio. m³ im Tropf-Szenario (-8,5 %) und 77,0 Mio. m³ im Wende-Szenario (-4,0 %, siehe Abbildung 40).

⁷ Anmerkung: Aufgrund der Homogenitätsannahme wertet das GFPM Im- und Exporte als vollkommene Substitute zueinander. In Folge wird in der Modellsimulation hauptsächlich der Nettohandel optimiert. Eine Analyse nach Mengen getrennt für Importe und Exporte muss dies berücksichtigen.

⁸ Die Importmenge sinkt dabei von 9,2 auf 8,0 Mio. m³.

⁹ Die Importmenge sinkt dabei auf 7,8 Mio. m³.

¹⁰ Die Importmenge sinkt dabei auf 8,9 Mio. m³.

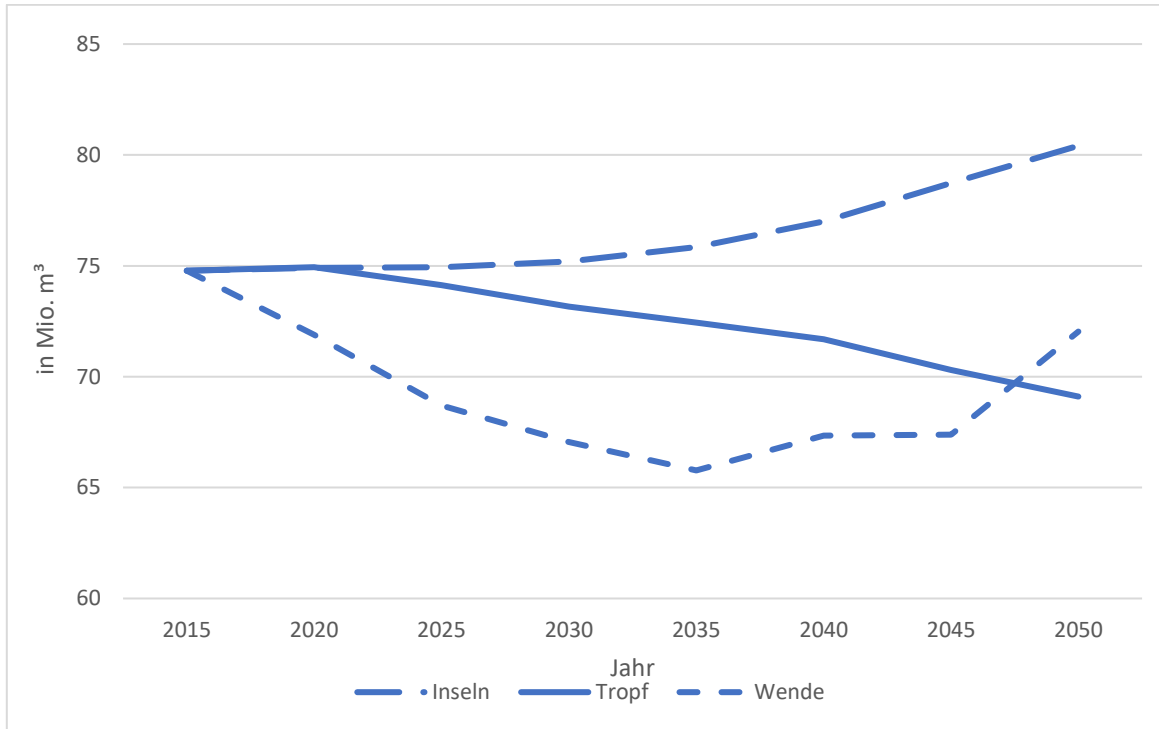


Abbildung 39: Rohholzproduktion in Deutschland zwischen 2015 und 2050.
 Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

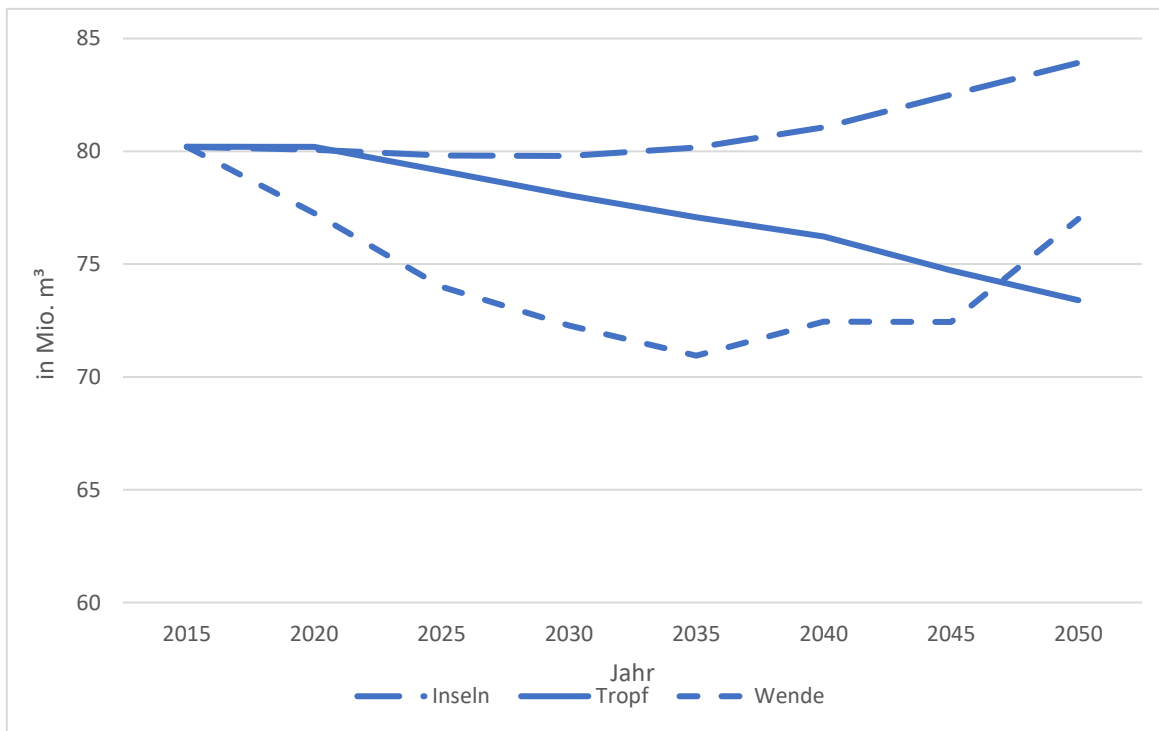


Abbildung 40: Inlandsnutzung von Rohholz in Deutschland.
 Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

Eine detailliertere Analyse nach stofflichem und energetischem Inlandsverbrauch¹¹ von Rohholz (Abbildung 41 und Abbildung 42) zeigt, dass nur im Wende-Szenario die stoffliche Nutzung bis 2050 steigt (um 28,1 % von 51,0 Mio. m³ auf 65,3 Mio.), in den beiden anderen Szenarien sinkt die stoffliche Rohholznutzung bis 2050 leicht (um 7,4 % auf 47,2 Mio. m³ im Inseln-Szenario und um 17,6 % im Tropf-Szenario). Der Nettohandel steigt in allen Szenarien: im Wende-Szenario um 8,5 % (von -4,9 auf -4,5 Mio. m³), im Tropf-Szenario um 20,9 % (auf -3,9 Mio. m³) und im Inseln-Szenario um 41,8 % (auf -2,9 Mio. m³). Die energetische Nutzung von Rohholz verhält sich hingegen genau entgegengesetzt (Abbildung 42). Im Wende-Szenario sinkt diese bis 2050 stark (um 68,8 % von 26,4 Mio. m³ auf 8,2 Mio. m³), während sie in den Szenarien Inseln (um 25,9 % auf 33,3 Mio. m³) und Tropf (um 5,5 % auf 27,9 Mio. m³) steigt. Der Nettohandel für den energetischen Inlandsverbrauch von Rohholz ist über alle Szenarien relativ gering ausgeprägt, erhöht sich im Tropf- bzw. Wendeszenario nur leicht (um 19,6 % auf -0,4 Mio. m³ im Ersteren und um 5,0 % auf -0,48 Mio. m³ im Letzteren)¹² und steigt im Inseln-Szenario (um 28,9 % auf -0,7 Mio. m³)¹³.

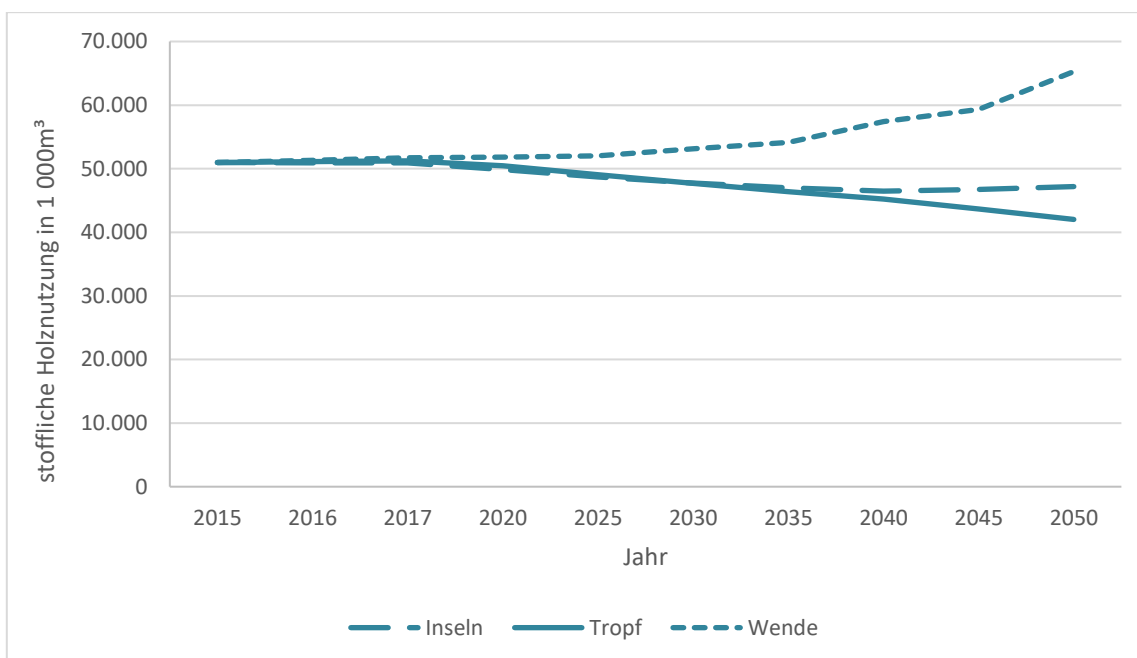


Abbildung 41: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2015 bis 2050.
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

¹¹ Bei diesen Darstellungen wird das stofflich genutzte „other industrial roundwood“ nicht berücksichtigt, da es nicht nach Nadel- und Laubholz unterschieden werden kann. Für „other industrial roundwood“ liegt kein Handel vor. Das Aufkommens- und Verbrauchsvolumen liegt in allen Szenarien bei 2,8 Mio. m³ im Jahr 2015 und steigt bis 2050 leicht an auf 3,5 Mio. m³.

¹² Die Importmenge sinkt leicht auf 0,6 Mio. m³ im Wende-Szenario und auf 0,5 Mio. m³ im Tropf-Szenario.

¹³ Die Importmenge steigt auf 0,8 Mio. M³.

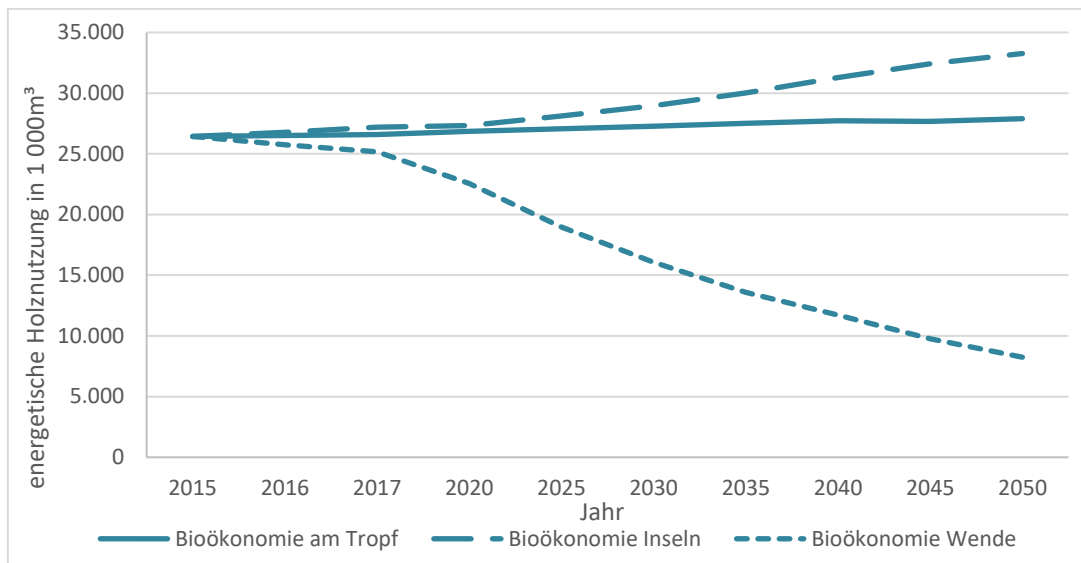


Abbildung 42: Energetische Rohholznutzung in Deutschland von 2015 bis 2050.
 Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

Ein Blick auf die stoffliche Nutzung getrennt nach Laub- und Nadelrohholz zeigt (Abbildung 43), dass die Laubholznutzung in den Szenarien Inseln (+1,1 %) und Wende (+64 %) stärker zunimmt als die jeweilige Nadelholznutzung (-8,5 % im Inseln-Szenario, respektive +23,5 % im Wende-Szenario). Im Tropf-Szenario sinken sowohl die stoffliche Laubholznutzung (um 33,1 % von 5,6 Mio. m³ auf 3,8 Mio. m³) als auch die Nadelholznutzung (um 15,7 % von 45,4 Mio. m³ auf 38,3 Mio. m³). Der Nettohandel im Tropf-Szenario liegt dabei bei -4,4 Mio. m³ für Nadelholz in 2050 (-20,3 %) und bei 0,6 Mio. m³ für Laubholz (-16 %)¹⁴. Im Wende-Szenario beträgt der Nettohandel -5,2 Mio. m³ für Nadelholz (-6,5 %) und 0,7 Mio. m³ für Laubholz (+8,4 %)¹⁵, während der Nettohandel im Inseln-Szenario bei -3,8 Mio. m³ (-31,7 %) für Nadelholz und 1,0 Mio. m³ (+43,6 %) für Laubholz liegt¹⁶.

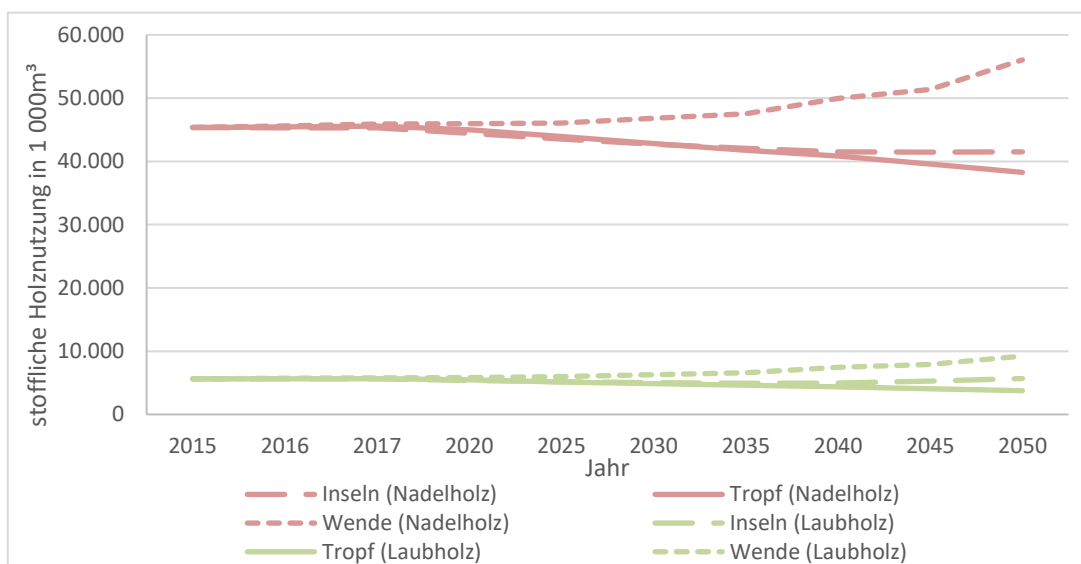


Abbildung 43: Stoffliche Nutzung von Nadel- und Laubrohholz in Deutschland von 2015 bis 2050.
 Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

¹⁴ Die Importmenge sinkt von 8,0 auf 6,7 Mio. m³ für Nadelholz und von 0,5 auf 0,4 Mio. m³ für Laubholz.

¹⁵ Die Importmenge sinkt auf 7,8 Mio. m³ für Nadelholz und auf 0,5 Mio. m³ für Laubholz.

¹⁶ Die Importmenge sinkt auf 6,7 Mio. m³ für Nadelholz und auf 0,4 Mio. m³ für Laubholz.

Ergänzend zu den Ergebnissen der BEPASO-Szenarien wird die zukünftige Nutzung von Holz in der vorhandenen Literatur ebenfalls vornehmlich durch szenarienbasierte Modellierung geschätzt. Es gilt auch hier, dass die ermittelten Ergebnisse nur im Kontext der jeweiligen Szenarienbeschreibungen betrachtet werden sollten. Im Folgenden werden zusätzlich drei weitere Studien betrachtet, die Ergebnisse für Deutschland veröffentlicht haben. Die Parameter der Studien werden in Tabelle 16 dargestellt. Eine Schwierigkeit des Vergleichs liegt in den unterschiedlichen Zeiträumen, die jede Studie berücksichtigt, besonders die Startzeiträume. Die betrachteten Studien, die Ergebnisse für Deutschland darstellen, wurden sämtlich mit dem GFPM modelliert. Allerdings wurde das Modell jeweils spezifisch für die Szenarioberechnungen angepasst. So werden spezifische Entwicklungen im Bereich der energetischen Holznutzung in Buongiorno et al. (2012) angegeben. Im Bereich der stofflichen Holznutzung konnten ergänzend Simulationsergebnisse aus Buongiorno et al. (2012) und Schier und Weimar (2018) extrahiert werden, während Ergebnisse für die stoffliche Verwendung von Laub- und Nadelholz in Ergänzung zu den BEPASO-Ergebnissen nur noch aus Schier und Weimar (2018) zur Verfügung standen.

Tabelle 16: Vergleich von Parametern verschiedener Szenariomodellierungen.

| | Schier und Weimar 2018 | Buongiorno et al. 2012 | Schier et al. 2022 | BEPASO: unveröffentliche Daten Banse et al. 2020a; Morland und Schier 2020 |
|-----------------------|--|--|--|--|
| Art der Analyse | Szenarienbasierte Modellierung | Szenarienbasierte Modellierung | Szenarienbasierte Modellierung | Szenarienbasierte Modellierung |
| Bezugsjahr | 2012 | 2006 | 2017 | 2015 |
| Betrachtungszeitraum | 2015 - 2050 | 2006-2060 | 2017-2050 | 2015-2050 |
| Verwendetes Modell | Global Forest Product Model (GFPM) | Global Forest Product Model (GFPM) | Global Forest Product Model (GFPM) | Global Forest Product Model (GFPM) |
| Modellierte Parameter | Rohholz und Holzhalbwaren (Schnittholz, Zellstoff, Platten etc.) | Rohholz und Holzhalbwaren (Schnittholz, Zellstoff, Platten etc.) | Rohholz und Holzhalbwaren (Schnittholz, Zellstoff, Platten etc.) | Rohholz und Holzhalbwaren (Schnittholz, Zellstoff, Platten etc.) |

Schier und Weimar (2018) haben für die Modellierung des Holzmarktes Ergebnisse der WEHAM-Waldbewirtschaftungsszenarien (Rock et al. 2016a; Oehmichen et al. 2018), vgl. Kapitel 2.3.2) und der Holzverwendungsszenarien (Glasenapp et al. 2017a) verwendet, um die möglichen Auswirkungen einer veränderten Rohholzverfügbarkeit auf den Holzmarkt zu untersuchen. Die Berechnungen aus den WEHAM-Modellierungen setzen den Rahmen für mögliche Verschiebungen im Angebot oder der Nachfrage nach Holzprodukten und damit verbundenen Wechselwirkungen. Ziel der Holzmarktmodellierung war es auch, mit der Nutzung des globalen Modells GFPM die Verflechtungen der deutschen Forst- und Holzwirtschaft mit den internationalen Holzmärkten aufzuzeigen und die Angebots- und Nutzungsszenarien aus dem Projekt WEHAM-Szenarien (BAS/REF, HPS/FÖR, NPS/RES) (Rosenkranz et al. 2017) in der Holzmarktmodellierung zusammenzuführen. Die Analyse von Produktion, Handel und rechnerischem Verbrauch von Rohholz und Holzhalbwaren erfolgte mithilfe des vom Thünen-Institut für Waldwirtschaft weiterentwickelten GFPM, bei dem nach Nadel- und Laubholz unterschieden wird. Als

exogene Vorgabe zur Modellierung verwenden Schier und Weimar (2018) das potenzielle Rohholzaufkommen aus den jeweiligen WEHAM-Szenarien sowie den korrespondierenden Brennholzkonsum aus WEHAM-Verwendungsszenarien (Glaserapp et al. 2017a).

In Abbildung 44 sind die Ergebnisse zur stofflichen Rohholznutzung aus Schier und Weimar (2018) zusammengefasst. Für das Basis-/Referenzszenario (BAS-REF) ist von 2012 bis 2030 ein Anstieg von 20 % zu beobachten (von 44,5 Mio. m³ auf 53,4 Mio. m³), der sich bis 2050 noch einmal um 48,1 % erhöht (von 53,4 Mio. m³ in 2030 auf 79,1 Mio. m³ in 2050). Im Vergleich dazu entwickelt sich die stoffliche Holznutzung im Holzpräferenz-/Förderungsszenario (HPS-FÖR) relativ konstant und steigt von 44,5 Mio. m³ in 2012 auf 70,6 Mio. m³ in 2030 (+58,7 %) und 103,3 Mio. m³ in 2050 (+46,3 % im Vergleich zu 2030). Im Naturschutzpräferenz-/Restriktionsszenario (NPS-RES) ist dagegen bis 2030 ein leichter Zuwachs der stofflichen Holznutzung von 9,7 % zu beobachten (von 44,5 Mio. m³ in 2012 auf 48,8 Mio. m³ in 2030), die dann bis 2050 aber wieder ungefähr auf das Niveau von 2012 zurückfällt (-6,4 % im Vergleich zu 2030, von 48,8 Mio. m³ in 2030 auf 45,7 Mio. m³ in 2050).

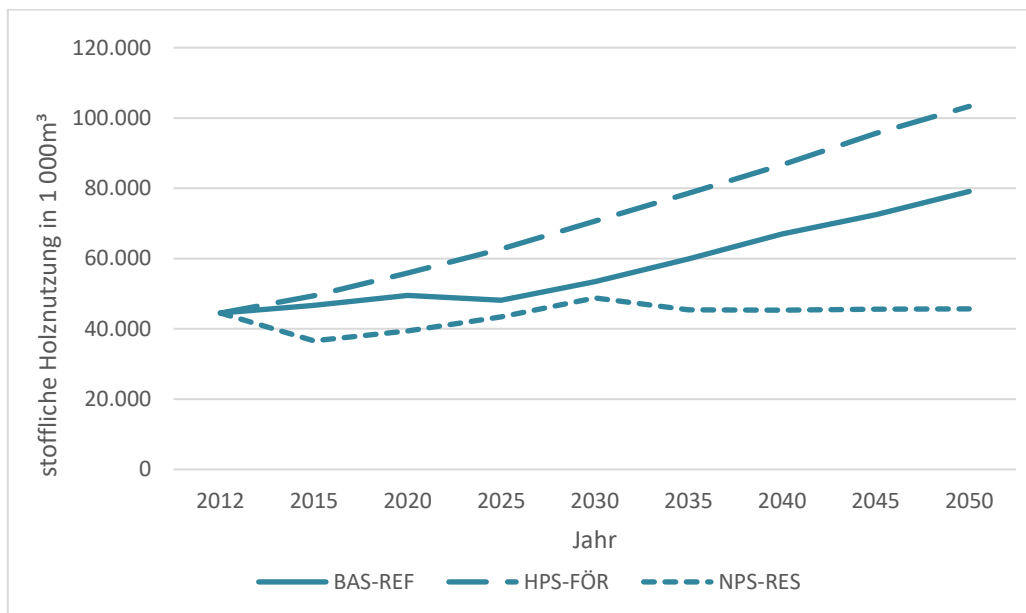


Abbildung 44: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2012 bis 2050.
Quelle: eigene Darstellung nach Schier und Weimar, 2018.

In der nachstehenden Abbildung 45 sind zusätzlich zu den oben genannten Ergebnissen die Entwicklungen getrennt nach Nadel- und Laubholz dargestellt. Hier ist zu beobachten, dass die stoffliche Nutzung von Nadelrohholz bis 2050 in allen Szenarien steigt (von 40,3 Mio. m³ in 2012 auf 66,3 Mio. m³ im Referenzszenario; auf 91,1 Mio. m³ im Förderungsszenario; auf 44,4 Mio. m³ im Restriktionsszenario). Die Laubholznutzung steigt bis 2050 hingegen nur im Referenzszenario (von 4,2 Mio. m³ in 2012 auf 12,8 Mio. m³) und Förderungsszenario (auf 12,2 Mio. m³). Im Restriktionsszenario sinkt die Laubholznutzung zunächst bis auf 0, um sich dann bis 2050 wieder leicht zu erholen (auf 1,3 Mio. m³). Vor allem im Restriktionsszenario wird deutlich, dass durch die vorgegebene Nutzung von Laubholz als Brennholz nur sehr geringe Mengen für die stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen.

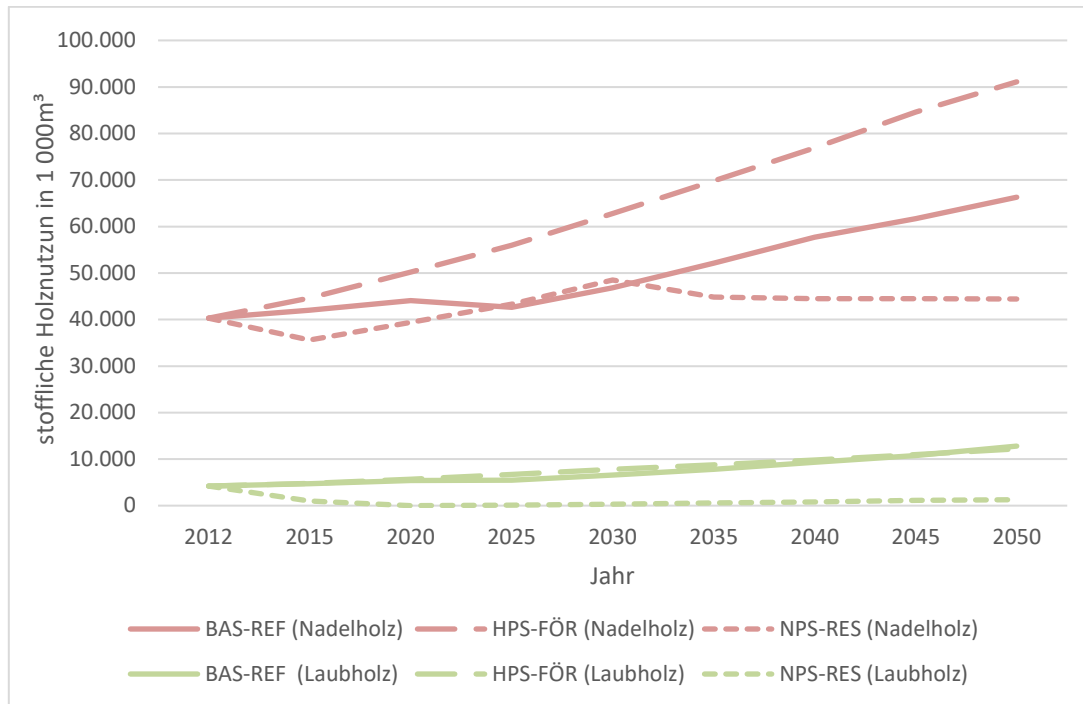


Abbildung 45: Stoffliche Rohholznutzung nach Nadel- und Laubholz in Deutschland von 2012 bis 2050.
Quelle: eigene Darstellung nach Schier und Weimar, 2018.

Schier et al. (2022) untersuchen in einer Studie mögliche Auswirkungen zweier Umsetzungsszenarien der EU-Biodiversitätsstrategie (EUBDS) auf die Rohholzproduktion, den Rohholzhandel und Herstellung und Konsum von Holzprodukten. Es wurden drei Szenarien mit dem GFPM berechnet. Das Referenzszenario basiert auf allgemeinen sozioökonomischen Parametern, in zwei EUBDS-Szenarien (A und B) wurden Maßnahmen und Vorgaben zu möglichen Flächenstilllegungen oder Einschränkungen der Rohholzproduktion in Deutschland und in der EU berücksichtigt. Die Rohholzproduktion beträgt im Referenzszenario im Jahr 2017 64,5 Mio. m³, steigt bis zum Jahr 2030 auf 68,6 Mio. m³ und verringert sich bis zum Jahr 2050 auf 66,6 Mio. m³. Im intensiven EUBDS-Szenario B reduziert sich die Rohholzproduktion im Jahr 2030 um rund 48 % und beträgt 35,8 Mio. m³. Bis zum Jahr 2050 sinkt die Rohholzproduktion auf 28,9 Mio. m³ und ist damit 56 % geringer als die Rohholzproduktion im Referenzszenario. Die Umsetzung des moderateren EUBDS-Szenarios A führt zu einer Verringerung der deutschen Rohholzproduktion von rund 9 % auf 62,2 Mio. m³ im Jahr 2030, während die Produktion im Jahr 2050 mit 59,3 Mio. m³ um rund 10 % geringer als im Referenzszenario ist. Abbildung 46 zeigt die Ergebnisse für die Jahre 2030 und 2050 differenziert nach Laubholz, Nadelholz und Energieholz (Schier et al. 2022).

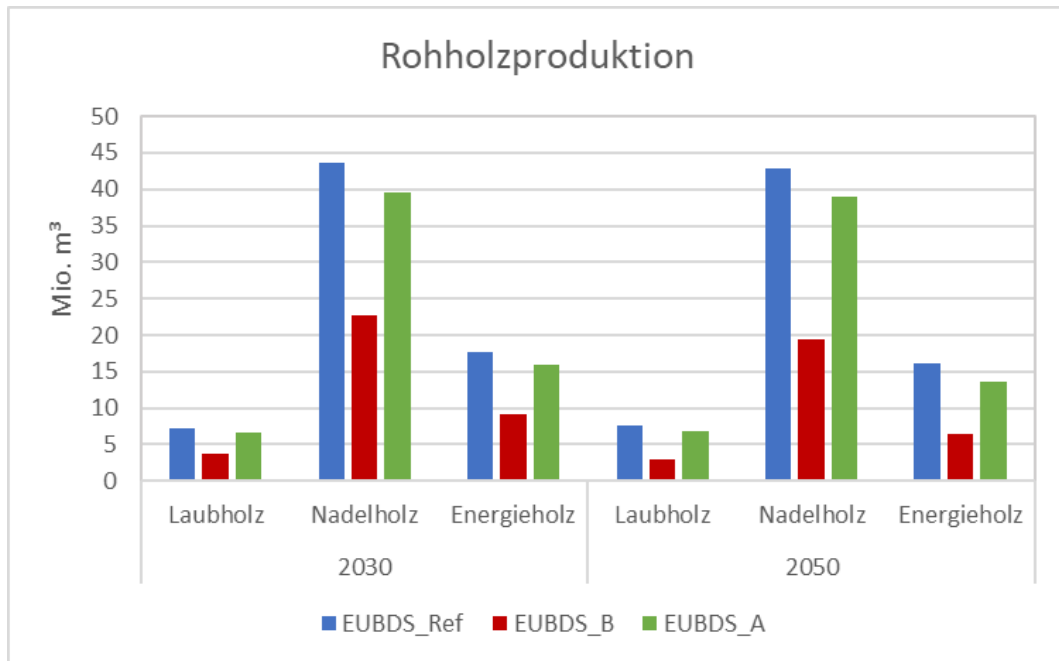


Abbildung 46: Rohholzproduktion im Referenzszenario sowie im EUBDS-Szenario A und im EUBDS-Szenario B in den Jahren 2030 und 2050.

Quelle: Schier et al. (2022).

Der Außenhandel von Rohholz zeigt in den EUBDS-Szenarien deutliche Veränderungen, die Importe liegen jeweils über dem Referenzszenario. Im Jahr 2030 liegt sowohl im EUBDS-Szenario A als auch im EUBDS-Szenario B der Import von Nadelrohholz für die stoffliche Nutzung bei 3,2 Mio. m³, und somit 15 % über jenem des Referenzszenarios. Während der Import im EUBDS-Szenario B im Jahr 2050 nur noch 1,0 Mio. m³ über dem des Referenzszenarios liegt, übersteigen die Importe von Nadelrohholz für die stoffliche Nutzung im EUBDS-Szenario A die Importe des Referenzszenarios um 7,0 Mio. m³. Das bedeutet, dass ein Großteil der Differenz in der Nadelrohholzproduktion für die stoffliche Nutzung zwischen dem Referenzszenario und dem EUBDS-Szenario B nicht durch Rohholzimporte, sondern durch eine Reduktion der Holznutzung ausgeglichen wird. Im EUBDS-Szenario A wird im Jahr 2030 die Differenz in der Nadelrundholzproduktion zum Referenzszenario weitestgehend durch Importe gedeckt und im Jahr 2050 sogar überkompensiert, so dass im EUBDS-Szenario A am Ende des Simulationszeitraums im Jahr 2050 mehr Nadelrohholz für die stoffliche Nutzung zur Verfügung steht als im Referenzszenario. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass unter der moderaten Reduktion des Rohholzangebots im EUBDS-Szenario A die Holzverarbeitende Industrie aufgrund lediglich geringer Preissteigerungen ihre Produktion und Absatz aufrechterhalten kann und fehlende Rohstoffe aus dem Ausland einführt (Schier et al. 2022).

Die Importe von Laubrohholz für die stoffliche Produktion entwickeln sich auch im EUBDS-Szenario B und im EUBDS-Szenario A rückläufig. Im EUBDS-Szenario B ist diese Entwicklung identisch zu jener des Referenzszenarios. Im EUBDS-Szenario A liegen die Importe von Laubrohholz für die stoffliche Nutzung im Jahr 2030 und 2050 jeweils 0,2 Mio. m³ und 0,1 Mio. m³ über jenen des Referenzszenarios. Damit werden weder im EUBDS-Szenario B noch im EUBDS-Szenario A die durch die inländische Reduktion der Laubrohholzverfügbarkeit entstehende Differenz zum Referenzszenario mittels Importen kompensiert. Die Importe von Energieholz entwickeln sich im EUBDS-Szenario B und im EUBDS-Szenario A trotz deutlich stärkerer inländischer Reduktion des verfügbaren Energieholzes im EUBDS-Szenario B gleich. Im Jahr 2030 sind sie identisch mit der Importmenge im Referenzszenario und übersteigen im Jahr 2050 jene des Referenzszenarios um 0,9 Mio. m³ (Schier et al. 2022).

Buongiorno et al. (2012) haben in ihrer Studie das Ziel, Konsequenzen der IPCC-Projektionen auf die globalen Holzmärkte zu untersuchen. Hierzu wurden drei Szenarien auf Grundlage der IPCC-Storylines über die Ausrichtung globaler sozialer, ökonomischer, technischer und politischer Entwicklungen zusammen mit stark zunehmender Produktion von Brennholz entworfen. Diese Szenarien wurden dann mithilfe des GFPM als partielles ökonomisches Gleichgewichtsmodell bis zum Jahr 2060 für die globale Waldfläche, Bestockung, Preise, Konsum, Produktion und Handel von Holz und Holzprodukten simuliert. In einem vierten Szenario wurde eine endogene (modellinterne) Entwicklung der Brennholzproduktion angenommen.

Im Szenario A1B wurden stark zunehmende Einkommensentwicklungen bei gleichzeitig geringer Bevölkerungsentwicklung angenommen. Die globale Nachfrage nach Brennholz für die Periode von 2006 bis 2060 soll in diesem Szenario um das 5,5-fache steigen. Das Szenario A2 geht von einer Abkühlung der Globalisierung aus. Hier steigt das Einkommen global in geringeren Raten als in A1B bei gleichzeitig höheren Bevölkerungsentwicklungen. Die Nachfrage von Brennholz steigt um das 2,7-fache zwischen 2006 und 2060. Das Szenario B2 liegt bei den ökonomischen und demographischen Entwicklungen zwischen A1B und A2 mit einer wachsenden Nachfrage von Brennholz um 290 %. Im Szenario A1B-Low-Fuelwood wurden ökonomische und demographische Entwicklungen aus A1B verwendet mit einer modellinternen, also endogenen, Entwicklung der Brennholzproduktion.

Die Ergebnisse für die stoffliche Holznutzung in Deutschland von 2006 bis 2060 sind in Abbildung 47 dargestellt. Insgesamt verringert sich diese in allen Szenarien außer im „A1B-Low-Fuelwood“ (A1BLF). Hier steigt der Konsum von 51,9 Mio. m³ in 2006 auf 60,7 Mio. m³ in 2060. Im Szenario A1B steigt der Konsum zunächst bis 2030 auf 52,6 Mio. m³ und sinkt dann bis 2060 auf 48,5 Mio. m³. Die stoffliche Nutzung in den Szenarien A2 und B2 entwickelt sich bis 2060 ähnlich, auf 47,5 Mio. m³ im Ersteren und 49,3 Mio. m³ im Letzteren.

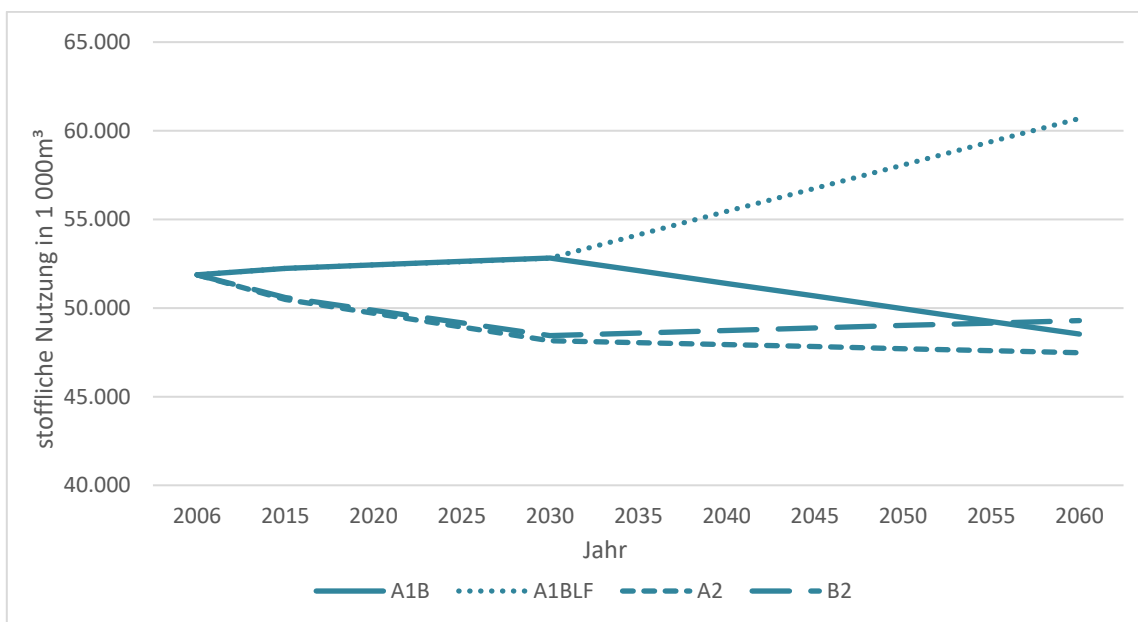


Abbildung 47: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2006 bis 2060.
Quelle: eigene Darstellung nach Buongiorno et al. 2012.

Abbildung 48 zeigt die Ergebnisse für die energetische Rohholznutzung in Deutschland bis 2060. Nur im Szenario A1BLF sinkt der Brennholzkonsum bis 2060 von 8,8 Mio. m³ in 2006 auf 8,1 Mio. m³ in 2060. In allen anderen Szenarien steigt die energetische Holznutzung in Deutschland bis 2060 drastisch (auf 224,4 Mio. m³ in A1B; auf 171,6 Mio. m³ in A2; auf 125 Mio. m³ in B2). Der Zuwachs bis 2060 ist damit

zu begründen, dass für diese Szenarien Annahmen über zukünftige globale Nachfrage für die energetische Nutzung von Holz mithilfe der erwarteten Entwicklung der IPCC für Biokraftstoffe getroffen wurden. Für die hier beschriebenen Szenarien wurde dementsprechend angenommen, dass die energetische Holznutzung global um ca. 550 % in A1B, ca. 270 % in A2 und ca. 290 % in B2 steigt. Dazu kommt, dass angenommen wurde, dass in diesen Szenarien ein Großteil der erhöhten Nachfrage nach Biokraftstoffen aus den Industrieländern kommt. Gleichwohl ist eine solche Entwicklung als wenig realistisch einzuschätzen, da diese Ergebnisse nur durch Erlauben eines massiven Vorratsabbaus im Wald bei der Modellierung erzielt werden können.

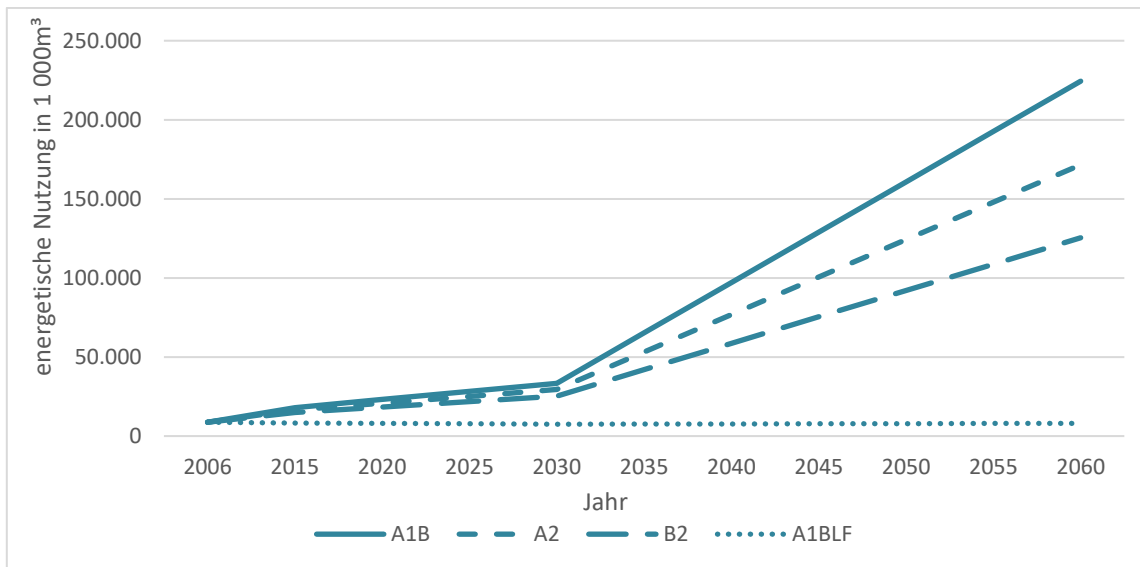


Abbildung 48: Energetische Rohholznutzung in Deutschland von 2006 bis 2060.

Quelle: eigene Darstellung nach Buongiorno et al. 2012.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Vergleich zwischen verschiedenen Studien grundsätzlich schwierig ist. Das trifft auch auf Vergleiche zwischen den oben beschriebenen Studien von Schier und Weimar (2018), Buongiorno et al. (2012) und dem BEPASO-Projekt zu, welche zwar die gleiche Methodik (das Marktmodell) nutzen, sich aber hinsichtlich der Startpunkte, der gewählten Zeithorizonte und der Holzsortimente unterscheiden. Zudem hat die Szenariengestaltung großen Einfluss auf die Resultate. Dementsprechend groß ist der Bereich der potenziellen stofflichen Rohholznutzung, der durch die Szenarien abgedeckt wird (Abbildung 49).

Bis 2050 liegt der Bereich zwischen 42,0 Mio. m³ (Tropf-Szenario; BEPASO) und 103,3 Mio. m³ (HPS-FÖR; Schier und Weimar 2018) mit einem durchschnittlichen Wert von 58,7 Mio. m³. Das intensive EUBDS-Szenario B von Schier et al. (2022) zeigt mit 28,9 Mio. m³ einen noch geringeren Wert, ist hier jedoch nicht aufgeführt, da die Daten nicht differenziert nach Nadel- und Laubholz vorliegen.

Der Wertebereich für die stoffliche Nadelrohholznutzung liegt bis 2050 bei 38,3 Mio. m³ (Tropf-Szenario; BEPASO) und 91,1 Mio. m³ (HPS-FÖR; Schier und Weimar 2018) mit einer durchschnittlichen Nutzung von 56,3 Mio. m³ (Abbildung 50). Beim Laubholz (Abbildung 51) liegt der Wertebereich zwischen 1,3 Mio. m³ (NPS-RES; Schier und Weimar 2018) und 12,8 Mio. m³ (BAS-REF; Schier und Weimar 2018).

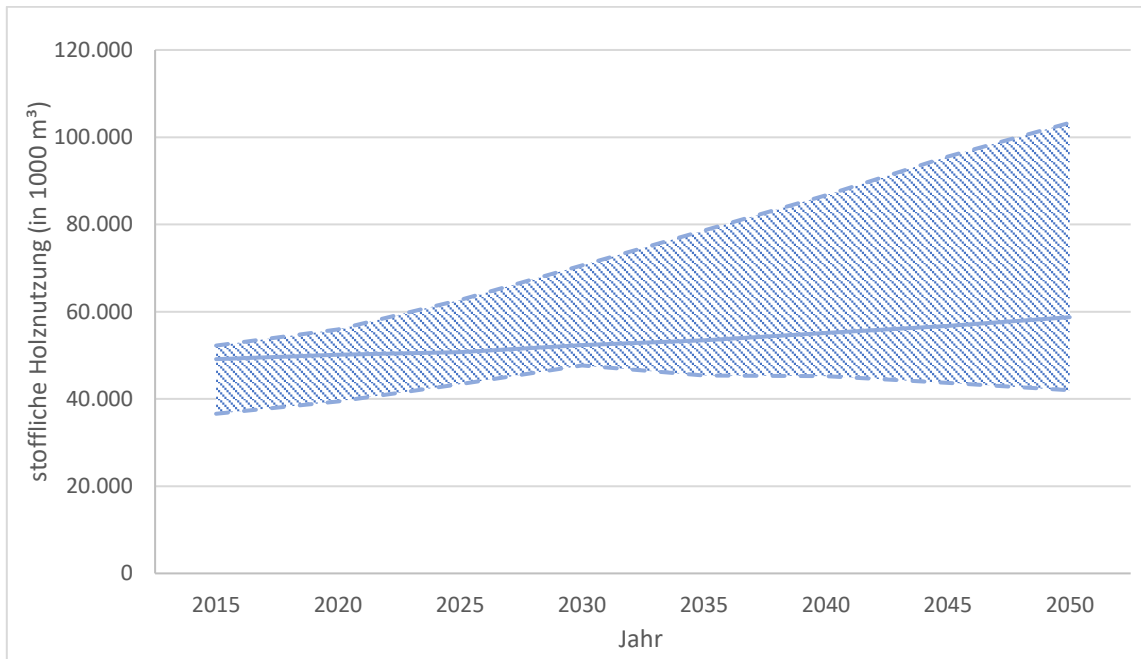


Abbildung 49: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Rohholznutzung.
 Quelle: Schier und Weimar (2018), Buongiorno et al. (2012) und eigene Berechnungen (BEPASO) von 2015 bis 2050.

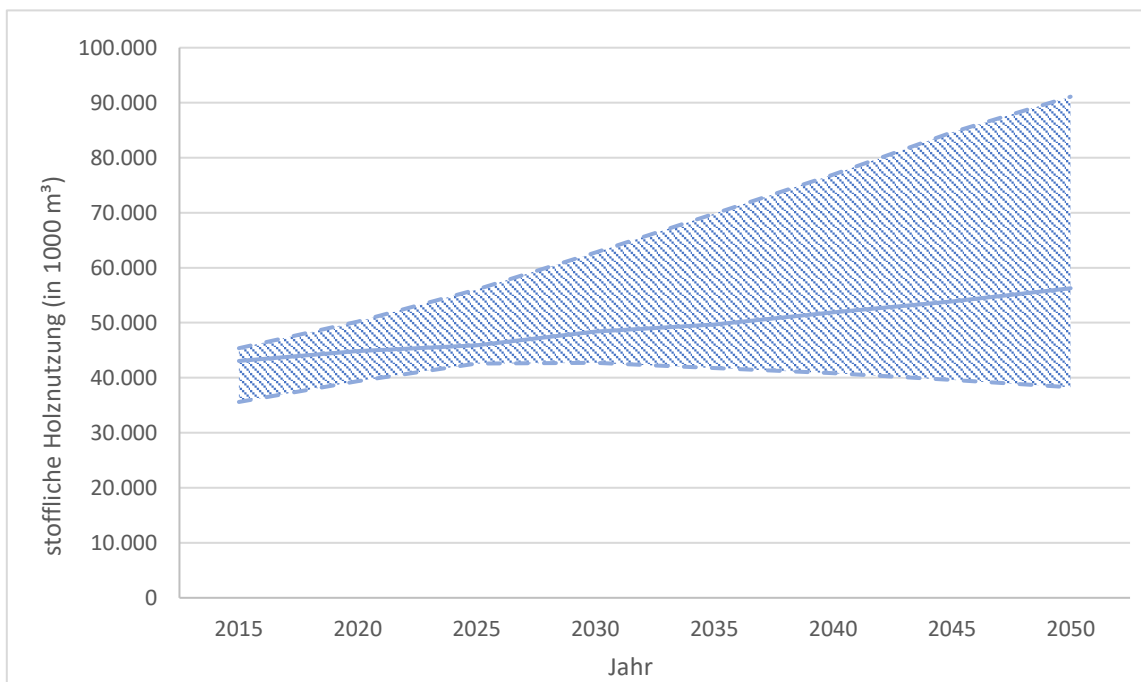


Abbildung 50: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Nadelrohholznutzung.
 Quelle: Schier und Weimar 2018 und eigene Berechnungen (BEPASO) von 2015 bis 2050.

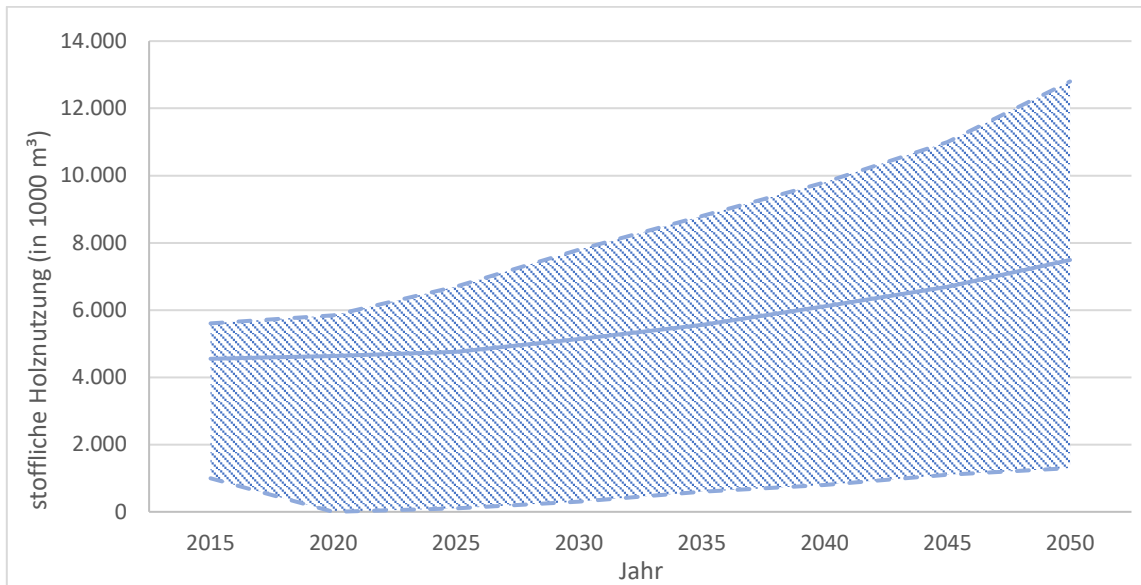


Abbildung 51: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Laubrohholznutzung.
Quelle: Schier und Weimar 2018 und eigene Berechnungen (BEPASO) von 2015 bis 2050.

Informationen zur Entwicklung der Nutzung der Biomassen Sägenebenprodukte, sonstiges Industrierestholz, Rinde, Altholz, Ablauge, Landschaftspflegeholz und Holz von Kurzumtriebsplantagen sind in der verfügbaren Literatur nicht dokumentiert. Das Aufkommenspotenzial von Altpapier, das in etwa der Nutzung entspricht, wurde bereits in Abschnitt 2.3.2 dargestellt.

3.2.2 Landwirtschaftliche Biomasse

Autoren: Martin Banse, David Kilian | Thünen-Institut für Marktanalyse

Für Biomasse landwirtschaftlichen Ursprungs werden in diesem Bericht nur die BEPASO-Szenarien „Bioökonomie am Tropf“ und „Bioökonomie-Wende“ verwendet.

Im BAU-Szenario „Bioökonomie am Tropf“ der BEPASO-Projektionen wird von einem Rückgang der energetischen Nutzung der Biomasse ausgegangen, sodass bezogen auf die inländisch erzeugte landwirtschaftliche Biomasse im Jahr 2030 noch rund 11 Mio. t_{TM} energetisch genutzt werden. Dies entspricht einem Energiepotenzial von ca. 124 PJ bezogen auf den Heizwert der Sekundärenergieträger. Dieser Wert bleibt bis 2050 konstant, was auf die im Szenario getroffenen Annahmen zu den Biokraftstoffquoten zurückzuführen ist. Die stoffliche Nutzung von Biomasse geht im BAU-Szenario „Bioökonomie am Tropf“ ebenfalls zurück und beträgt im Jahr nur rund 1 Mio. t_{TM} (Abbildung 52).

Das BEPASO-Szenario „Bioökonomie-Wende“ geht von einer verstärkten stofflichen Nutzung von Biomasse in der Industrie aus. Im Jahr 2030 ist in diesem Szenario damit zu rechnen, dass von der inländisch erzeugten Biomasse 6,6 Mio. t Trockenmasse stofflich genutzt werden. Bis zum Jahr 2050 steigt die Menge der stofflich genutzten Biomasse noch weiter, sodass im Jahr 2050 rund 16,2 Mio. t_{TM} der inländischen Produktion stofflich verwendet werden. Die energetische Nutzung der Biomasse geht im Gegenzug stark zurück, sodass bereits im Jahr 2030 nur noch rund 3,0 Mio. t Trockenmasse energetisch genutzt werden, was lediglich für Sekundärenergieträger mit einem Heizwert von etwa 33 PJ reicht. Bis zum Jahr 2050 schrumpft die energetisch genutzte Biomasse auf 0,3 Mio. t Trockenmasse (ca. 3 PJ) (Abbildung 52).

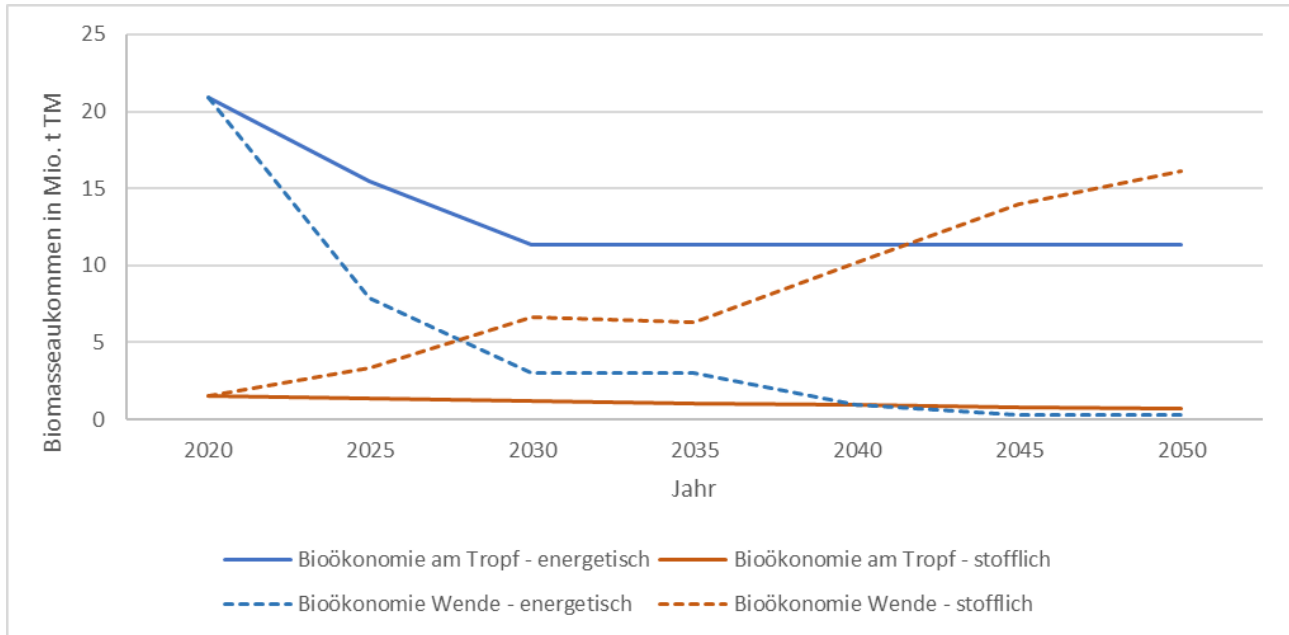


Abbildung 52: Energetische und stoffliche Nutzung der in Deutschland erzeugten landwirtschaftlichen Biomasse bis 2050.
Quelle: eigene Darstellung nach eigenen Berechnungen (BEPASO).

3.2.3 Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der stofflichen Biomassenachfrage (Öko-Institut, ifeu-Institut)

Autor: (Text) Sören Richter | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

(Quantitative Annahmen) Öko-Institut & ifeu-Institut

Innerhalb der Biomassenachfrageseite im stofflichen Bereich sind in aktuellen Studien, Politikpapieren, Roadmaps, Szenarien, Forschungsprojekten und Strategiepapieren, Zielerklärungen sowie Bedarfsprognosen große Bandbreiten zu erkennen. Diese beinhalten somit einen hohen Unsicherheitsfaktor auf Grund verschiedener nicht einbezogener Rahmenbedingungen und intersektoraler Verknüpfungen, wie z. B. konkurrierender Nutzungsansprüche (z. B. (Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2023), Änderungen der Wirtschaftsweisen auf Grund einer erhöhten Biomassenachfrage (z. B. (Borgnäs et al. 2021) oder Verfügbarkeiten und Qualitäten von biogenen (Sekundär-)Rohstoffen (z. B. (Hafner et al. 2017) sowie die Auswirkungen zukünftiger Kreislauf- und Kaskadennutzungen.

Die individuellen Sektorenbetrachtungen führen dazu, dass eine wissenschaftlich fundierte Herleitung präziser Abzugswerte für die stoffliche Bioökonomie aktuell kaum möglich ist. Um dennoch mögliche Effekte der erhöhten stofflichen Nutzung einzubeziehen, wurden Annahmen getroffen, welche sich vor allem auf identifizierte wichtige politische Regularien (RED III), Annahmen zur Erhöhung einer Kaskadennutzung sowie die Substitution von Torf beziehen. Diese Vorschläge sind theoretische Größen, um plausible Gesamteffekte der zukünftigen stofflichen Bioökonomie auf die energetische Nutzung abzubilden.

Die gewählten prozentualen Abzüge wurden aus der Multiplikation von Annahmen für die Faktoren stofflicher Nutzungsanspruch (wie stark nimmt dieser zu) und Mobilisierungsrate (wie viele Biomasse mengen können mobilisiert und mit verfügbaren Technologien verarbeitet werden, um die steigende Nachfrage zu bedienen) entwickelt. Hierbei wurde in die beiden Biomasse-Hauptkategorien

differenziert, in welchen die Auswirkungen am größten sind. Diese stofflichen Nutzungsansprüche werden vom Biomassepotenzial der energetischen Nutzung abgezogen. In der folgenden Tabelle sind die getroffenen Annahmen für die jeweilige Zieljahre 2030 und 2045 dargestellt.

Tabelle 17: Annahmen zur Erhöhung der stofflichen Nutzung in allen Sektoren.

Basierend auf Annahmen zum zukünftigen Einfluss der RED III, stofflicher Nutzungsanspruch und technische Umsetzbarkeit sowie stoffliche Nutzung von Torfersatzstoffen erarbeitet von Öko-Institut und ifeu-Institut.

| Biomasse | Jahr 2030 | Jahr 2045 |
|--|---|---|
| Waldholz | 30 % steigende stoffliche Marktnachfrage nach Holz, die zu 90 % technisch umsetzbar ist + Torfersatzstoffe → 25 % des Waldholzes werden stofflich statt energetisch genutzt | 90 % steigende stoffliche Marktnachfrage nach Holz, die zu 90 % technisch umsetzbar ist + Torfersatzstoffe → 80 % des Waldholzes werden stofflich statt energetisch genutzt |
| Rest- und Abfallstoffe (holzig, ohne Waldrestholz) | 15 % steigende stoffliche Marktnachfrage nach Holz, die zu 75 % technisch umsetzbar ist + Torfersatzstoffe → 10 % der Rest- und Abfallstoffe werden stofflich statt energetisch genutzt | 75 % steigende stoffliche Marktnachfrage nach Holz, die zu 75 % technisch umsetzbar ist + Torfersatzstoffe → 55 % der Rest- und Abfallstoffe werden stofflich statt energetisch genutzt |

Basierend auf den Annahmen konnten Mengen in t_{TM} unter Berücksichtigung entsprechender Umrechnungsfaktoren identifiziert werden, welche sich ebenfalls in Bandbreiten darstellen.

Tabelle 18: Annahmen zu einbezogenen Mengen durch die Erhöhung der stofflichen Nutzung in allen Sektoren.

Basierend auf Annahmen zum zukünftigen Einfluss der RED III, stofflicher Nutzungsanspruch und technische Umsetzbarkeit sowie stoffliche Nutzung von Torfersatzstoffen erarbeitet von Öko-Institut und ifeu-Institut (* Umrechnungsfaktor $1 \text{ m}^3 = 0,55$ in t_{atro} ; $1 \text{ t}_{utro} = 0,8$ in t_{atro}).

| Biomasse | Jahr 2030 (in t_{TM}) | Jahr 2045 (in t_{TM}) |
|--|--|---|
| Waldholz | Anstieg um: 3,36 Mio. t_{TM} - 4,84 Mio. t_{TM} * | Anstieg um: 5,3 Mio. t_{TM} - 6,69 Mio. t_{TM} * |
| Rest- und Abfallstoffe (holzig, ohne Waldrestholz) | Anstieg um: 2,5 Mio. t_{TM} (RED III) 2,6 Mio. t_{TM} (Torfersatz) | Anstieg um: 9,3 Mio. t_{TM} (RED III) |
| Summe | Anstieg um: 8,46 Mio. t_{TM} - 9,94 Mio. t_{TM} | Anstieg um: 14,6 Mio. t_{TM} - 15,99 Mio. t_{TM} |

3.2.4 Weitere Literatur zu Trends eines zukünftigen stofflichen Biomassebedarfs

Autor:innen: Sören Richter, Nora Szarka | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH

Im Folgenden wurden weitere Trends des stofflichen Biomassebedarfs aus aktuellen Studien, Politikpapieren, Roadmaps, Szenarien, Forschungsprojekten und Strategiepapieren, Zielerklärungen und Bedarfsprognosen analysiert. Diese stellen vor allem Nutzungsansprüche einzelner Verbände und industrieller Sektoren dar, in denen konkurrierende Ansprüche anderer Sektoren wenig oder nicht berücksichtigt werden. Der Fokus bei dieser Recherche lag vor allem auf ausgewählten Sektoren, welche einen hohen zukünftigen Biomassebedarf erwarten lassen und innerhalb des Klimaschutzgesetzes als

Hauptsektoren für eine Reduktion von Treibhausgasen identifiziert worden sind. Unter diesen Rahmenbedingungen fasst das Kapitel potenzielle zukünftige stoffliche Biomassebedarfe einzelner Sektoren zusammen und erstellt Bandbreiten dieser. Der Fokus lag dabei auf dem Bau-, Chemie-, Papier- und Torfsektor.

Die ausgewerteten Studien zeigen, dass die Sektoren Bau und Chemie die größten Steigerungen an Biomassebedarfen beschreiben, während der Papiersektor gleichbleibende oder leicht reduzierte Bedarfe erwarten lässt. Bedarfe für Torfersatzstoffe lassen eine starke Erhöhung bis 2030 erwarten und danach werden durch alternative Rohstoffe (z. B. Torfmoose) Ersatzstoffe produziert. Folgende Beschreibung der Bandbreiten für die einzelnen Sektoren kann genutzt werden, um die Abzugswerte für stoffliche Bedarfe (3.2.3) in den Kontext der Nutzungsansprüche der individuellen Sektoren zu setzen.

Folgende Grafik stellt die Ergebnisse der Zusammenführung der Sektor-Betrachtung nach zusätzlichem Biomassebedarf aufsummiert per Sektor dar, mit dem Minimum und Maximum der Annahmen für Bau- und Chemiesektor basierend auf mittleren recherchierten und errechneten Werten.

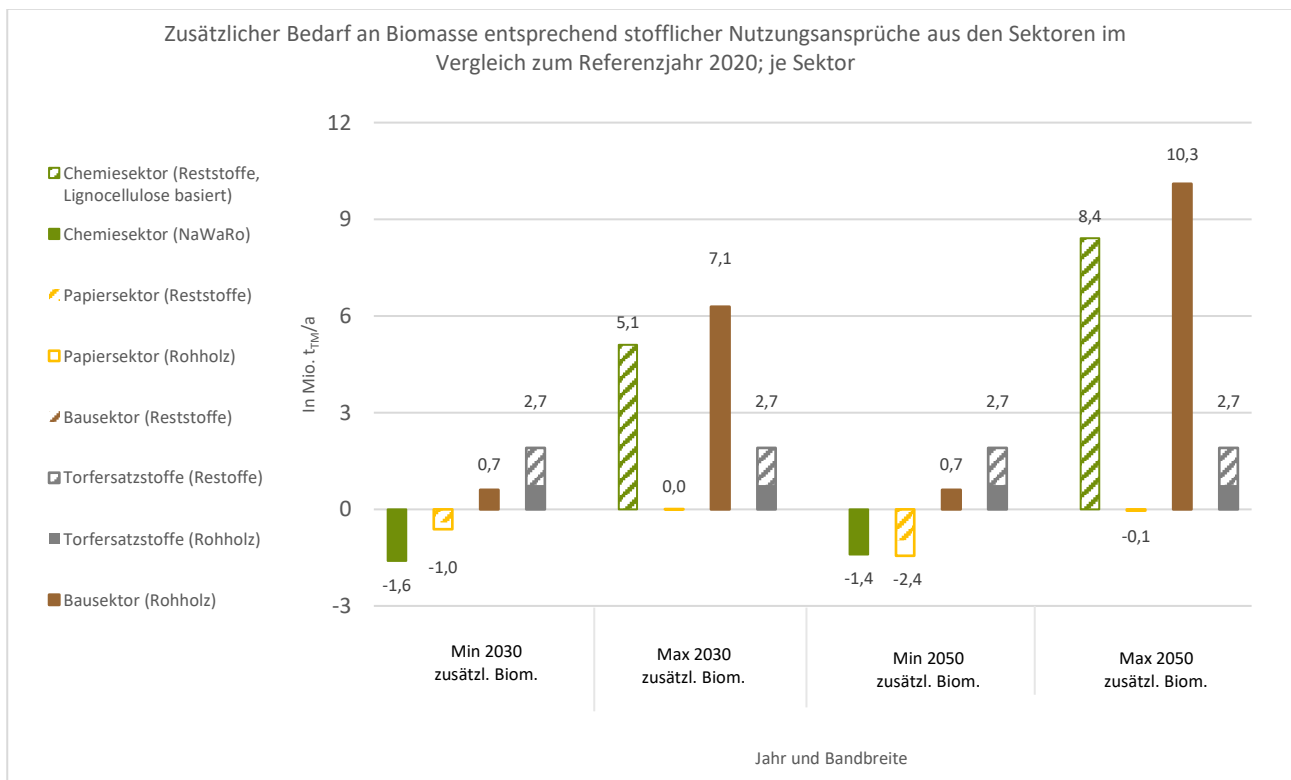


Abbildung 53: Minimum- und Maximum-Werte für die recherchierten zusätzlichen Biomassebedarfe, nach Sektoren im Vergleich zum Referenzjahr 2020 für die betrachtenden Jahre 2030 und 2050.

Gesamt **2020**: 20 Mio. t_{TM}; nach Sektoren: Chemie: 2,4 Mio. t_{TM}; Papier: 5,7 Mio. t_{TM}; Bau 10,2 Mio. t_{TM}; Torf: 1,7 Mio. t_{TM});

2030: Chemie: -1,6 – 5,1 Mio. t_{TM}, Papier: -1,0 – 0 Mio. t_{TM}, Torf: 2,7 Mio. t_{TM}, Bau: 0,7 – 7,1 Mio. t_{TM};

2050: Chemie: -1,4 – 8,4 Mio. t_{TM}, Papier: -2,4 – -0,1 Mio. t_{TM}, Torf: 2,7 Mio. t_{TM}, Bau: 0,7 – 10,3 Mio. t_{TM}.

Quelle: eigene Darstellung DBFZ 2023.

3.2.4.2 Biomasseinsatz im Bausektor

Die betrachteten Studien beziehen sich auf stark unterschiedliche Analyseebenen (Holzeinsatz im gesamten Baugewerbe (Glaser et al. 2017b), Holzeinsatz nur für Ein-,Zwei-, u. Mehrfamilienhäuser

(Hafner et al. 2017), Holzeinsatz für genehmigte Wohnungsgebäude und Nichtwohnungsgebäude (Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. 2021)), weshalb Bandbreiten nur für einzelne Studien und nicht konsolidiert vergleichbar dargestellt werden können. Ein gesamter Vergleich und Abschätzung erscheint als nicht zielführend und wäre von hoher Datenungenauigkeit geprägt (Wolf et al. 2020). Weiterhin ist zu beachten, dass im überwiegenden Teil der Studien der Fokus allein auf dem Neubau von Gebäuden liegt, während Modernisierung und Sanierung nicht oder kaum betrachtet werden. Dieser Aspekt erhöht die Datenunsicherheit über zukünftige Biomassebedarfe im Sektor, da laut (Mantau et al. 2013) im Neubau 36 % und bei Modernisierung 64 % sowie nach (Heinze GmbH 2018) im Neubau 31 % und bei der Modernisierung 69 % der genutzten Holzmenge im Bausektor verwendet werden. Dies führt auch zur Aussage, dass sich grundsätzlich eine erhöhte Holzbauquote durch nationale Ressourcen erschließen lässt (Purkus et al. 2020; Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik WBW 2021), wobei Modernisierung und Sanierungsarbeiten und intersektorale Nutzungskonkurrenzen explizit in den Betrachtungen nicht genannt werden. Unter Einbezug dieser Aspekte und Unsicherheiten wurden für die Zieljahre 2030 und 2050 Bandbreiten möglicher zusätzlicher Biomassebedarfe erstellt. Die Bandbreite erstreckt sich hierbei für das Jahr 2030 von 0,7 bis 7,1 Mio. t_{TM} (Max. = 30 % Holzbauquote basierend auf eigener Berechnung folgend (Glasenapp et al. 2017a)) und für das Jahr 2050 von 0,7 bis 10,3 Mio. t_{TM} zusätzlicher benötigter Biomasse (Max. = 50 % Holzbauquote + erhöhter Sanierungsrate 2,5 % basierend auf eigener Berechnung folgend (Glasenapp et al. 2017a)) im Vergleich zum Referenzjahr 2020 mit einem Biomassebedarf von 10,2 Mio. t_{TM}. Die angenommenen Bedarfe beziehen sich in dem Fall auf nationale Bedarfe, was Exporte nicht miteinschließt.

3.2.4.3 Biomasseeinsatz im Chemiesektor

Der Chemiesektor zeichnet sich durch seine Produkttiefe sowie Produktpalettenbreite aus. In den einbezogenen Studien ist daher zu beachten, dass sich diese auf unterschiedliche Produkte beziehen und somit die Bandbreitenerstellung beeinflussen. Während der Schwerpunkt der Betrachtung in der Szenariostudie (Geres et al. 2019) auf den Produktionsmengen und Kosten der energie- und ressourcenintensivsten Grundchemikalien (=2/3) und deren derzeitigen Treibhausgasemissionen liegt, bezieht sich (Banse et al. 2020b) stärker auf den gesamten Chemiesektor mit der Perspektive auf einer potenziellen Biomassenutzung innerhalb der Bioökonomie. In der Studie der (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021) wird vor allem Bezug auf Reduktion von Treibhausgasen mit Fokus auf den energetischen Bereich gelegt und der stoffliche Bereich nicht ausreichend beschrieben. Übergreifend kann jedoch gesagt werden, dass die betrachteten Studien (Geres et al. 2019; Banse et al. 2020b; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021; Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) / Federation of German Industries (BDI) 2018; Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021; Behrendt 2018) von einer Erhöhung des Biomasseeinsatzes in diesem Bereich ausgehen, um die Wahrscheinlichkeit der Erreichung der Treibhausgasneutralität des Sektors bis 2050 zu erhöhen. Auch wenn in allen Studien die Biomassenutzung im stofflichen Bereich einbezogen wird, haben Grenzkriterien wie die Ressourcenverfügbarkeit einen hohen Stellenwert (Behrendt 2018; Geres et al. 2019; Material Economics 2021), weswegen die Biomassenutzung im chemischen Sektor vor allem aus Rest- und Nebenproduktströmen stattfinden soll (Geres et al. 2019; European Chemical Industry Council 2021). Biomasse soll für die Defossilisierung des chemischen Sektors genutzt werden, wobei aber der größte Anteil der Rohstoffe für eine zukünftige chemische Produktion aus alternativen Kohlenstoffquellen stammt, wie z. B. chemischem Recycling, CO₂ Abtrennung, Nutzung von Wasserstoff und strombasierten Anwendungen (Agora Energiewende und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

2019; Geres et al. 2019; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021). Die Einschränkung der Ressourcenverfügbarkeit von Biomasse entspricht auch dem Trend, diese stärker in Bereichen mit hoher Wertschöpfung, wie z. B. Spezialchemie, zu verwenden, da die Mengenströme in der Basischemie die Grenzen des verfügbaren Potenzials deutlich übersteigen würden (Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) und Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) 2023). Aufgrund der internationalen Rolle des Chemiesektors in Deutschland beziehen sich die Studien hierbei auf alle produzierten Produkte und unterscheiden nicht in Produkte für nationale und internationale Verwendung. Basierend auf diesen Trends ergeben sich für die Zieljahre sehr große Bandbreiten. Die Bandbreiten beschreiben hierbei auch ein negatives Potenzial, was mit der Abwanderung oder Reduktion der Produktion der Chemieindustrie verbunden wird, welches sich auf der Grundlage von steigenden Kosten für fossile Rohstoffe und somit größeren Herausforderungen für die Geschäftsmodelle ergibt. Das Maximum der Bandbreite ergibt sich aus der Roadmap Chemie von 2050 (Geres et al. 2019), welche wie oben beschrieben nicht die gesamte Produktpalette einbezieht. Entsprechend diesen Trends und den einbezogenen Studien ergeben sich für die betrachteten Zieljahre folgende Bandbreiten, die mit einer hohen Unsicherheit verbunden sind. Für das Jahr 2030 erstreckt sich die Bandbreite von -1,6 bis 5,1 Mio. t_{TM} zusätzlicher Biomassebedarfe sowie für das Jahr 2050 von -1,4 bis 8,4 Mio. t_{TM}, im Vergleich zum Referenzjahr 2020 mit einem Biomassebedarf von 2,4 Mio. t_{TM}. Einschränkung für die Trendbetrachtung ist zu sagen, dass die Studien sich sehr stark auf die Nutzung von Rest- und Nebenprodukten fokussieren. Aktuelle Entwicklungen und Umsetzungen von Produktionsanlagen, welche auch Primärbiomasse als Rohstoff verwenden, stehen dieser Aussage entgegen (Biorefinery Leuna | UPM Biochemicals 2023).

3.2.4.4 Biomasseeinsatz im Papiersektor

Die Mehrheit der betrachteten Studien (Borgnäs et al. 2021; Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) 2022; Godin 2020; Umweltbundesamt (UBA) / Federal Environment Agency 2014) geht von einer gleichbleibenden bis geringen Reduktion der Produktionsmengen von Papier aus. Die Branche ist aktuell von Unsicherheiten geprägt, welche mit hohen Energie- und Rohstoffpreisen sowie der Konkurrenz des internationalen Wettbewerbs verbunden sind. Die Unterstützung zur Erreichung der Klimaziele soll vor allem durch die Reduktion der Treibhausgasemissionen in den Prozessen sowie durch die Energiebereitstellung durch Erneuerbare Energien geleistet werden und weniger durch Aspekte der stofflichen Nutzung von Biomasse (Godin 2020; Borgnäs et al. 2021). Auf Grund der bereits hohen Altpapierquote (79 %) (Verband Deutscher Papierfabriken e. V. 2021) im Sektor ist eine Erhöhung der Kaskadennutzung nur noch im geringen Maße realisierbar, da sich im Recyclingvorgang die Fasern verkürzen und somit nur bis einem gewissen Grad recycelt werden können (Godin 2020). Auf Grund der hohen Anteile der Produktionsmengen aus Altpapier sowie des hohen Anteils an importierten Primärfasern (ca. 80 %) werden rund 20 % der Produktionsmengen aus heimischen Holzmassen produziert (Borgnäs et al. 2021). Die Studien beziehen sich hierbei auf die gesamte Prozesskette und somit auch auf Produkte, welche für den Export produziert werden. Die Bandbreite der Reduktion der zusätzlich genutzten Biomasse, im Vergleich zum Referenzjahr 2020 mit einem Biomassebedarf von 5,7 Mio. t_{TM}, erstreckt sich hierbei von ca. 0 Mio. t_{TM} bis -2,4 Mio. t_{TM}. Eine Reduktion von bestimmten Papiersorten (z. B. graphischen Papieren) steht im Zusammenhang mit einer erhöhten Digitalisierung. Folgend den beschriebenen Trends in der Literatur kann von keinem erhöhten oder zusätzlichen stofflichen Biomassebedarf in 2050 ausgegangen werden.

3.2.4.5 Torf

Die Torfindustrie geht im Allgemeinen von einem Erliegen des Torfabbaus bis 2040 aus, da die erteilten Genehmigungen zum Torfabbau auslaufen (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2020). Für Torfersatzstoffe wird von einem Wachstum ausgegangen, da Bestrebungen zur Reduktion von Torf als Kultursubstrat und Bodenverbesserer auf Grundlage des Klimaschutzplanes 2030 u. 2050 getroffen worden sind, die dessen Einsatz verringern bzw. komplett vermeiden. Folgend der Torfminderungsstrategie des BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2022) sollen Torfersatzstoffe bis 2030 aus verfügbaren alternativen Biomassen (z. B. Grünkompost, Holz- und Rindenmulch) bereitgestellt werden. Für diesen Sektor ergibt sich basierend darauf ein zusätzlicher Biomassebedarf, im Vergleich zum Referenzjahr 2020 mit einem Biomassebedarf von 1,7 Mio. t_{TM}, von ca. 2,7 Mio. t_{TM}. Die angenommenen Bedarfe beziehen sich in dem Fall auf nationale Bedarfe, was Exporte nicht miteinschließt. Für die Zieljahre 2030 und 2050 wurde ein gleichbleibender Bedarf angenommen. Übergeordnet ist zu sagen, dass eine schlechte Datenlage für Torfverbrauch, Torfförderung und Torfeinfuhr spezifischere Aussagen zu tatsächlich benötigten Mengen nur schwer zulässt.

3.2.4.6 Zusammenfassung und Fazit

Aus den einbezogenen Studien und Bandbreiten ergibt sich eine maximale Bandbreite von ca. 22,9 Mio. t_{TM} zusätzlicher Biomassebedarfe für stoffliche Nutzungspfade in den betrachteten Sektoren bis zum Jahr 2050 (siehe Abbildung 52 unten). Die Bandbreite ergibt sich aus unterschiedlichen Betrachtungsrahmen und Datengrundlagen in den einzelnen Sektoren sowie der Unsicherheit innerhalb der Sektoren über zukünftige Marktentwicklungen. Weiterhin sind die Bandbreiten beeinflusst durch verschiedene Faktoren wie den Einbezug unterschiedlicher Betrachtungszeiträume innerhalb der Studien (z. B. 2050 und 2045), dem Fokus auf Biomasse insgesamt und somit unspezifisch für jeweilige Biomassearten, den Einbezug der vier betrachteten Sektoren sowie die Verwendung unterschiedlicher Betrachtungsebenen (z. B. Einbezug von Exporten). Die getroffenen Annahmen in 3.2.3 befinden sich für die jeweiligen Zieljahre unterhalb der recherchierten Maximalwerte, was zu der Schlussfolgerung führt, dass die einbezogenen Abzugswerte die Bedarfe nicht überschätzen. Auch hier ist der Unterschied der Betrachtungsebene mit einzubeziehen, da der Fokus bei den Abzugswerten ausschließlich auf holzartigen Biomassearten und Waldholz liegt, in den analysierten Studien aber auch weitere Biomassearten einbezogen werden.

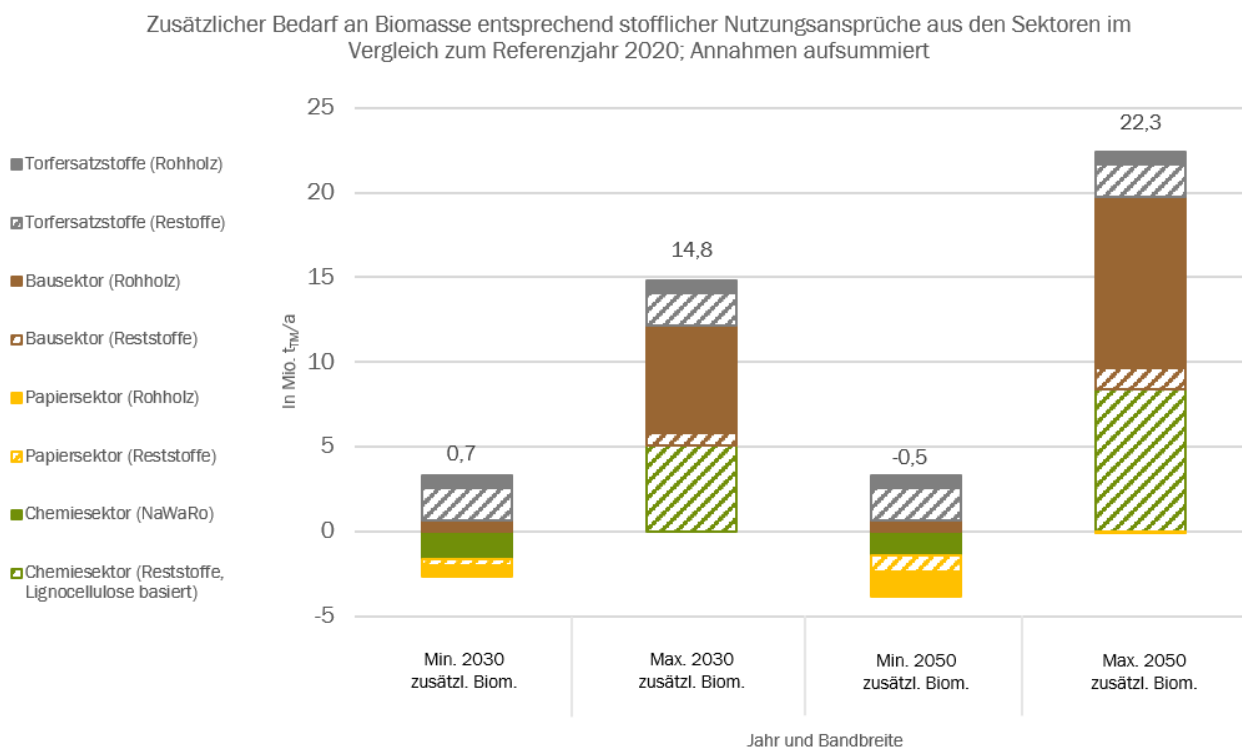


Abbildung 54: Minimum und Maximum Werte für die recherchierten zusätzlichen Biomassebedarfe im Vergleich zum Referenzjahr 2020 für die betrachtenden Jahre 2030 und 2050.

Gesamt **2020**: 20 Mio. t_M ; nach Sektoren: Chemie: 2,4 Mio. t_M ; Papier: 5,7 Mio. t_M ; Bau 10,2 Mio. t_M ; Torf: 1,7 Mio. t_M ;
2030: Min. 0,7 Mio. t_M , Max. 14,9 Mio. t_M ; **2050**: Min. -0,5 Mio. t_M , Max. 22,4 Mio. t_M .

Quelle: eigene Darstellung DBFZ 2023.

Basierend auf der Betrachtung der Literatur über einen möglichen zusätzlichen zukünftigen Biomassebedarf innerhalb der vier betrachteten Sektoren lässt sich feststellen, dass eine fundierte Herleitung präziser Abzugswerte für die stoffliche Bioökonomie aktuell kaum möglich ist. Die vorgeschlagenen Abzugswerte sind somit nicht als wissenschaftliche Prognose zu verstehen. Sie bilden Vorschläge ab, um mögliche plausible Gesamteffekte der zukünftigen stofflichen Nutzung von Biomasse in einer Bioökonomie in Bezug auf die energetische Nutzung zu beschreiben. Die weitere Literatur der Sektorstudien (3.2.4), welche unzureichend den gesamten Markt (z. B. Import und Export), intersektorale Effekte, Markteffekte, Technologien zur stofflichen Biomasseverwertung, Technologien für Biomassesubstitute, Entwicklungen von Preisen, Einkommen etc. abbilden, unterstreicht dennoch die Plausibilität der getroffenen Annahmen, da sie sich innerhalb der betrachteten Sektoren in einem mittleren Bereich der beschriebenen Bandbreite der zukünftigen stofflichen Biomassenachfrage befindet. Gleichfalls zeigen die genannten Einschränkungen in der obigen Zusammenfassung deutlich, dass sich diese nicht in ein stimmiges Gesamtbild der zukünftigen Nachfrage fügen. Somit ist eine Vergleichbarkeit der prozentualen Abzugswerte mit dem sektoralen Bedarf nicht möglich. Weiterhin fehlen z. B. Informationen zu den Auswirkungen der zukünftigen Kreislauf- und Kaskadennutzung auf die Verfügbarkeit und Qualitäten von biogenen (Sekundär-)Rohstoffen. Wichtig ist also: Diese Zahlen erheben keinen Anspruch auf wissenschaftliche Genauigkeit, es geht stattdessen um das Aufzeigen möglicher Effekte von vorgegebenen Änderungen.

3.3 Übersicht zu möglichen Einsatzbereichen von Biomasse im Energiesystem 2030 und 2050

Autor: Matthias Jordan | UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH

Zur Bestimmung der optimalen Nutzung von Biomasse/Bioenergie im Energiesystem bis 2050 wurden aktualisierte Energieszenarien mit dem BenOpt Modell gerechnet. Die Basis der Arbeiten bilden die entwickelten Szenarien und der BenOpt-Modellstand aus dem strategischen DBFZ-/UFZ-internen SoBio-Projekt (Jordan et al. 2023). Tabelle 19: Anteil Bioenergie am EEV in den Sektoren heute (UBA) sowie in 2030 und 2045 (BenOpt Szenarien). Tabelle 19 gibt einen Überblick über die zentralen Ergebnisse.

Tabelle 19: Anteil Bioenergie am EEV in den Sektoren heute (UBA) sowie in 2030 und 2045 (BenOpt Szenarien).
Quelle: Umweltbundesamt 2023.

| | | 2022 | 2030 | | | 2045 | | |
|-----|---------|------|----------|------|----------|----------|-----|----------|
| | | UBA | Bepaso-R | LFS | KIS-2030 | Bepaso-R | LFS | KIS-2030 |
| % | Strom | 9,2 | 6,3 | 8,1 | 9,3 | 4,1 | 5,2 | 6,9 |
| | Wärme | 14,6 | 12,1 | 10,1 | 13,2 | 9,2 | 9,5 | 24,4 |
| | Verkehr | 5,8 | 2,8 | 3 | 2,3 | 4 | 3,8 | 4,4 |
| TWh | Strom | 50 | 36 | 47 | 54 | 25 | 32 | 42 |
| | Wärme | 168 | 126 | 106 | 138 | 75 | 77 | 199 |
| | Verkehr | 34 | 13 | 14 | 11 | 8 | 8 | 9 |

Methode:

BenOpt ist ein klassisches lineares Energiesystemoptimierungsmodell, wie es vielfach auf diesem Forschungsgebiet eingesetzt wird. Optimierungsmodelle geben keine Auskunft darüber, wie sich die Zukunft entwickeln wird, sondern zeigen mögliche optimale Transformationspfade in verschiedenen Szenarien auf. Wirkungszusammenhänge können dabei durch Variation einzelner Parameter zwischen Szenarien besonders gut dargestellt werden. BenOpt fokussiert speziell die optimale zukünftige Nutzung von Biomasse bzw. Bioenergie im Energiesystem und bildet die entsprechenden Rohstoffe und Technologien detailliert ab. Im Vergleich zu früheren BenOpt-Versionen wurde im Projekt SoBio zum ersten Mal das limitierte Biomassepotenzial in Deutschland über alle Energiesektoren (Strom, Wärme, Verkehr) im Wettbewerb mit fossilen und anderen erneuerbaren Optionen optimal allokiert. Das Modell berücksichtigt dabei Rohstoffe, Umwandlungstechnologien, Fahrzeugtypen und detaillierte Nachfragesektoren innerhalb des Wettbewerbs. Die Infrastrukturkosten für Transport-, Strom-, Wärme- oder Wasserstoffnetze werden jedoch nicht berücksichtigt. Ein definiertes Klimaziel, in diesem Fall ein Treibhausgas (THG)-Emissionsbudget, muss als Restriktion erfüllt werden. Der Zeithorizont des BENOPT-Modells beträgt 31 Jahre von 2020 bis 2050, mit einer flexiblen Zeitauflösung (d. h. bis zu einer stündlichen Auflösung im Stromsektor und einer jährlichen Auflösung in den anderen Bereichen).

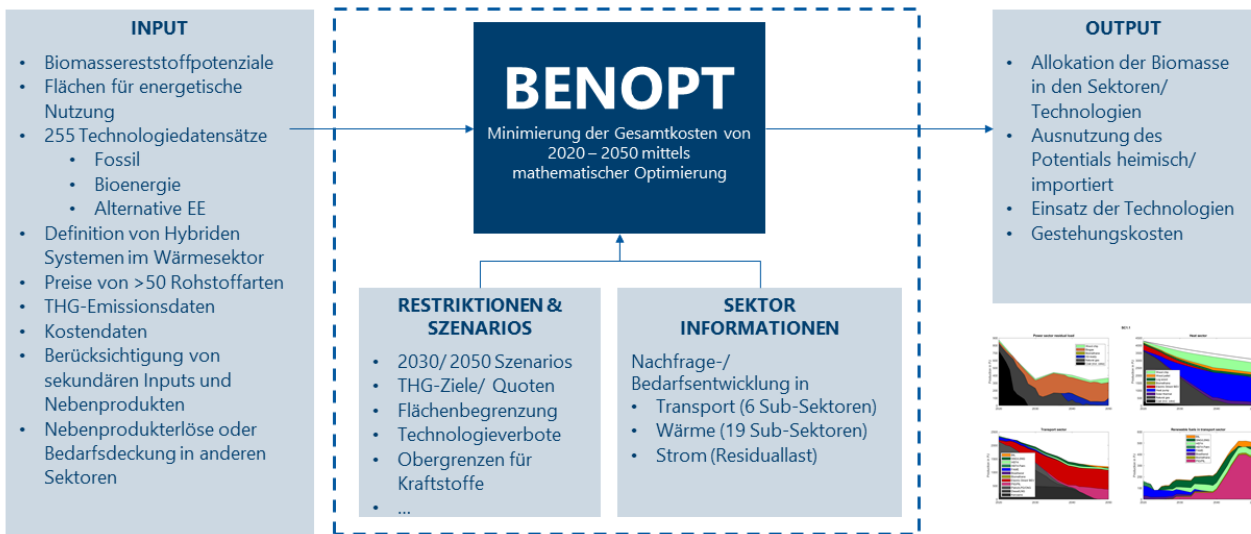


Abbildung 55: Skizzierung der Input-/Output-Daten des BenOpt Modells.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Der Wärmesektor wird in Anlehnung an den allgemeinen Ansatz früherer Analysen in 19 Teilsektoren unterteilt (Jordan et al. 2019; Lenz und Jordan 2019; Jordan et al. 2022). Dabei werden die übergreifenden Sektoren private Haushalte, Gewerbe und Industrie berücksichtigt. Die zukünftige Entwicklung des Wärmebedarfs im Gebäudebereich basiert auf den Ergebnissen des Gebäudebestandsmodells 'B-Star' (Koch et al. 2018), das die zukünftige Sanierung des deutschen Gebäudebestands in jährlicher Auflösung in verschiedenen Szenarien mit einem agentenbasierten Ansatz modelliert. Der Bedarf in den Sektoren kann mit einer Fülle an Technologieoptionen gedeckt werden (fossil, Bioenergie, alternative EE). Neben monovalenten Lösungen stehen auch hybride Konzepte zur Verfügung (z. B. Wärmepumpe+PV+Pelletkessel).

Der Verkehrssektor wird weiter in sechs Teilsektoren unterteilt (Personenstraßenverkehr, Lastverkehr, Schiff inländisch, Schiff ausländisch, Flugverkehr, Schiene). Für jeden Teilsektor werden mögliche Fahrzeugtypen und ihre spezifischen aktuellen und zukünftigen Wirkungsgrade definiert. Für jeden Fahrzeugtyp konkurrieren technisch realisierbare Kraftstoffarten (fossil, direkte Elektrifizierung, biomassebasiert oder PtG/PtL aus erneuerbarem Strom). Der zukünftige Energiebedarf für den innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in jedem Teilsektor, aufgeschlüsselt nach Kalenderjahren (2020 bis 2050), wird auf der Grundlage der UBA Rescue-Studie von Purr et al. 2019 ermittelt. Die kostenoptimale zukünftige Entwicklung von Fahrzeugtypen und Kraftstoffen wird modellendogen bestimmt.

Für den Stromsektor gehen wir davon aus, dass Bioenergie nicht konkurrenzfähig zu Energie aus Wind und PV ist. Der Fokus von BenOpt liegt auf der zukünftigen Rolle von Bioenergie, die im Stromsektor in Konkurrenz zu anderen nicht fluktuierenden Energieressourcen steht, um die zukünftige Residuallast zu decken. Die Residuallast wird basierend auf dem Wind-/PV-Ausbau aus der UBA Rescue-Studie für jedes Jahr im Voraus in stündlicher Auflösung berechnet, wobei Batterie- und Wasserspeicher bereits berücksichtigt werden. Dieses Ergebnis wird im Rahmen der Optimierung als Residuallastbedarf angesetzt, der mit 28 technologischen Optionen erfüllt werden kann (Bioenergie, H2-Ready, fossile Optionen).

Neben einer detaillierten Darstellung von Energieteilsektoren und möglichen (Hybrid-) Biomassetechnologiekonzepten setzt BenOpt zusätzlich auf eine detaillierte Darstellung der Biomassepotenziale und -preise. Da die verfügbaren Daten zu den Potenzialen nicht immer eindeutig den gleichen Biomassepreiskategorien zugeordnet werden können, wurden in BenOpt zwei unterschiedliche Biomassekategorien gebildet: Biomassepotenzialkategorien und Biomassepreiskategorien. Am Beispiel der Biomasse Holz lässt sich dieser Zusammenhang verdeutlichen. Das jährlich verfügbare Potenzial von Waldrestholz ist eine bekannte Größe, aber der Preis hängt von der nachfolgenden Verarbeitungsstufe ab. Hackschnitzel haben einen anderen Preis als Pellets, Briketts oder Stückholz. Für die Nutzung von Anbaubiomasse wird dem Modell nur die verfügbare Fläche für Energiepflanzen übergeben. Es wird daraufhin basierend auf Kosten, Erlösen und Erträgen modellendogen entschieden, welche Energiepflanzen kostenoptimal auf der Fläche angebaut werden. Neben den inländischen Biomassepotenzialen wird auch Importbiomasse berücksichtigt, allerdings nur für den Verkehrssektor. Die Biomasserohstoffe, die Umwandlung in Biokraftstoffe und der Ausbau von Technologien werden im Modell dargestellt. Bei importierter Biomasse wird davon ausgegangen, dass diese Anlagen im Ausland betrieben werden und die fertigen Biokraftstoffe importiert werden.

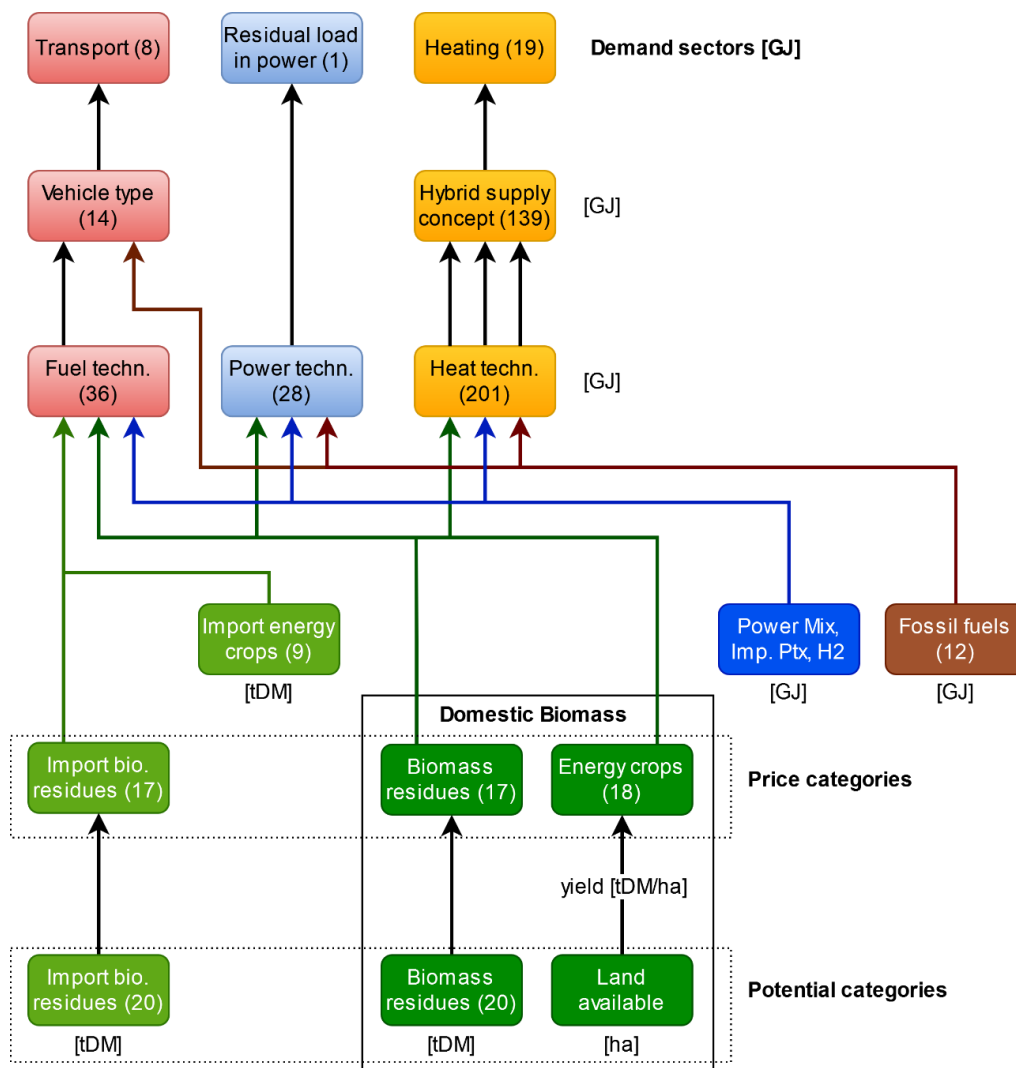


Abbildung 56: Die BenOpt-Modellstruktur. Die Pfeile zeigen die Rohstoff- und Energieflüsse. Die Zahlen in Klammern geben die Anzahl der berücksichtigten Teilsektoren, Technologien, Rohstoffe usw. an. Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Szenarien:

Entsprechend der Abstimmungen im Rahmen der NABIS wurde beschlossen, dass drei Szenarien aus bestehenden Studien untersucht/modelliert werden sollen:

- BEPASO-„(R)evolution/ Wende“
- Langfristszenarien (IFEU, z. T. basierend auf DBFZ-Daten)
- KIS-2030 (Öko-Institut, z. T. basierend auf DBFZ-Daten)

Die Datenbasis findet sich im Anhang III ab S. 112. Die Ergebnisse der Szenarienberechnung haben jedoch gezeigt, dass zwei der drei ausgewählten Szenarien sehr ähnlich sind und zu fast identischen Ergebnissen führen. Die grundsätzliche Idee der Modellierung ist jedoch, Wirkungszusammenhänge darzustellen und damit mögliche Lösungsräume zu identifizieren. Da dies mit der Auswahl an Szenarien nicht gegeben war, wurde beschlossen ein weiteres Szenario als Sensitivität zu rechnen:

- BEPASO-„Am Tropf“ (BAU)

In Bezug auf die „nicht-Biomasse“-Parameter in der Modellierung gab es die Vorgabe, dass über alle Modellläufe die Rahmenbedingungen (Parametrisierung des Modells) identisch gehalten werden sollen. Tabelle 20 gibt einen Überblick über die möglichen, zu variierenden Parameter im Modell und deren Setzung in den Szenarien. Die zukünftige Entwicklung des Endenergieverbrauchs hat erfahrungsgemäß einen deutlichen Einfluss auf die Modellierungsergebnisse. Unter der genannten Prämisse konnte dieser Effekt jedoch nicht dargestellt werden. Daher wurde im BEPASO-BAU-Szenario der EEV im Vergleich zu den anderen Szenarien variiert.

Tabelle 20: Übersicht zu den "nicht-Biomasse"-Parametern in den Szenarien.

| | BEPASO-R, LFS, KIS-2030 | BEPASO-BAU |
|--------------------------------------|--|--|
| Entwicklung Endenergieverbrauch | UBA Greenlife + ambitionierte Sanierungsrate | UBA Greenlate + moderate Sanierungsrate |
| Ausbau Wind/PV | UBA Greenlife | UBA Greenlate |
| CO ₂ -Preis Pfad | bis auf 346 €/tCO ₂ in 2040 (entsprechend KIS) | Moderat bis auf 150 €/tCO ₂ in 2045 |
| Entwicklung Invest/ Effizienz | konservativ | konservativ |
| Technologieverbote | entsprechend der gesetzlichen Verankerung: Kohleausstieg, RED2 (Palm-Oil) etc. | |
| Erfüllung Klimaziele in den Sektoren | Klimaneutral in 2045 (negative Emissionen nicht berücksichtigt, daher Restemissionen im Energiesystem) | |

Die für die NABIS interessanten Parametervariationen sind die Biomassepotenziale. Die Herleitung und Quantifizierung dieser Potenziale innerhalb der Szenarien sind an anderer Stelle dieses Berichts beschrieben. Nachfolgend sind jedoch der Vollständigkeit halber die energetisch nutzbaren Potenziale grafisch für jedes Szenario dargestellt (Reststoffe und sonstige Biomassen, Anbaubiomasse und Importpotenziale).

Es ist bereits anhand der Potenziale zu sehen, dass das BEPASO-R- und LFS-Szenario sehr ähnliche Potenziale für die energetische Nutzung ausweisen. Folglich sind die Modellierungsergebnisse in diesen beiden Szenarien auch sehr ähnlich.

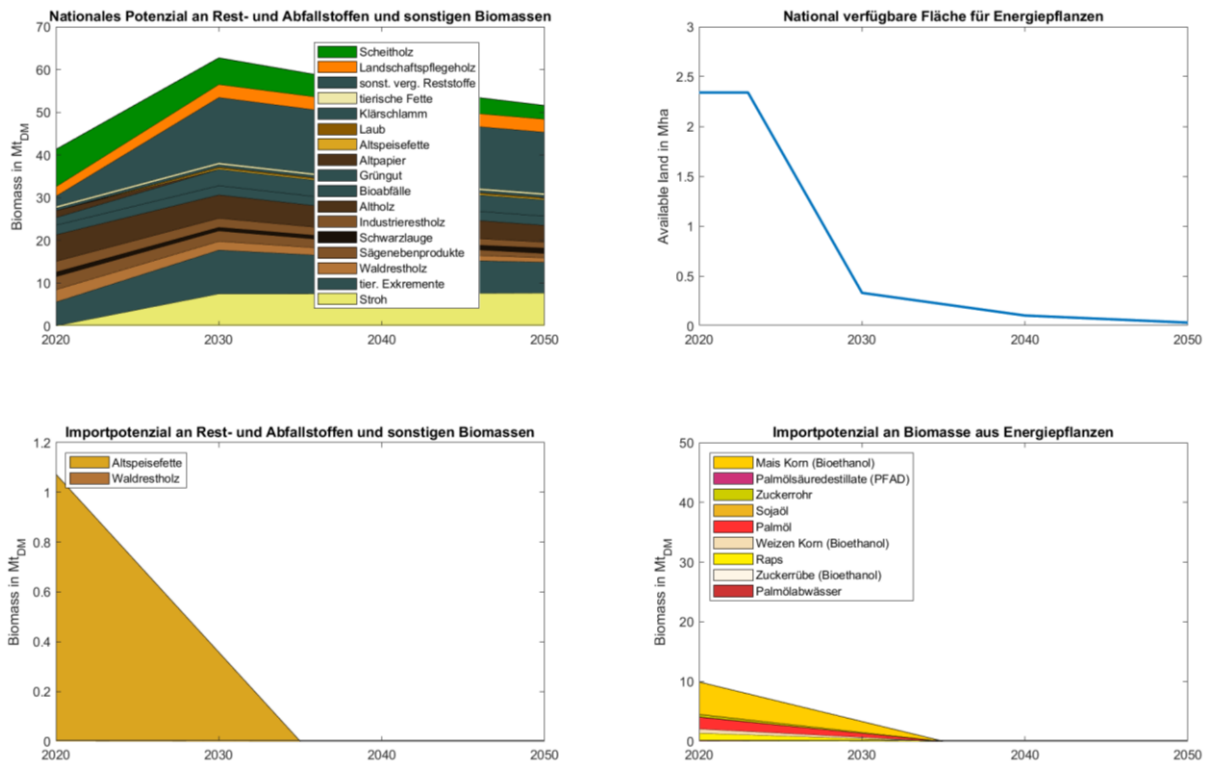


Abbildung 57: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im BEPASO-Revolution-Szenario.

Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

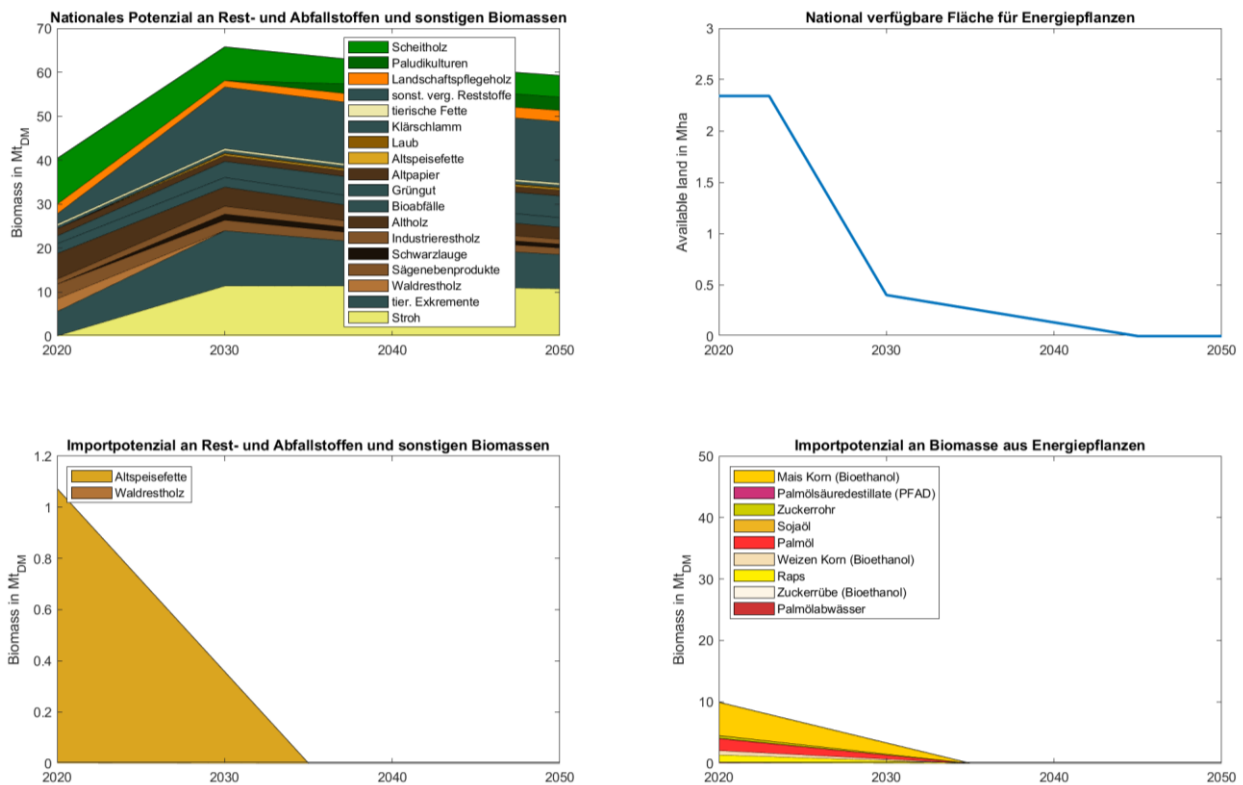


Abbildung 58: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im LFS-Szenario.

Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

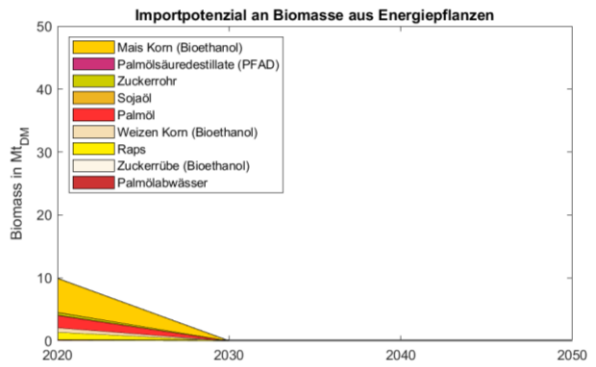
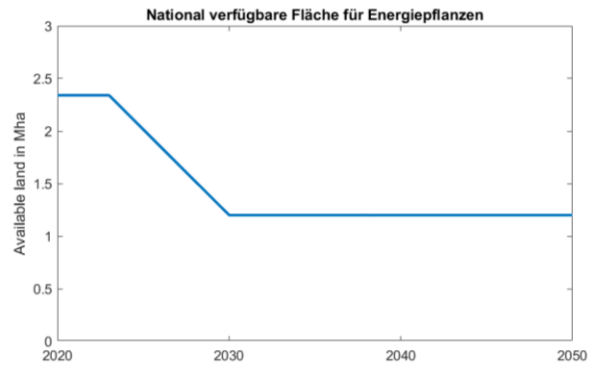
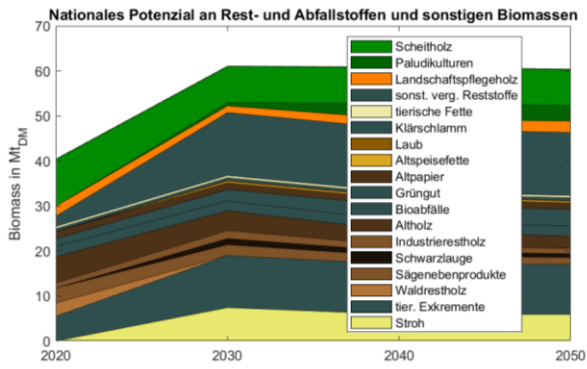


Abbildung 59: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im KIS-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

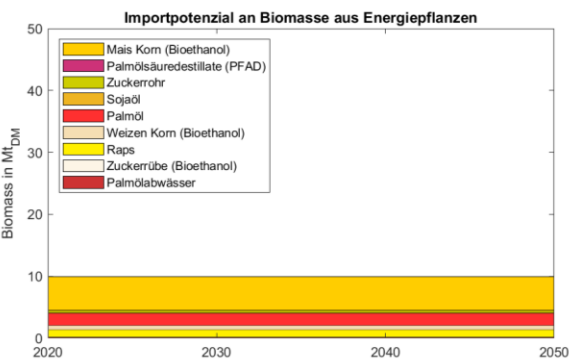
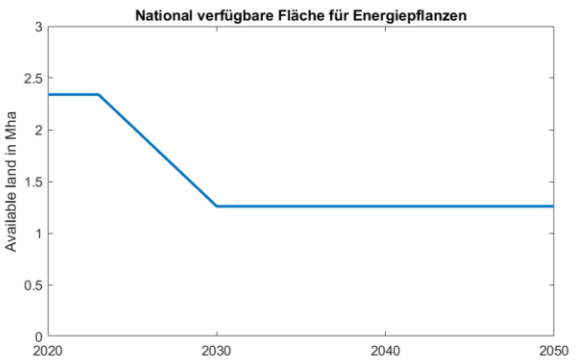
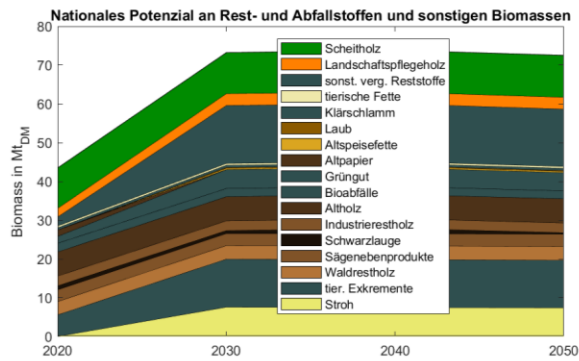


Abbildung 60: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im BEPASO-BAU-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Ergebnisse:

Biomasse kann in verschiedensten Bereichen des Energiesystems eingesetzt werden, ist allerdings nur begrenzt verfügbar. Die Ergebnisse zeigen, dass Bioenergie ihren kostenoptimalen Nutzen in den Bereichen hat, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist bzw. zur Flexibilisierung des Stromsektors. Die direkte Konkurrenz zur Biomasse in diesen Bereichen stellen Wasserstoff und dessen PtX-Folgeprodukte dar. Die Ergebnisse zeigen, dass eine deutliche Reduktion des zukünftigen Endenergieverbrauchs den Bedarf in schwer zu elektrifizierenden Bereichen auch deutlich senkt und damit den Bedarf an „teureren“ Energiebereitstellungsoptionen reduziert. Die folgenden Grafiken zeigen zunächst die aggregierten Modellierungsergebnisse für den Wärmesektor, die Residuallast im Stromsektor und den Verkehr in allen vier Szenarien. Wie bereits angedeutet sind die Ergebnisse im BEPASO-R- und LFS-Szenario sehr ähnlich.

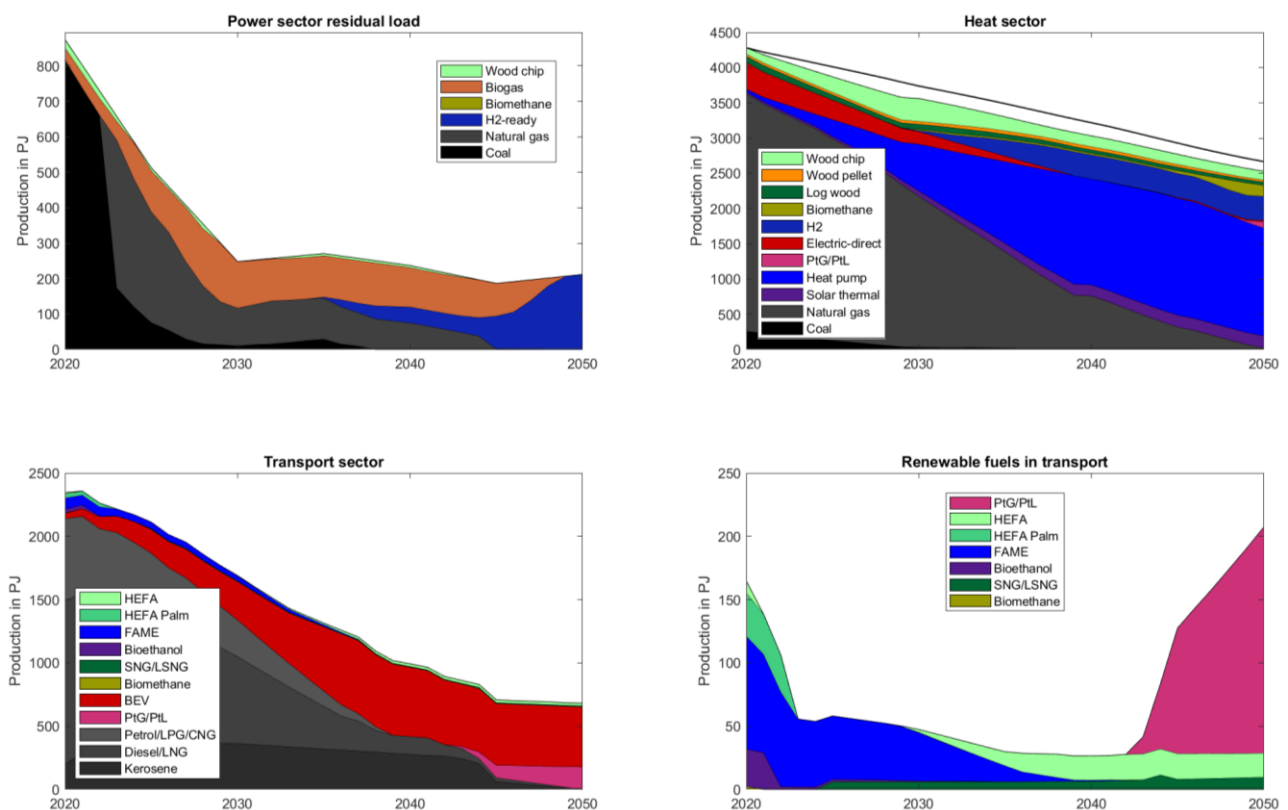


Abbildung 61: Aggregierte BenOpt-Modellierungsergebnisse für das "BEPASO-R"-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Wärmesektor Ergebnisse: Die größte Menge an Biomasse insgesamt wird in allen Szenarien in Form von Hackschnitzeln aus Holzreststoffen und Miscanthus für Hochtemperatur-Industrieanwendungen genutzt. Die Menge hängt stark davon ab, ob und wieviel Energiepflanzen zukünftig angebaut werden, siehe Abbildung 65.

Daneben wird weiterhin Scheitholz (Derbholz) meist aus privaten Klein(st)wäldern in Scheitholzfeuerungen und Pellets vor allem in hybriden Systemen mit Wärmepumpen oder Solarthermie in Gebäuden eingesetzt. Zukünftige Pellet-Marktanteile in Gebäuden sind abhängig vom zur Verfügung stehenden Biomassepotenzial. Als wettbewerbsfähigste Optionen wurden Pellets in Hybridsystemen mit Wärmepumpen erkannt, in denen die Biomassethechnologie die Spitzenlast deckt.

Vergärbare Rest- und Abfallstoffe als Rohstoff für Biomethan spielen ab den 2040er Jahren in Hochtemperatur-Industrieanwendungen und als Substitut in den verbleiben Gasthermen eine wichtige Rolle, um auch diese Sektoren klimaneutral zu gestalten. Diese Verschiebungen der Potenziale ab 2045 sind natürlich mit großen Unsicherheiten verbunden.

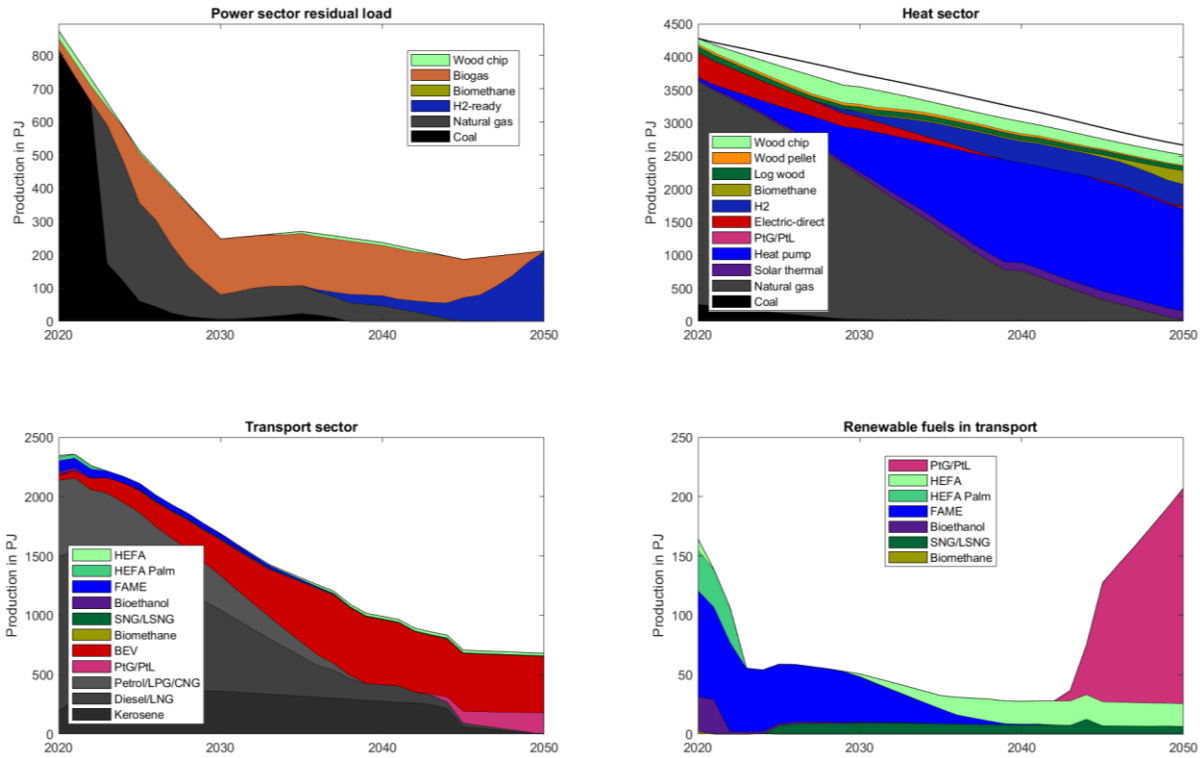


Abbildung 62: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "LFS"-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

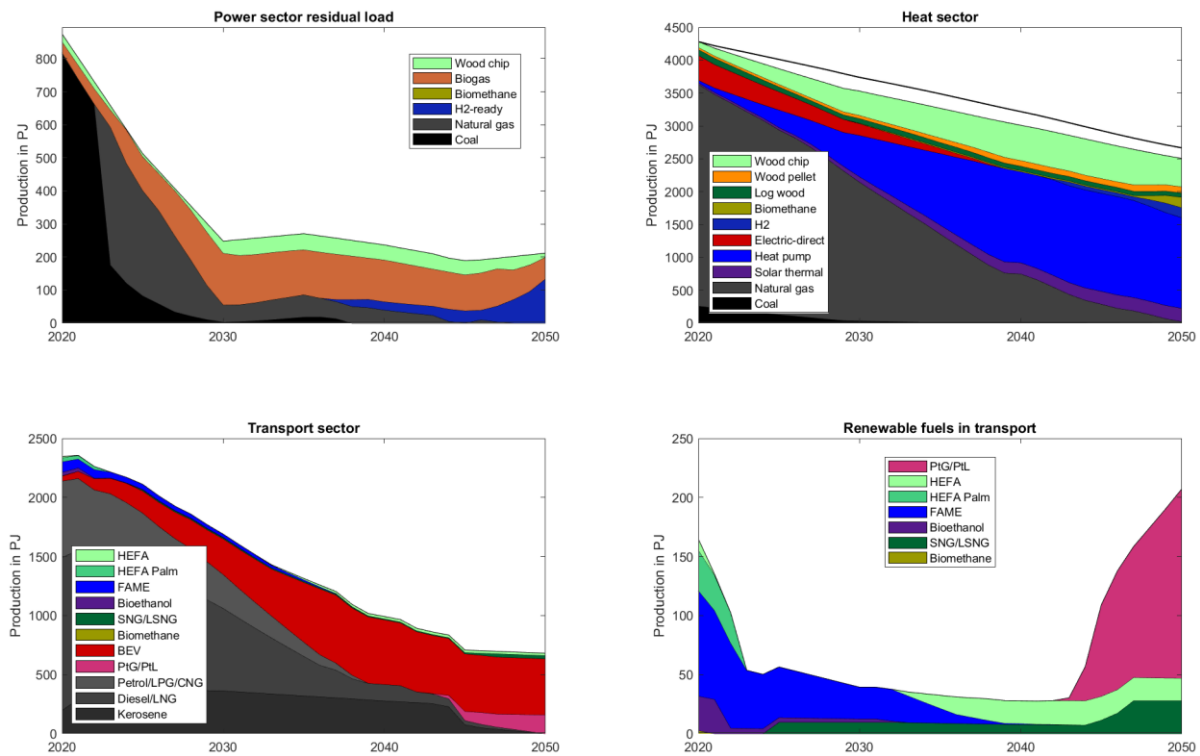


Abbildung 63: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "KIS"-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

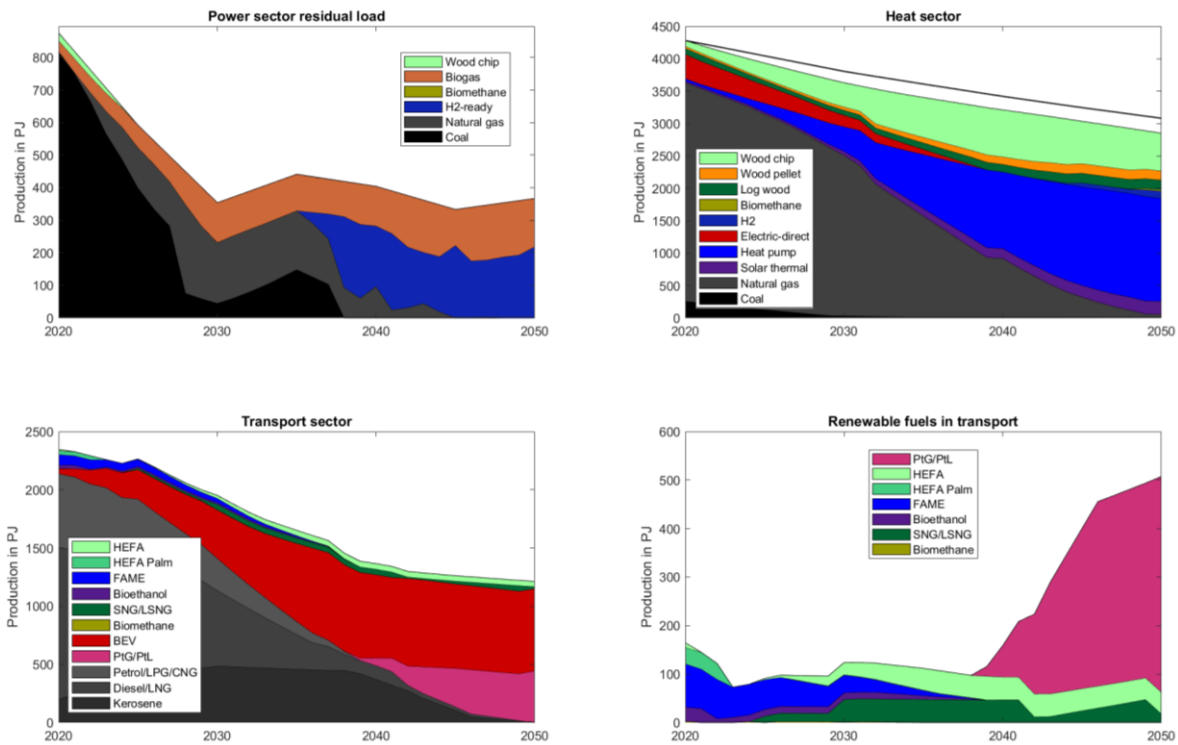


Abbildung 64: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "BEPASO-BAU"-Szenario.

Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

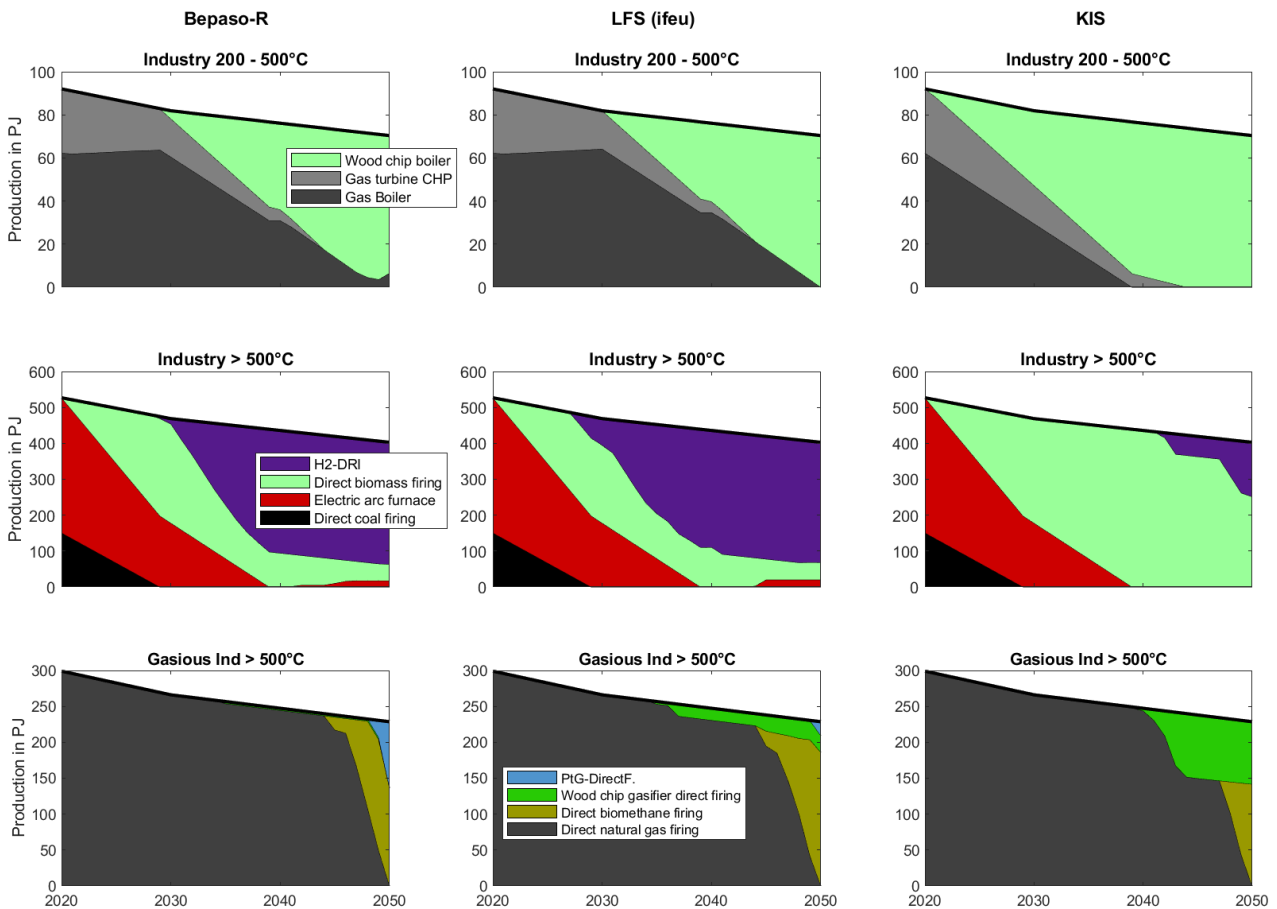


Abbildung 65: Einsatz von Bioenergie für Industrierwärme für verschiedene Temperaturbereiche in drei Szenarien

(H2-DRI = Wasserstoff Direktreduktionsverfahren).

Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Stromsektor – Ergebnisse: Langfristig ist der Einsatz von Biogas aus heimischen, vergärbaren Rest- und Abfallstoffen sowie Stroh zur flexiblen Bedarfsdeckung der Residuallast die kosteneffizienteste Option. Im KIS-Szenario hat der Holzvergaser KWK (Miscanthus) zusätzliche Marktanteile. Die verbleibenden Bedarfe werden mit H₂-ready-Technologien gedeckt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass ein stark steigender CO₂-Preis zu einem schnelleren Verdrängen der fossilen Energieträger zur Deckung der Residuallast führt. Das verfügbare Potenzial an vergärbaren Rest- und Abfallstoffen und Anbaubiomasse hat hier einen deutlichen Einfluss auf die Marktanteile.

Verkehrssektor – Ergebnisse: Die Elektrifizierung des Straßen- und Schienenverkehrs erweist sich als wettbewerbsfähigste Option, gefolgt von Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen. Generell sieht man über die Szenarien, dass der Verkehrssektor die geringsten Bioenergieanteile hat. Am vordringlichsten wird diese im Schiffsverkehr eingesetzt. Dabei kommen HEFA-Diesel (ölige Reststoffe) und SNG (BTG LNG ligno (Schwarzlauge + Miscanthus)) im Schiffsverkehr zum Einsatz. Verbleibende Mengen an öligen Reststoffen gehen als HEFA-SAF in den Flugverkehr.

Strombedarf und Kosten des Energiesystems bei variierenden Biomassepotenzialen:

Abbildung 66 zeigt beispielhaft den modellendogen berechneten Verlauf des Strombedarfs für die direkte Elektrifizierung im Wärme- und Verkehrsbereich sowie die Herstellung von H₂ bzw. PtX (Import) im BEPASO-Revolution-Szenario. Da H₂ und PtX die direkten Konkurrenzoptionen der Biomasse in schwer zu elektrifizierenden Bereichen sind, kann man die Effekte von Biomassepotenzialerhöhungen bzw. -reduktionen zwischen den Szenarien gut quantifizieren. Auch die Effekte durch unterschiedliche Grade der Endenergiebedarfsreduktionen lassen sich damit quantifizieren.

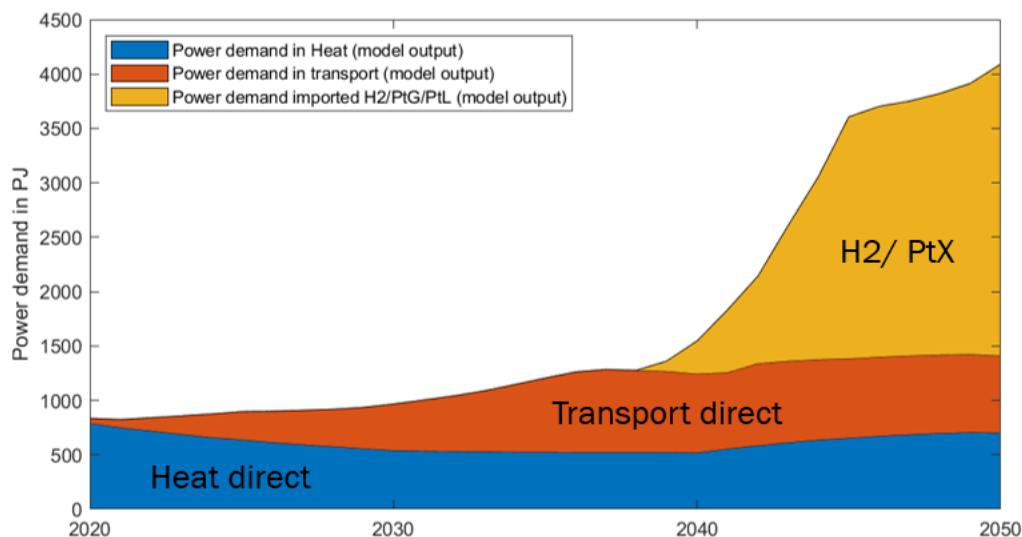


Abbildung 66: Modell endogen berechneter Strombedarf für direkte Elektrifizierung oder die Herstellung von H₂ oder PtX im "BEPASO-BAU"-Szenario.
Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Abbildung 67 zeigt den Vergleich des aufsummierten Strombedarfs zwischen den Szenarien im Jahr 2050. Der Einfluss eines stark reduzierten EEV (BEPASO-BAU vs. BEPASO-BAU (geringer EEV)) zeigt sich deutlich im Strombedarf und dem damit sinkenden Bedarf an schwer zu elektrifizierenden Bereichen, welche neben Biomasse auch große Mengen H₂ oder PtX zur Bedarfsdeckung benötigen. Eine starke Reduktion des Biomassepotenzials führt hingegen zu einer deutlichen Steigerung des Strombedarfs, vor

allem bedingt durch einen erhöhten Bedarf an PtX-Energieträgern (BEPASO-BAU (geringer EEV) vs. BEPASO-R/LFS). Der Vergleich zum KIS-Szenario zeigt vor allem den Effekt von zusätzlicher Anbaubiomasse im System, was wiederum den Strombedarf sinken lässt. In allen Fällen bedeutet ein erhöhter Strombedarf auch höhere Kosten, was in Abbildung 67 unterhalb der Pfeile dargestellt ist.

| | Zukünftig weniger Biomassepotenzial | | | | |
|------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------|
| | Bepaso-Bau | Bepaso-Bau (geringer EEV) | Bepaso-R (geringer EEV) | LFS (ifeu) (geringer EEV) | KIS (geringer EEV) |
| Strombedarf in 2050 in PJ | 4090 | 2020 | 3280 | 3000 | 2360 |
| Zusatzkosten 2020 - 2050 | +110 Mrd. € | | +215 Mrd. € | | +121 Mrd. € |

Abbildung 67: Summierter Strombedarf im Jahr 2050 für die ausgewählten Szenarien sowie Differenzkosten zwischen den Szenarien. Die farbliche Hinterlegung zeigt an, ob zukünftig eine hohes oder ein niedriges Biomassepotenzial in den Szenarien zur Verfügung steht.

Quelle: UFZ (2023), eigene Darstellung.

Ausführlicher werden die Differenzkosten in Tabelle 21 dargestellt. Diese zeigt die Zusatzkosten im Energiesystem bei unterschiedlichen EEV- bzw. Biomassepotenzialen zwischen den Szenarien. Folgende Schlussfolgerungen können gezogen werden:

- Eine starke Reduktion des EEV spart ~110 Mrd € von 2020-2050
- Eine starke Reduktion der energetischen Biomassenutzung kostet ~215 Mrd € von 2020-2050
- Die Zusatzkosten steigen in beiden Fällen im Zeitverlauf stark an und bestehen über das Jahr 2050 hinaus.

Tabelle 21: Zusatzkosten im Energiesystem bei verschiedenen EEV- bzw. Biomassepotenzialen zwischen den Szenarien.

| Zusatzkosten | 2020-2050 | 2020-2050 | 2050 | 2050 | Treiber |
|--------------------------------------|------------|-----------|--------------|-------|--|
| | [Mrd. EUR] | [%] | [Mrd. EUR/a] | [%/a] | |
| BEPASO-BAU vs. BEPASO-BAU (ger. EEV) | 110 | 2,5 | 37 | 39 | Höherer EEV |
| BEPASO-R vs. BEPASO-BAU (ger. EEV) | 215 | 4,9 | 17,6 | 19 | Reduktion Biomassepotenziale |
| BEPASO-R vs. KIS | 121 | 2,7 | 12 | 12 | Reduktion (Nawaro-) Biomassepotenziale |

Einordnung in die Literatur:

Die deutsche Energieforschung erstellt regelmäßig umfassende Energieszenariostudien, um kostenoptimale Pfade zur Klimaneutralität aufzuzeigen, die neuesten Versionen stammen insbesondere aus dem Jahr 2021 und zielen auf die Klimaneutralität im Jahr 2045 ab (Purr et al. 2019; Ariadne Kopernikus Projekte 2021; Agora Energiewende 2021; BDI 2021; Fraunhofer ISI und Consentec GmbH 2021; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021). Allerdings werden in diesen Modellen die verschiedenen Biomasse-Rohstofftypen, ihre entsprechenden Preise und die Vielfalt der Umwandlungstechnologien aggregiert dargestellt. Die Studien betrachten ein bis drei

Biomassekategorien (meist feste, gasförmige und flüssige Biomasse), für die zukünftigen unsicheren Biomassepotenziale werden in allen Szenarien feste Werte angenommen und die Frage, wie sich die zukünftigen Biomasseimporte entwickeln, wird teilweise nicht berücksichtigt. Daher wurde in den letzten Jahren das BenOpt-Modell entwickelt, um die künftige Rolle der Biomasse im deutschen Energiesystem genauer zu analysieren (Millinger et al. 2022; Jordan et al. 2022). Es wurden mehrere Analysen in verschiedenen Teilsektoren des Energiesystems durchgeführt, die sich auf eine Vielzahl von Forschungsfragen konzentrieren.

Generell kann man sagen, dass die hier dargestellten Szenarienergebnisse in die „groben“ Ergebnisse der deutschen Energieforschung eingeordnet werden können. Wenn Biomasse zur Verfügung steht, wird diese in beiden Fällen in den Szenarien auch genutzt. Ein gutes Beispiel sind die nationalen Holzpotenziale: Diese finden in den BenOpt-Szenarien die kostenoptimale zukünftige Nutzung im Wärmesektor. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der meisten aktuellen deutschen Energieszenarien, die den Einsatz von holzartiger Biomasse z. B. in der Industrie als "no regret"-Option darstellen (Agora Energiewende 2021; BDI 2021; Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2021). Da die BenOpt-Modellierungen weiter ins Detail gehen und speziell Biomasseparameter variiert werden, liefern die hier dargestellten Analysen weiterführende Erkenntnisse zur Bioenergie im Vergleich zu den aktuellen deutschen Energieszenarien.

Des Weiteren finden die Ergebnisse Anschluss zu den *EU Impact Assessments*, welche die Auswirkungen der EU-Richtlinien zu nachhaltigen Flug- und Schiffskraftstoffen abschätzen. Diese Verordnungen sollen beispielsweise gleiche Wettbewerbsbedingungen für den nachhaltigen Luftverkehr gewährleisten und verpflichten die Anbieter von Flugzeugtreibstoffen, den Anteil nachhaltiger Flugkraftstoffe schrittweise auf 70 % im Jahr 2050 zu erhöhen. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf Biokraftstoffe lassen sich nur schwer abschätzen. Die *EU Impact Assessments* gehen von hohen Mengen an Biomasse im Luft- und Seeverkehr aus. Die Szenarien der BenOpt-Modellierung zeigen jedoch für Deutschland deutlich geringere Mengen im Verkehr als in den *EU Impact Assessments* (European Commission 2021b, 2021a) dargestellt.

Schlussfolgerungen:

Die Analysen zeigen, dass auch zukünftig der Einsatz von Biomasse im Rahmen der Energiewende in allen Energiesektoren sinnvoll ist. Die verfügbaren Biomassepotenziale wurden in allen Szenarien fast vollständig ausgeschöpft. Die Allokationsprioritäten basierend auf den kostenoptimalen Szenarienberechnungen sehen dabei folgendermaßen aus:

- Der Einsatz von holziger Biomasse (Reststoffe und Miscanthus) und langfristig vergärbare Biomasse (vergärbare Rest- und Abfallstoffe und Stroh) in Hochtemperatur-Industrieanwendungen im Wärmesektor. Ob Bioenergie als wettbewerbsfähigste Option auch vollumfänglich die Hochtemperaturindustrie transformieren kann oder als Brückentechnologie mit langfristigem Wechsel auf H₂/Pt_x eingesetzt wird, hängt stark von den zur Verfügung stehenden Potenzialen, speziell Anbaubiomasse, ab.
- Im Gebäudebereich werden weiterhin Pellets und Scheitholz in den Szenarien eingesetzt, jedoch nicht in monovalenten Systemen, sondern in gut integrierten hybriden Konzepten, in denen die Biomassefeuerung oft die Spitzenlast deckt.
- Der Einsatz von vergärbare Biomasse (vergärbare Reststoffe und Stroh) als Biogas zur Flexibilisierung im Stromsektor. Bestehende Biogaskapazitäten werden in den untersuchten

Szenarien erhalten und bis 2050 ausgebaut. Die Menge des genutzten Biogases hängt stark vom verfügbaren Biomassepotenzial ab. Die kostenintensivere Alternative zur Deckung der Residuallast ist der Einsatz von Wasserstoff in „H₂-ready“-Anlagen.

- Der Einsatz von HEFA-Diesel (ölige Reststoffe) und SNG (Schwarzlauge) im Schiffsverkehr. Verbleibende Mengen an öligen Reststoffen finden den Einsatz als HEFA-SAF im Flugverkehr.

Eine Reduktion der Biomassepotenziale bedeutet eine deutliche Steigerung der Kosten, vor allem in Richtung 2045 und den Jahren danach. Dies ist vor allem dem daraus resultierenden Mehrbedarf an H₂/PtX geschuldet. Die Mehrkosten für einen sparsamen Einsatz von Biomasse im Energiebereich können z. B. zu großen Teilen durch eine starke Senkung des Endenergiebedarfs kompensiert werden. In Bezug auf die Biomassepotenziale können einzelne Stellschrauben den Unterschied machen, z. B. verringern Bioenergie-Netto-Null-Importe die Biokraftstoffmenge im Verkehr im Vergleich zu heute oder Szenarien mit hohen Importpotenzialen stark; Gärrestückführung (Stroh) kann das Strohpotenzial deutlich erhöhen (+4,2 Mio t) und Importe von PtX verringern (~ -200 PJ Strom für PtX in 2050).

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Dominierende Baumarten in Deutschland 2017/2018, CC BY (CC BY)..... | 6 |
| Abbildung 2: | Baumartenverteilung in [%] nach Baumartengruppen im Jahr 2012. | 7 |
| Abbildung 3: | Waldflächenverteilung nach Eigentumsart in [%] im Jahr 2012. | 9 |
| Abbildung 4: | Flächennutzung in Deutschland im Jahr 2021..... | 10 |
| Abbildung 5: | Nutzung der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) und Differenz zur landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) in Deutschland im Jahr 2020..... | 11 |
| Abbildung 6: | Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1992 bis 2021*). | 13 |
| Abbildung 7: | Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1996 bis 2020 in Hektar pro Tag..... | 13 |
| Abbildung 8: | Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) und der landwirtschaftlich genutzten Fläche (LF) in Deutschland von 1991 bis 2021. | 14 |
| Abbildung 9: | Veränderung der Flächennutzung in Deutschland von 1991 bis 2021. | 14 |
| Abbildung 10: | Flächennutzungsänderungen zugunsten von Wald sowie Siedlungs- und Verkehrsflächen zwischen 2001 und 2020 gemäß Klimaberichterstattung..... | 16 |
| Abbildung 11: | Gesamtfläche, Ackerland und dessen Umwandlung in andere Flächennutzungen (2000 bis 2010) nach Bodenqualität. | 16 |
| Abbildung 12: | Entwicklung der Nutzung des Ackerlandes in Deutschland von 1990 bis 2021. | 17 |
| Abbildung 13: | Entwicklung der Fläche, der Erträge und der Produktion von Getreide (a), der prozentualen Änderungen gegenüber dem Vorjahr (b) und gegenüber dem Jahr 1990 (c)..... | 18 |
| Abbildung 14: | Entwicklung des Biogasanlagenbestandes ¹⁾ | 21 |
| Abbildung 15: | Annahmen zur Biokraftstoffherstellung aus agrarischen Primärrohstoffen in Deutschland (in 1.000 Tonnen Rohstoff)..... | 22 |
| Abbildung 16: | Kumulierte Entwicklung der in Anspruch genommenen Fläche durch Freiflächen- PV..... | 23 |
| Abbildung 17: | Bedeutung des ökologischen Landbaus in den Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2021..... | 24 |
| Abbildung 18: | Erzeugung landwirtschaftlicher Primärbiomasse in Deutschland, 2020, in Megatonnen (Mt). | 28 |
| Abbildung 19: | Erzeugung und Handel landwirtschaftlicher Biomasse in Deutschland, 2020, in Megatonnen (Mt). | 29 |
| Abbildung 20: | Status quo des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15) von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) – Mittelwerte. | 31 |
| Abbildung 21: | Status quo des technischen Potenzials tierischer Exkrememente von Rindern, Schweinen und Hühnern..... | 32 |
| Abbildung 22: | Übersicht der Schlüsselinformationen des Stoffstroms innerhalb des Ressourcenmonitorings für biogene Abfälle und Reststoffe. | 34 |
| Abbildung 23: | Potenzielles Rundholzaufkommen nach WEHAM im Zeitraum 2012 – 2052 in Mio. m^3 (Efm ohne Rinde). | 39 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 24: Entwicklung des Laubholzanteils am potenziellen Rohholzaufkommen in den drei WEHAM-Szenarien. | 40 |
| Abbildung 25: Potenzieller Einschlag 2022–2102 nach FABio..... | 41 |
| Abbildung 26: Zukünftige Produktion bzw. Verfügbarkeit von Sägenebenprodukten..... | 43 |
| Abbildung 27: Zukünftige Produktion bzw. Verfügbarkeit von Rinde. | 44 |
| Abbildung 28: Zukünftiges Altholzaufkommen. | 46 |
| Abbildung 29: Landwirtschaftliche Biomasseproduktion in Deutschland in Trockenmasse bis 2050. | 47 |
| Abbildung 30: Entwicklung des Holzeinschlags in Mio. m ³ nach amtlicher Statistik und Thünen-Einschlagsrückrechnung. | 52 |
| Abbildung 31: Entwicklung der Rohholzentnahme gegliedert nach Holzart und Art der Verwendung. | 53 |
| Abbildung 32: Inlandsverwendung von Rohholz (ohne Lager) nach Verwendungssektor im Jahr 2021. | 54 |
| Abbildung 33: Energetische und stoffliche Nutzung von Holzreststoffen in den Jahren 1990, 2000, 2010 und 2020. | 55 |
| Abbildung 34: Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse in Deutschland im Jahr 2020. | 56 |
| Abbildung 35: Sektorenübergreifende Ergebnisse des Reststoff-Monitorings, hier als Mittelwerte für das Jahr 2015. | 57 |
| Abbildung 36: Stoffliche Nutzung ausgewählter biogener Reststoffe. | 57 |
| Abbildung 37: Masse- und energiebezogener Substratinput in Biogasanlagen in Deutschland..... | 58 |
| Abbildung 38: Nutzung von Biokraftstoffen aus Abfällen und Reststoffen 2019-2021. | 59 |
| Abbildung 39: Rohholzproduktion in Deutschland zwischen 2015 und 2050. | 64 |
| Abbildung 40: Inlandsnutzung von Rohholz in Deutschland..... | 64 |
| Abbildung 41: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2015 bis 2050..... | 65 |
| Abbildung 42: Energetische Rohholznutzung in Deutschland von 2015 bis 2050..... | 66 |
| Abbildung 43: Stoffliche Nutzung von Nadel- und Laubholz in Deutschland von 2015 bis 2050. | 66 |
| Abbildung 44: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2012 bis 2050..... | 68 |
| Abbildung 45: Stoffliche Rohholznutzung nach Nadel- und Laubholz in Deutschland von 2012 bis 2050. | 69 |
| Abbildung 46: Rohholzproduktion im Referenzszenario sowie im EUBDS-Szenario A und im EUBDS-Szenario B in den Jahren 2030 und 2050..... | 70 |
| Abbildung 47: Stoffliche Rohholznutzung in Deutschland von 2006 bis 2060..... | 71 |
| Abbildung 48: Energetische Rohholznutzung in Deutschland von 2006 bis 2060..... | 72 |
| Abbildung 49: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Rohholznutzung. | 73 |
| Abbildung 50: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Nadelrohholznutzung..... | 73 |
| Abbildung 51: Entwicklung der minimalen, durchschnittlichen und maximalen stofflichen Laubrohholznutzung. | 74 |
| Abbildung 52: Energetische und stoffliche Nutzung der in Deutschland erzeugten landwirtschaftlichen Biomasse bis 2050..... | 75 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 53: Minimum- und Maximum-Werte für die recherchierten zusätzlichen Biomassebedarfe, nach Sektoren im Vergleich zum Referenzjahr 2020 für die betrachtenden Jahre 2030 und 2050. | 77 |
| Abbildung 54: Minimum und Maximum Werte für die recherchierten zusätzlichen Biomassebedarfe im Vergleich zum Referenzjahr 2020 für die betrachtenden Jahre 2030 und 2050. | 81 |
| Abbildung 55: Skizzierung der Input-/Output-Daten des BenOpt Modells. | 83 |
| Abbildung 56: Die BenOpt-Modellstruktur. Die Pfeile zeigen die Rohstoff- und Energieflüsse. | 84 |
| Abbildung 57: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im BEPASO-Revolution-Szenario. | 86 |
| Abbildung 58: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im LFS-Szenario. | 86 |
| Abbildung 59: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im KIS-Szenario. | 87 |
| Abbildung 60: Energetisch nutzbares Biomassepotenzial im BEPASO-BAU-Szenario. | 87 |
| Abbildung 61: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "BEPASO-R"-Szenario. | 88 |
| Abbildung 62: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "LFS"-Szenario. | 89 |
| Abbildung 63: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "KIS"-Szenario. | 89 |
| Abbildung 64: Aggregierte BenOpt-Modellergebnisse für das "BEPASO-BAU"-Szenario. | 90 |
| Abbildung 65: Einsatz von Bioenergie für Industriewärme für verschiedene Temperaturbereiche in drei Szenarien. | 90 |
| Abbildung 66: Modell endogen berechneter Strombedarf für direkte Elektrifizierung oder die Herstellung von H2 oder PtX im "BEPASO-BAU"-Szenario. | 91 |
| Abbildung 67: Summierter Strombedarf im Jahr 2050 für die ausgewählten Szenarien sowie Differenzkosten zwischen den Szenarien. Die farbliche Hinterlegung zeigt an, ob zukünftig eine hohes oder ein niedriges Biomassepotenzial in den Szenarien zur Verfügung steht. | 92 |
| Abbildung 68: Methodik für die Berechnungen von zukünftigen Potenzialen ausgewählter Biomassen (Top 15) inklusive relevanter Nachhaltigkeitsaspekte. | 111 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 1: | Waldfläche in Deutschland in [ha] nach Bundesland und Waldspezifikation. | 5 |
| Tabelle 2: | Waldfläche in [ha] nach Bestockungstyp Laub/Nadel in der Hauptbestockung im Jahr 2012. | 8 |
| Tabelle 3: | Flächennutzungsänderungen und Veränderungen der LF zwischen 1992 und 2021. | 15 |
| Tabelle 4: | Anbauflächen für Industrie- und Energiepflanzen. | 20 |
| Tabelle 5: | Ökologisch wirtschaftende Landwirtschaftsbetriebe und Umfang der ökologisch bewirtschafteten Fläche (LF) nach Verordnung (EG) Nr. 834/2007 i.V.m. Verordnung (EG) Nr. 889/2008 in Deutschland im Jahr 2021 (sortiert nach Umfang der ökologisch bewirtschafteten Fläche in ha). | 24 |
| Tabelle 6: | Potenziale der Holzbiomassen sowie Rinde. | 25 |
| Tabelle 7: | Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebe mit Zwischenfruchtanbau. | 30 |
| Tabelle 8: | Qualitative Vergleichsübersicht der Biomassepotenzialmethodik – BioRest und DBFZ-Ressourcendatenbank. | 33 |
| Tabelle 9: | Quantitative Vergleichsübersicht von Potenzialen ausgewählter Biomassen – DBFZ-Ressourcendatenbank und BioRest. | 36 |
| Tabelle 10: | Entwicklung der Aufkommenspotenziale von Ablauge und Altpapier. | 45 |
| Tabelle 11: | Datengrundlage aus BEPASO für die Berechnung zukünftiger Potenziale. | 47 |
| Tabelle 12: | Zukünftige Entwicklungen des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15). | 48 |
| Tabelle 13: | Zukünftige Entwicklungen des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe (Top 15). | 49 |
| Tabelle 14: | Nutzung der Holzbiomassen sowie Rinde. | 51 |
| Tabelle 15: | Einsatz alternativer Substratausgangsstoffe in 2021. | 59 |
| Tabelle 16: | Vergleich von Parametern verschiedener Szenariomodellierungen. | 67 |
| Tabelle 17: | Annahmen zur Erhöhung der stofflichen Nutzung in allen Sektoren. | 76 |
| Tabelle 18: | Annahmen zu einbezogenen Mengen durch die Erhöhung der stofflichen Nutzung in allen Sektoren. | 76 |
| Tabelle 19: | Anteil Bioenergie am EEV in den Sektoren heute (UBA) sowie in 2030 und 2045 (BenOpt Szenarien). | 82 |
| Tabelle 20: | Übersicht zu den "nicht-Biomasse"-Parametern in den Szenarien. | 85 |
| Tabelle 21: | Zusatzkosten im Energiesystem bei verschiedenen EEV- bzw. Biomassepotenzialen zwischen den Szenarien. | 92 |
| Tabelle 22: | Status quo des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe sowie Gesamt von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) - Mittelwerte. | 110 |
| Tabelle 23: | Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial BEPASO-„(R)evolution/Wende“. | 112 |
| Tabelle 24: | Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial Langfristszenarien (IFEU, z. T. basierend auf DBFZ-Daten). | 112 |
| Tabelle 25: | Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial KIS-2030 (Öko-Institut, z. T. basierend auf DBFZ-Daten). | 113 |

Literaturverzeichnis

ABO Wind (2021): Infos für Flächenbesitzer. Ein Windpark auf Ihrem Land. Online verfügbar unter <https://www.abo-wind.com/de/leistungen/windkraft/infos-fuer-flaechenbesitzer.html>, zuletzt geprüft am 26.04.2023.

AGEE-Stat (2023): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Hg. v. BMWK. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen-zur-entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-1990-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 01.07.2023.

Agora Energiewende (Hg.) (2021): Towards a Climate-Neutral Germany by 2045. How Germany can reach its climate targets before 2050. Executive summary. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_213_KNDE2045_Summary_EN_WEB.pdf.

Agora Energiewende; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal (Hg.) (2019): Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.

Ariadne Kopernikus Projekte (Hg.) (2021): Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045. Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Online verfügbar unter <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-zur-klimaneutralitaet-2045-szenarienreport/>.

Banse, M.; Zander, K.; Babayan, T.; Bringezu, S.; Dammer, L.; Egenolf, V. et al. (2020a): Eine biobasierte Zukunft in Deutschland – Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen / A Biobased Future in Germany - Scenarios and Societal Challenges;. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.

Banse, M.; Zander, K.; Babayan, T.; Bringezu, S.; Dammer, L.; Egenolf, V. et al. (2020b): Eine biobasierte Zukunft in Deutschland – Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen / A Biobased Future in Germany - Scenarios and Societal Challenges;. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.

Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr (StMB) (2021): Bau- und landesplanerische Behandlung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen. Online verfügbar unter https://www.stmb.bayern.de/assets/stmi/buw/baurechtundtechnik/25_rundschreiben_freiflaechen-photovoltaik.pdf, zuletzt geprüft am 25.09.2023.

BDI (Hg.) (2021): Climate Paths 2.0. A Program for Climate and Germany's Future Development. Online verfügbar unter <https://english.bdi.eu/publication/news/climate-paths-2-0-a-program-for-climate-and-germanys-future-development/>.

Becker, A.; Peter, D.; Kemnitz, D. (2022): Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Hg. v. FNR. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22004416.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2023.

Behrendt, Siegfried (2018): Feedstock Change in der Chemieindustrie. Hg. v. IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH. Berlin. Online verfügbar unter

https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_Text_3-2018_Feedstock.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

Biorefinery Leuna | UPM Biochemicals (2023): Biorefinery Leuna. Online verfügbar unter <https://www.upmbiochemicals.com/about-upm-biochemicals/biorefinery-leuna/>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2023, zuletzt geprüft am 22.09.2023.

BLE (2022a): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2021. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2021.pdf;jsessionid=83B958E23A24243933A4C88E624A3E6B.internet992?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 25.06.2023.

BLE (2022b): Rohstoffe für fortschrittliche Biokraftstoffe in 2020, 2022 an Karl-Friedrich Cyffka.

Blickensdörfer, L.; Oehmichen, K.; Pflugmacher, D.; Kleinschmit, B.; Hostert, P. (2022): Dominant Tree Species for Germany (2017/2018). Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut.

BMEL (Hg.) (2022a): Massive Schäden - Einsatz für die Wälder. Stürme, die extreme Dürre und der Borkenkäferbefall - das hat den Wäldern in Deutschland in den vergangenen Jahren immens zugesetzt. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.

BMEL (2022b): Torffrei gärtnern, Klima schützen. Die Torfminderungsstrategie des BMEL. Hg. v. BMEL. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torfminderungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 04.07.2023.

BMUV (2022): Arbeitspapier: Maßnahme zur Verringerung des Anteils von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen in Folge des Ukraine-Krieges. Hg. v. BMUV.

Böhm, Jonas (2022): Abschätzung des zukünftigen Flächenbedarfs von Photo-voltaik-Freiflächenanlagen. Thünen-Institut (Thünen Working Paper, 204). Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065640.pdf.

Böhm, Jonas; Witte, Thomas de; Michaud, Coline (2022): Land use Prior to Installation of Ground-mounted Photovoltaic in Germany—GIS-analysis Based on MaStR and Basis-DLM. In: *Z Energiewirtschaft* 46 (2), S. 147–156.

Böldt, M.; Loges, R.; Kluß, C.; Taube, F. (2018): Zuwachsleistung und N-Aufnahme von Zwischenfrüchten unter norddeutschen Bedingungen: Potentiale zur Vermeidung negativer Umwelteffekte. Hg. v. Christian-Albrechts-Universität Kiel. Online verfügbar unter https://www.ifl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2018_boeldt_et_al.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

Borgnäs, Kajsa; Dupuis, Indira; Harrendorf, Malte; Hoare, Stephan; West, Klaus-W. (2021): Branchenausblick 2030+. Die Papier- und Zellstoffindustrie. Hg. v. Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE. Berlin.

Böttcher, Hannes; Hennenberg, Klaus; Winger, Christian (2018): Waldvision Deutschland. Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf>, zuletzt geprüft am 02.11.2022.

- Brosowski, André (2015): Potenziale biogener Rest- und Abfallstoffe für eine nachhaltige Energie- und Rohstoffbereitstellung. Hg. v. FNR. DBFZ. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Handout_Folder_Parlam_Mittag_Web.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2023.
- Brosowski, André (2021): National Resource Monitoring for Biogenic Residues, By-products and Wastes. Development of a Systematic Data Collection, Management and Assessment for Germany. Hg. v. DBFZ. Leipzig. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_41.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2023.
- Brosowski, André; Bill, Ralf; Thrän, Daniela (2020): Temporal and spatial availability of cereal straw in Germany—Case study. Biomethane for the transport sector. In: *Energ Sustain Soc* 10 (1).
- Brosowski, André; Krause, T.; Thrän, D.; Mantau, U.; Mahro, Bernd; Noke, Anja et al. (2019): Schlussbericht zum Vorhaben Arbeitsgruppe Biomassereststoffmonitoring (AG BioRestMon). Hg. v. FNR. DBFZ. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_41.pdf, zuletzt geprüft am 10.07.2023.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Hg.) (2023): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (66). Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/tabellenfinden/suchmaske>, [zitiert am 26.04.2023, zuletzt geprüft am 26.04.2023].
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2023a): Evaluations- und Erfahrungsberichte. Online verfügbar unter https://www.ble.de/DE/Themen/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Informationsmaterial/informationsmaterial_node.html, zuletzt geprüft am 25.09.2023.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (Hg.) (2023b): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (66). Online verfügbar unter <https://www.bmel-statistik.de/tabellenfinden/suchmaske>, [zitiert am 26.04.2023, zuletzt geprüft am 26.04.2023].
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2022): Torffrei gärtnern, Klima schützen. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hg.) (2020): Tagung "Torfminderung". Tagung "Torfminderung". Berlin, 18./19.02.2020. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL).
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2022): Schriftliche Mitteilung der Daten zum ökologischen Landbau auf Länderebene von Referat 712.
- Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021.
- Bundesverband Boden (Hg.) (2021): Boden und Windenergie. Online verfügbar unter <https://www.bodenwelten.de/content/boden-und-windenergie>, zuletzt geprüft am 26.04.2023.
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) (2022): Rohstoffe. Online verfügbar unter <https://bdi.eu/themenfelder/rohstoffe/>, zuletzt geprüft am 21.10.2022.

Bundesverband WindEnergie (Hg.) (2015): A bis Z - Fakten zur Windenergie. Von A wie Arbeitsplätze bis Z wie Ziele der Energieversorgung. Online verfügbar unter https://www.windenergie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/01-windkraft-vor-ort/bwe_abisz_3-2015_72dpi_final.pdf, zuletzt geprüft am 26.04.2023.

Bundesverbandes der Deutschen Industrie (BDI) / Federation of German Industries (BDI) (Hg.) (2018): Klimapfade für Deutschland. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2018/Januar/Klimapfade_fuer_Deutschland_BDI-Studie_/Klimapfade-fuer-Deutschland-BDI-Studie-12-01-2018.pdf, zuletzt geprüft am 27.10.2022.

Buongiorno, Joseph; Zhu, Shushuai; Raunikaar, Ronald; Prestemon, Jeffrey P. (2012): Outlook to 2060 for world forests and forest industries: a technical document supporting the Forest Service 2010 RPA assessment. Asheville, NC.

Destatis (2020): Bodennutzung der Betriebe - Landwirtschaftlich genutzte Flächen. Fachserie 3 Reihe 3.1.2.

Destatis (2022a): Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung. Qualitätsbericht 2021: Erschienen am 31.08.2022. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Land-Forstwirtschaft-Fischerei/flaechenerhebung.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 25.09.2023.

Destatis (2022b): Landwirtschaftszählung 2020 - Befragung. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Landwirtschaftszaehlung2020/befragung.html>, zuletzt geprüft am 25.09.23.

Destatis (2022c): Viehbestand. Fachserie 3 Reihe 4.1.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hg.) (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf, zuletzt geprüft am 27.10.2022.

Döring, P.; Giesecking, L.; Mantau, U. (2020): Sägeindustrie 2018. Einschnitt- und Produktionsvolumen. Hamburg.

Dotzauer, Martin; Barchmann, Tino; Schmieder, Uta; Rensberg, Nadja; Stinner, Walter; Arnold, Karin; Krüger, Christine (2022): Kurzstudie zur Rolle von Biogas für ein klimaneutrales, 100 % erneuerbares Stromsystem 2035 (KS_BSKES). Hg. v. DBFZ und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/Kurzstudie_Biogas_2022.pdf, zuletzt geprüft am 02.06.2023.

Europäische Union (2018): VERORDNUNG (EU) 2018/1999 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über das Governance-System für die Energieunion. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999&from=EN>, zuletzt geprüft am 01.07.2023.

European Chemical Industry Council (Hg.) (2021): iC2050 Project Report. Shining a light on the EU27 chemicals sector's journey toward climate neutrality.

European Commission (Hg.) (2021a): Impact Assessment. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021SC0633&from=EN>, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

European Commission (Hg.) (2021b): Impact Assessment. Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=SWD:2021:0635:FIN:EN:PDF>, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (2023): Statistik Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Online verfügbar unter <https://statistik.fnr.de/>, zuletzt aktualisiert am 25.04.2023, zuletzt geprüft am 25.04.2023.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Hg.) (2023): Anbauflächen nachwachsender Rohstoffe in Deutschland. Online verfügbar unter <https://statistik.fnr.de/anbauflaechen.php>, zuletzt geprüft am 20.03.2022.

Fachagentur Windenergie an Land (Hg.) (2021): Entwicklung der Windenergie im Wald. Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern. 6. Aufl. Berlin. Online verfügbar unter https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Windenergie_im_Wald/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_6Auflage_2021.pdf.

FAO; ITTO; Nations, United (2020): Forest product conversion factors: FAO, ITTO and United Nations.

Fehrenbach, Horst; Giegrich, Jürgen; Köppen, Susanne; Wern, B.; Pertagnol Joachim; Baur, F. et al. (2018): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-09-24_texte_115-2019_biorest.pdf.

Flamme, Sabine; Hams, Sigrid; Bischoff, Jens; Fricke, Claas (2020): Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung. Abschlussbericht. Hg. v. UBA (95), zuletzt geprüft am 15.12.2021.

Fraunhofer ISI; Consentec GmbH (Hg.) (2021): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3. Online verfügbar unter <https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/>.

Gerber, Kristin; Röhling, Steffi; Dunger, Karsten; Klatt, Susann; Oehmichen, Katja (2018): Regionalisierte Ergebnisse der alternativen WEHAM-Szenarien (Thünen Working Paper, 102), zuletzt geprüft am 03.02.2022.

Geres, Roland; Kohn, Andreas; Lenz, Sebastian Cornelius; Ausfelder, Florian; Bazzanella, Alexis; Möller, Alexander (Hg.) (2019): Roadmap Chemie 2050 /. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland : eine Studie von DECHEMA und FutureCamp für den VCI / Towards a greenhouse gas neutral chemical industry in Germany : a study by DECHEMA and FutureCamp for the VCI. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. / DECHEMA Society for Chemical Engineering and Biotechnology e.V.

Glaserapp, Sebastian; Döring, Przemko; Blanke, Christian; Mantau, Udo (2017a): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien. Abschlussbericht WEHAM - AP 3.2. Hg. v. Zentrum Holzwirtschaft Universität Hamburg. Online verfügbar unter https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glaserapp__Doering__Blanke__Mantau__2017__Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien__WEHAM_Projekt_.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2022.

Glaserapp, Sebastian; Döring, Przemko; Blanke, Christian; Mantau, Udo (2017b): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien / Development of wood use scenarios. Abschlussbericht WEHAM - AP 3.2 / Final Report WEHAM - WP 3.2. Unter Mitarbeit von Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie und Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. Hg. v. Universität Hamburg / University of Hamburg. Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft.

Godin, Hélène (2020): Energiewende in der Industrie Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Papierindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Hg. v. Navigant Energy Germany GmbH.

Göhler, Laura; Walz, Ulrich; Krüger, Tobias (2019): Entwicklung der Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Deutschland –auf Grundlage des ATKIS Basis-DLM. Hg. v. Martin Behnisch (Flächennutzungsmonitoring XI. Flächenmanagement - Bodenversiegelung - Stadtgrün, 77). Online verfügbar unter <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-722629>.

Gömann, Horst; Witte, Thomas; Peter, Günter; Tietz, Andreas (2013): Auswirkungen der Biogasproduktion auf die Landwirtschaft. Hg. v. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report, 10). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen-Report_10.pdf.

Gutsch, Martin; Lasch-Born, Petra; Kollas, Chris; Suckow, Felicitas; Reyer, Christopher P. O. (2018): Balancing trade-offs between ecosystem services in Germany's forests under climate change. In: *Environ. Res. Lett.* 13 (4), S. 45012.

Hafner, Annette; Schäfer, Sabrina; Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan; Ebert, Samuel; Kleinhenz, Miriam et al. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. BMEL/BMUB. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) / Federal Ministry of Food and Agriculture (BMEL) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)/Federal Ministry for Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Construction.

Haß, Marlen; Delbitz, Claus; Freund, Florian; Kreins, Peter; Laquai, Verena; Offermann, Frank et al. (2022): Thünen-Baseline 2022 - 2032: Agrarökonomische Projektionen für Deutschland. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report, 100).

Heinze GmbH (Hg.) (2018): Monitoring und Verwendung von Holzprodukten im Bausektor und Bestimmung der Potenziale für CO₂-Bindung. gemeinsamer inhaltlicher Schlussbericht : Schlussbericht zum Vorhaben. Online verfügbar unter https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=getDocument&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bd%5D=46241550fe142d33015db938374291cc&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIBKAT%3A1045729531&cHash=df93ad4f7d18c05f3fb27a9aad73ef4e, zuletzt geprüft am 04.11.2022.

Hennenberg, Klaus; Böttcher, Hannes (2018): Kurzstudie zur Prüfung der derzeitigen Anreizstruktur beim Einsatz von Holz zur energetischen Verwendung auf die Wirksamkeit hinsichtlich der Klima- und Nachhaltigkeitsziele. Hg. v. Öko-Institut e. V. Darmstadt, Berlin. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Kurzstudie-Anreizstruktur-Holz.pdf>, zuletzt geprüft am 29.11.2021.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (2016): Faktenpapier Windenergie in Hessen: Natur- und Umweltschutz. Bürgerforum Energieland Hessen. Online verfügbar unter https://www.energieland.hessen.de/aktion/zukunftswerkstatt/fulda_darmstadt/Faktenpapier_Natur_und_Umweltschutz.pdf, zuletzt geprüft am 25-09.2023.

Hirschler, Olivier; Osterburg, Bernhard; Weimar, Holger; Glasenapp, Sebastian; Ohmes, Marie-Friederike (2022): Peat replacement in horticultural growing media: Availability of bio-based alternative materials (Thünen Working Paper, 190). Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_190.pdf, zuletzt geprüft am 16.12.2022.

Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V. (Hg.) (2021): Lagebericht 2021. Zimmerer/Holzbau. Berlin. Online verfügbar unter https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2021_mit_Statistiken.pdf?utm_source=baulinks&utm_campaign=baulinks, zuletzt geprüft am 18.10.2022.

Infro e.K. (Hg.) (2023): Verbundvorhaben: Systemisches Rohstoffmonitoring Holz (RMHsys); Teilvorhaben 1: Aufkommen und Verwendung von Holzrohstoffen in der gesamten Wertschöpfungskette. Schlussbericht. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22005918.pdf>, zuletzt geprüft am 25.04.2023.

Isermeyer, Folkhard (2022): Photovoltaik auf Agrarflächen – für eine schnelle Energiewende. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/themenfelder/Langfristige_Politikkonzepte/PV_auf_Agrarflaechen/2022-11-28_Isermeyer_Energiewende.pdf.

Jonsson, R.; Blujdea, V. N.; Fiorese, G.; Pilli, R.; Rinaldi, F.; Baranzelli, C.; Camia, A. (2018): Outlook of the European forest-based sector. Forest growth, harvest demand, wood-product markets, and forest carbon dynamics implications. In: *iForest* 11 (2), S. 315–328.

Jordan, Matthias; Lenz, Volker; Millinger, Markus; Oehmichen, Katja; Thrän, Daniela (2019): Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. In: *Energy* 189, S. 116194.

Jordan, Matthias; Meisel, Kathleen; Dotzauer, Martin; Schröder, Jörg; Cyffka, Karl-Friedrich; Dögnitz, Niels et al. (2023): The Controversial Role of Energy Crops in the Future German Energy System: The Trade Offs of a Phase-Out and Allocation Priorities of the Remaining Biomass Residues.

Jordan, Matthias; Millinger, Markus; Thrän, Daniela (2022): Benopt-Heat: An economic optimization model to identify robust bioenergy technologies for the German heat transition. In: *SoftwareX* 18, S. 101032.

- Kivelitz, Hubert (2016): Die richtige Zwischenfrucht - Auswahl von Zwischenfrüchten unter Berücksichtigung von Fruchtfolge und Saatzeit. Hg. v. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. Online verfügbar unter https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/versuche/pflanzenbau/zwischenfruechte/veroeffentlichungen/zwischenfruechte_fruchtfolgen.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Klöble, Ulrike (Hg.) (2019): Faustzahlen für den Ökologischen Landbau. Unter Mitarbeit von Johann Bachinger. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 2. Auflage. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft KTBL.
- Koch, Matthias; Hennenberg, Klaus; Hünecke, Katja; Haller, Markus; Hesse, Tilman (2018): Role of bioenergy in the electricity and heating market until 2050, taking into account the future building stock (Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes). Hg. v. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf, zuletzt geprüft am 04.06.2019.
- Lenz, Volker; Jordan, Matthias (2019): Technical and economic data of renewable heat supply systems for different heat sub-sectors. Hg. v. Mendeley data.
- Lindner, Marcus; Dees, Matthias; Anttila, Perttu; Verkerk, Pieter Johannes; Fitzgerald, Joanne Brighid; Datta, Pawan et al. (2017): Assessing Lignocellulosic Biomass Potentials from Forests and Industry. In: Calliope Panoutsou (Hg.): Modeling and Optimization of Biomass Supply Chains. Top-Down and Bottom-Up Assessment for Agricultural, Forest and Waste Feedstock: Academic Press, S. 127–167. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/book/9780128123034/modeling-and-optimization-of-biomass-supply-chains>, zuletzt geprüft am 24.11.2021.
- Mandley, S. J.; Daioglou, V.; Junginger, H. M.; van Vuuren, D. P.; Wicke, B. (2020): EU bioenergy development to 2050. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 127, S. 109858.
- Mantau, Udo; Doring, Przemko; Hiller, Dirk (2013): Holzeinsatz im Bauwesen - Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Report, 9).
- Material Economics (Hg.) (2021): EU Biomass Use in a Net-Zero Economy. A course correction for EU biomass. Online verfügbar unter <https://www.climate-kic.org/wp-content/uploads/2021/06/MATERIAL-ECONOMICS-EU-BIOMASS-USE-IN-A-NET-ZERO-ECONOMY-ONLINE-VERSION.pdf>, zuletzt geprüft am 01.11.2022.
- Millinger, Markus; Tafarte, Philip; Jordan, Matthias; Musonda, Frazer; Chan, Katrina; Meisel, Kathleen; Aliabadi, Danial Esmaeili (2022): A model for cost- and greenhouse gas optimal material and energy allocation of biomass and hydrogen. In: *SoftwareX* 20, S. 101264.
- Möller et al. (2020): Gewährleistung einer ausreichenden Humusreproduktion bei der Nutzung von Getreidestroh für die Biogasproduktion / Maintaining soil organic matter levels in arable farming with straw removal for bioenergy production (Akronym: SOMenergy). Hg. v. FNR. Justus-Liebig-Universität Giessen; Universität Kassel. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22402914.pdf>, zuletzt geprüft am 10.07.2023.
- Morland, Christian; Schier, Franziska (2020): Modelling Bioeconomy Scenario Pathways for the Forest Products Markets with Emerging Lignocellulosic Products. In: *Sustainability* 12 (24), S. 10540.

Oehmichen, Katja; Klatt, Susann; Gerber, Kristin; Polley, Heino; Röhling, Steffi; Dunger, Karsten (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse (Thünen Report, 59), zuletzt geprüft am 08.12.2021.

Osterburg, Bernhard; Ackermann, Andrea; Böhm, Jonas; Bösch, Matthias; Dauber, Jens; Witte, Thomas de et al. (2023): Flächennutzung und Flächennutzungsansprüche in Deutschland: Thünen Working Paper 224. Braunschweig, Eberswalde, Hamburg-Bergedorf: Thünen-Institut. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_224.pdf, zuletzt geprüft am 20.11.23.

Päivinen, Risto; Kallio, A. Maarit I.; Solberg, Birger; Käär, Liisa (2022): EU Forest reference levels: The compatible harvest volumes compiled and assessed in terms of forest sector market development. In: *Forest Policy and Economics* 140, S. 102748.

Panoutsou, Calliope; Maniatis, Kyriakos (2021): Sustainable biomass availability in the EU, to 2050. Hg. v. Imperial College London Consultants. Online verfügbar unter https://assets.website-files.com/6144857e3aac5ad07ebf212f/615c3b4e98e9c6cbe0a79cee_2021_ICCS_Imperial%20Collge_Panoutsou_Concawe_Sustainable-Biomass-Availability.pdf, zuletzt geprüft am 17.11.2021.

PAPIERINDUSTRIE e. V. (Hg.) (2022): Papier - Statistiken zum Leistungsbericht 2022. Online verfügbar unter www.papierindustrie.de, zuletzt geprüft am 12.07.2023.

Purr, Katja; Günther, Jens; Lehmann, Harry; Nuss, Philipp (2019): Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality. RESCUE. Summary report. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_eng.pdf.

Rock, Joachim; Dunger, Karsten; Marks, Alexander; Schmidt, Ursula; Seintsch, Björn (2016a): Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Hg. v. BMEL, zuletzt geprüft am 07.12.2021.

Rock, Joachim; Gerber, Kristin; Klatt, Susann; Oehmichen, Katja (2016b): Das WEHAM 2012 "Basisszenario": Mittellinie oder Leitplanke? The WEHAM 2012 "Baseline scenario": center line or guardrail? In: *forstarchiv* (87), S. 66–69.

Rosenkranz, Lydia; Selzer, Anne; Seintsch, Björn; Dunger, Karsten; Döring, Przemko; Gerber, Kristin et al. (2017): Verbundforschungsbericht WEHAM-Szenarien. Stakeholderbeteiligung bei der Entwicklung und Bewertung von Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien (Thünen Working Paper, 73). Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058802.pdf, zuletzt geprüft am 03.02.2022.

Schäfer, Dieter; Krack-Roberg, Elle; Hoffmann-Kroll, Regina (2002): Bodennutzung durch wirtschaftliche Aktivitäten. Ein Beitrag zur Ökoeffizienzdiskussion ; Endbericht ; Vertrag zwischen den Europäischen Gemeinschaften und dem Statistischen Bundesamt Sub 99/39643. Stuttgart: Metzler-Poeschel (Beiträge zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen, 11).

Schier, Franziska; Iost, Susanne; Weimar, Holger (2022): Auswirkungen auf die inländische Holzverwendung. In: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hg.): Konsequenzen der „EU-Biodiversitätsstrategie 2030“ für Wald und Forstwirtschaft in Deutschland: Abschlussbericht. München.

- Schier, Franziska; Weimar, Holger (2018): Holzmarktmodellierung. Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotssituationen für den Sektor Forst und Holz (Thünen Working Paper, 91), zuletzt geprüft am 03.02.2022.
- Schmidt, Thomas (2013): Außerlandwirtschaftliche Flächeninanspruchnahme - Monitoring, Trends und Prognosen. Entwurf eines Arbeitsberichtes für das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Thünen-Institut für Ländliche Räume, unveröffentlichtes Manuskript.
- Schröder, Jörg; Naumann, Karin (2023): Schröder, Jörg; Naumann, Karin (2023): Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr. DBFZ-Report Nr. 44. Hg. v. DBFZ. Online verfügbar unter https://www.dbfz.de/fileadmin//user_upload/Referenzen/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_44_DE.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2023.
- Searle, Stephanie Y.; Malins, Christopher J. (2016): Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. In: *Biomass and Bioenergy* 89, S. 2–10.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2021): Landwirtschaftliche Betriebe mit Zwischenfruchtanbau im Zeitvergleich. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/zwischenfruechte.html>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2021, zuletzt geprüft am 29.09.2023.
- Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (Hg.) (2021): Branchenausblick 2030+. Die Chemieindustrie. Online verfügbar unter https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/211025_ig_publicationen_Studie_Chemieindustrie_web.pdf, zuletzt geprüft am 25.10.2022.
- Szichta, Pia; Risse, Michael; Weber-Blaschke, Gabriele; Richter, Klaus (2022): Potentials for wood cascading. A model for the prediction of the recovery of timber in Germany. In: *Resources, Conservation and Recycling* 178, S. 106101.
- Thünen-Institut (Hg.) (2023a): Dritte Bundeswaldinventur 2012. Online verfügbar unter <https://bwi.info>, zuletzt geprüft am 12.07.2023.
- Thünen-Institut (Hg.) (2023b): Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (2012). 3.1.1 projizierter Vorrat (Erntefestmaß o.R.) des Rohholzpotenzials [1000 m³/a] nach Baumartengruppe und Projektionsperiode. Basisszenario, zuletzt geprüft am 21.04.2023.
- Tietz, A.; Bathke, M.; Osterburg, B. (2012): Art und Ausmaß der Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Flächen für außerlandwirtschaftliche Zwecke und Ausgleichsmaßnahmen. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Arbeitsberichte aus der vTI-Agrarökonomie). Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dn050574.pdf.
- TI-WF (2023): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Hg. v. Thünen-Institut für Waldwirtschaft. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/zahlen-fakten/holzeinschlag-und-rohholzverwendung>, zuletzt geprüft am 08.12.2022.
- Umweltbundesamt (Hg.) (2023): Erneuerbare Energien in Zahlen. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick>, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

Umweltbundesamt (UBA) / Federal Environment Agency (Hg.) (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau.

Umweltbundesamt (UBA) (Hg.) (2022): CRF-Tabellen 2022, MMR-Anhänge & weitere Materialien. Online verfügbar unter https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyis0nw/DEU_2022_2020_09032022_130721_started.xlsx/manage_document.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (Hg.) (2019): Wege in die Zukunft – Weichenstellung für eine nachhaltige Entwicklung in der chemisch-pharmazeutischen Industrie. Kurzfassung der Studie von VCI und Prognos. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-studie-vci-prognos-wege-in-die-zukunft-fuer-die-chem-pharm-industrie.pdf>, zuletzt geprüft am 08.11.2022.

Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI); Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (Hg.) (2023): Wie die Transformation der Chemie gelingen kann. Abschlussbericht 2023. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung-es.pdf>, zuletzt geprüft am 28.04.2023.

Verband Deutscher Papierfabriken e. V. (Hg.) (2021): PAPIER 2021 - Statistiken zum Leistungsbericht.

Vogler, C.; Wern, B.; Porzig, M.; Hauser, E.; Guss, H.; Baur, F. et al. (2020): Altholz -Quo vadis? Abschlussbericht. Hg. v. IZES gGmbH und STEAG New Energies GmbH.

Vos, Cora; Rösemann, Claus; Haenel, Hans-Dieter (2022): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 – 2020. Input data and emission results. Göttingen 2022.

Witing, Felix; Prays, Nadia; O'Keeffe, Sinéad; Gründling, Ralf; Gebel, Michael; Kurzer, Hans-Joachim et al. (2018): Biogas production and changes in soil carbon input - A regional analysis. In: *Geoderma* 320, S. 105–114.

Wolf, Tobias; Kubowitz, Petra; Untergutsch, Andrea; Wensing, Christoph; Mittelbach, Heidi; Pagenkopf, Feng-Lu (2020): Potenziale von Bauen mit Holz. Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA) / Federal Environment Agency. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 17.10.2022.

Anhang

I Status quo technisches Potenzial ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe

Tabelle 22: Status quo des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe sowie Gesamt von 2015-2020 in Mio. Tonnen Trockenmasse (t_{TM}) - Mittelwerte.

Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), eigene Darstellung.

| Technisches Potenzial - Mittelwerte (in Mio. t _{TM}) | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | Ø 2015-2020 | Veränderung 2015/2020 | Veränderung 2015/Ø2015-2020 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-----------------------------|
| Altpapier | 15,51 | 15,38 | 14,95 | 14,80 | 14,66 | 14,47 | 14,96 | -6,7% | -3,5% |
| Getreidestroh | 13,94 | 12,84 | 12,71 | 10,74 | 12,58 | 12,22 | 12,50 | -12,3% | -10,3% |
| Grüngut | 8,04 | 8,35 | 8,37 | 8,37 | 8,41 | 8,50 | 8,34 | 5,6% | 3,7% |
| Rindergülle | 8,73 | 8,68 | 8,68 | 8,54 | 8,40 | 8,24 | 8,54 | -5,6% | -2,2% |
| Reststoffe Ölmühlen | 7,25 | 7,26 | 7,25 | 6,95 | 6,92 | 6,79 | 7,07 | -6,4% | -2,5% |
| Rindermist | 7,09 | 6,89 | 6,70 | 6,43 | 6,19 | 5,91 | 6,54 | -16,7% | -7,9% |
| Biogener Anteil Abwässer | 2,83 | 2,85 | 2,85 | 2,79 | 2,81 | 2,82 | 2,82 | -0,5% | -0,2% |
| Biogut aus privaten Haushalten | 2,70 | 2,62 | 2,79 | 2,77 | 2,88 | 2,82 | 2,76 | 4,3% | 2,2% |
| Holz von Landschaftspflegeflächen | 2,07 | 2,07 | 2,07 | 2,08 | 2,08 | 2,08 | 2,07 | 0,5% | 0,2% |
| Schweinegülle | 1,06 | 1,05 | 1,06 | 1,02 | 1,00 | 1,00 | 1,03 | -5,7% | -2,5% |
| Hühnertrockenkot | 0,57 | 0,59 | 0,60 | 0,60 | 0,62 | 0,63 | 0,60 | 10,2% | 4,9% |
| Schweinemist | 0,27 | 0,25 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,18 | 0,22 | -34,3% | -17,2% |
| Rinderjauche | 0,25 | 0,24 | 0,23 | 0,22 | 0,21 | 0,20 | 0,23 | -17,6% | -8,4% |
| Hühnerflüssigmist | 0,13 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,09 | 0,08 | 0,11 | -35,4% | -11,7% |
| Schweinejauche | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | -33,0% | -16,6% |
| Summe oberhalb gelisteter Biomassen | 70,5 | 69,2 | 68,6 | 65,7 | 67,1 | 65,9 | 67,8 | -6,4% | -3,8% |
| Restliche Biomassen* der Datenbank (nur 2015, Fortschreibung) | 14,3 | 14,3 | 14,3 | 14,3 | 14,3 | 14,3 | 14,3 | | |
| Summe Gesamt* | 84,8 | 83,5 | 82,9 | 80 | 81,4 | 80,2 | 82,1 | -5,4% | -3,2% |

* ohne forstwirtschaftliche Nebenprodukte (Kapitel 2.2.1): Altholz, Rinde, Schwarzlaube, Sonstiges Industrierestholz, Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Waldrestholz (Laub/Nadel)

II Methodik für die Berechnungen von zukünftigen Potenzialen ausgewählter Biomassen (Top15) inklusive relevanter Nachhaltigkeitsaspekte

| Reststoffe, Abfälle und Nebenprodukte | Relevante Berechnungselemente & Umsetzung aus Bepaso für zukünftige Potenziale (bis 2050) | | Nachhaltigkeitsaspekte |
|--|--|--|---|
| Tierische Exkremente (zusammengefasst) | Güllebasierte-/Strohbasierter/Käfig-Haltung (Haltungsform) Weidezeit; Entwicklung Tierzahlen (Bepaso); | Bezugspunkt 2020; Bepaso Entwicklung cattle and sheep, raw milk, wool(CATT); pigs and poultry(oap) – geteilt nach GVE | Ökolandbau höherer Einstreufaktor; Rückgang der Tierzahlen; Mobilisierungsfaktoren für eine energetische Nutzung nach KIS bzw. politischer Zielsetzungen: Status Quo ~ 1/3 Nutzung, Ziel 2030/2050: 2/3 bzw. 70% |
| Getreidestroh | Strohflächenertrag bei zukünftiger Getreidefläche (Bepaso) | Bezugspunkt Strohertrag/ha 2015-2020; Bepaso Entwicklung Getreidefläche, wheat/whit; othergrains(gro); Weizen und Grobgetreide | Erhalt Humusbilanz: Entnahmerate Stroh im Mittel 45% (Berechnung/Produkt aus Humusbilanz (100%-48%) und technischer Bergungsrate (87%)); Ökolandbau höherer Einstreubedarf; Gärrestrückführung (Kaskade) bei Vergärung von Stroh zum Erhalt der Humusbilanz ermöglicht höhere Entnahmerate |
| Biogut von privaten Haushalten (Nahrungs- und Küchenabfälle) & Grüngut (Garten- und Parkabfälle) | Einwohnerentwicklung (Bepaso) | Bezugspunkt 2015-2020/Kopf, Bepaso Bevölkerungsentwicklung; Berücksichtigung Besonderheit Grüngut: nur teilweise von Bevölkerung abhängig, Rest Parkanlagen/Fläche etc. | Annahme: hoher Anschlussgrad (Biotonne) und Mobilisierung der statistisch nicht-erfassten Anteile |
| Altpapier | Einwohnerentwicklung (Bepaso) | Bezugspunkt 2015-2020/Kopf, Bepaso Bevölkerungsentwicklung | - |
| Reststoffe aus Ölmühen | Produktionsmenge Ölschrote in Deutschland (Bepaso) | crude vegetable oil (cvol)/oilcake | - |
| Biogener Anteil Abwässer aus verschiedenen Industriebereichen (7 Lebensmittel, Ethanol und Zellstoff/Papier) | Abhängig vom Aktivitätsniveau des Sektors (Bepaso) | cattle meat (cmt); other meat (omt); dairy (mil); sugar processing (sgr); other food and beverages (O_FO); paper products (ppp). 1st and 2nd generation bioethanol (biog); Gewichtung nach Rohschlammmenge je Sektor | - |
| Holz von Landschaftspflegeflächen (Heidefläche, Moorfläche, Pflegeflächen Fließgewässer, Streuobstflächen; Feldgehölze, Wallhecken, Knicks, Einzelbäume, Waldsäume, Baumgruppen in der offenen Landschaft) | Flächenentwicklungen Bepaso Bergungsrate 30-80% | Bepaso gibt keine Angaben zu den Flächenentwicklungen der relevanten Flächen aus, daher Annahme Fortschreibung | Abhängig von Modellierung Bepaso/Thünen: Umsetzung EU Biodiv.-Strat. (Flächenschutz) wurde dort nicht berücksichtigt; REDII Revisionsvorschlag Parlament: Ausschluss Heideflächen, jedoch Ausschluss von Heide-/Moorflächen (Pflegeholz) durch Klausel aufgehoben: „wenn nicht dem Biodiv.-Schutz widerläufig“ (in Abstimmung mit Ifeu/Öko-Inst.) |

Abbildung 68: Methodik für die Berechnungen von zukünftigen Potenzialen ausgewählter Biomassen (Top 15) inklusive relevanter Nachhaltigkeitsaspekte.

Quelle: DBFZ-2023, eigene Darstellung.

III Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial

Tabelle 23: Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial BEPASO-„(R)evolution/ Wende“.
Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), UFZ (2023).

| Biomassekategorien | Energetische Nutzung 2020 | | Energetische Nutzung 2030 | | Energetische Nutzung 2040 | | Energetische Nutzung 2050 | |
|---|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM |
| Getreidestroh | 74.971 | - | 7.545.692 | | 7.569.704 | | 7.735.891 | |
| tierische Exkremete | 5.568.367 | - | 10.241.246 | | 8.237.040 | | 7.205.179 | |
| Grüngut | 1.761.930 | - | 3.824.183 | | 3.824.183 | | 3.803.937 | |
| Biogut aus privaten Haushalten | 2.243.344 | - | 2.161.777 | | 2.161.777 | | 2.151.767 | |
| Gärreste | - | - | - | | - | | - | |
| Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen | 575.839 | - | 575.839 | | 575.839 | | 575.839 | |
| Laub | 19.277 | - | 222.944 | | 222.944 | | 222.944 | |
| Reststoffe aus der Fleischverarbeitung | 453.182 | - | 456.965 | | 456.965 | | 456.965 | |
| Speiseöle und -fette aus privaten Haushalten | 66 | 1.072.000 | 327.341 | | 327.341 | | 327.341 | |
| Sonstige vergärbare Reststoffe | 2.334.168 | - | 15.220.698 | | 14.623.467 | | 14.259.095 | |
| Altpapier | 1.637.340 | - | - | | - | | - | |
| Altholz | 6.230.769 | - | 5.463.856 | Ausphasen bis 2035 | 4.696.943 | Ausphasen bis 2035 | 3.930.029 | Ausphasen bis 2035 |
| Sägenebenprodukte und Hobelspäne | 3.057.429 | - | 2.443.616 | | 1.770.404 | | 1.012.575 | |
| Ablauge/ Schwarzlauge | 1.063.802 | - | 825.443 | | 872.811 | | 1.249.834 | |
| Sonstiges Industrierestholz | 2.501.901 | - | 2.127.966 | | 1.754.032 | | 1.380.097 | |
| Sonstiges Holz | 2.206.134 | - | 3.031.563 | | 3.031.563 | | 3.031.563 | |
| Gewerbe Nicht-Derbholz/ Derbholz/Waldrestholz | 2.870.751 | 1.000 | 2.044.525 | | 1.489.977 | | 1.049.790 | |
| Palmölabwässer | - | 90.000 | | | | | | |
| Palmfettsäuredestillate | - | 41.000 | | | | | | |
| Algen | - | - | - | | - | | - | |
| Paludikulturen | - | - | - | | - | | - | |
| Privat Derbholz/Scheitholz | 8.723.178 | - | 6.212.575 | 4.527.504 | 3.189.932 | | | |
| Palmöl | - | 1.970.000 | | | | | | |
| Sojaöl | - | 60.000 | | | | | | |
| Zuckerrohr | - | 387.000 | | | | | | |
| Zuckerrübe | 179.000 | 17.000 | | | | | | |
| Raps/Ölsaaten | 848.000 | 1.272.000 | BenOpt Modell-ergebnis | BenOpt Modell-ergebnis | BenOpt Modell-ergebnis | | | |
| Maissilage | 167.000 | - | | | | | | |
| Körnermais/ Gerste/ Roggen/ Mais | 34.000 | 5.393.000 | | | | | | |
| Weizen | 24.000 | 698.000 | | | | | | |
| Pappel | | | | | | | | |
| Miscanthus/ sonstige Ackerkulturen/ Ackerfutter | | | | | | | | |

Tabelle 24: Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial Langfristszenarien (IFEU, z. T. basierend auf DBFZ-Daten).
Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), UFZ (2023).

| Biomassekategorien | Energetische Nutzung 2020 | | Energetische Nutzung 2030 | | Energetische Nutzung 2040 | | Energetische Nutzung 2050 | |
|---|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|
| | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM |
| Getreidestroh | 74.971 | - | 11.431.468 | | 11.431.468 | | 10.803.573 | |
| tierische Exkremete | 5.568.367 | - | 12.567.181 | | 9.373.686 | | 7.776.939 | |
| Grüngut | 1.761.930 | - | 3.642.366 | | 4.513.366 | | 4.942.366 | |
| Biogut aus privaten Haushalten | 2.243.344 | - | 2.185.539 | | 2.185.539 | | 2.185.539 | |
| Gärreste | - | - | - | | - | | - | |
| Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen | 575.839 | - | 575.839 | | 575.839 | | 575.839 | |
| Laub | 19.277 | - | 222.944 | | 222.944 | | 222.944 | |
| Reststoffe aus der Fleischverarbeitung | 453.182 | - | 456.965 | | 456.965 | | 456.965 | |
| Speiseöle und -fette aus privaten Haushalten | 66 | 1.072.000 | 327.341 | | 327.341 | | 327.341 | |
| Sonstige vergärbare Reststoffe | 2.334.168 | - | 14.009.718 | | 14.009.718 | | 14.009.718 | |
| Altpapier | 1.637.340 | - | 1.335.007 | Ausphasen bis 2035 | 1.335.007 | Ausphasen bis 2035 | 1.335.007 | Ausphasen bis 2035 |
| Altholz | 5.836.000 | - | 4.365.177 | | 3.278.432 | | 2.731.092 | |
| Sägenebenprodukte und Hobelspäne | 3.344.925 | - | 2.405.827 | | 1.806.878 | | 1.505.216 | |
| Ablauge/ Schwarzlauge | - | - | 1.364.411 | | 1.024.731 | | 853.650 | |
| Sonstiges Industrierestholz | 1.114.840 | - | 1.792.762 | | 1.346.440 | | 1.121.650 | |
| Sonstiges Holz | 2.206.134 | - | 1.459.097 | | 2.159.633 | | 2.502.779 | |
| Gewerbe Nicht-Derbholz/ Derbholz/Waldrestholz | 2.870.751 | 1.000 | - | | - | | - | |
| Palmölabwässer | - | 90.000 | | | | | | |
| Palmfettsäuredestillate | - | 41.000 | | | | | | |
| Algen | - | - | - | | - | | - | |
| Paludikulturen | - | - | - | - | - | | | |
| Privat Derbholz/Scheitholz | 10.387.163 | - | 7.631.382 | 3.040.000 | 3.040.000 | | | |
| Palmöl | - | 1.970.000 | | 4.875.600 | 4.875.600 | | | |
| Sojaöl | - | 60.000 | | | | | | |
| Zuckerrohr | - | 387.000 | | | | | | |
| Zuckerrübe | 179.000 | 17.000 | | | | | | |
| Raps | 848.000 | 1.272.000 | BenOpt Modell-ergebnis | BenOpt Modell-ergebnis | BenOpt Modell-ergebnis | | | |
| Maissilage | 167.000 | - | | | | | | |
| Körnermais | 34.000 | 5.393.000 | | | | | | |
| Weizen | 24.000 | 698.000 | | | | | | |
| Pappel | | | | | | | | |
| Miscanthus | | | | | | | | |

Tabelle 25: Datenbasis energetisch nutzbares Biomassepotenzial KIS-2030 (Öko-Institut, z. T. basierend auf DBFZ-Daten).
Quelle: DBFZ-Ressourcendatenbank (Stand 07/23), UFZ (2023).

| Biomassekategorien | Energetische Nutzung 2020 | | Energetische Nutzung 2030 | | Energetische Nutzung 2040 | | Energetische Nutzung 2050 | |
|--|---------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM | tTM | Importe tTM |
| Getreidestroh | 74.971 | - | 7.492.836 | | 5.979.012 | | 5.979.012 | |
| tierische Exkremente | 5.568.367 | - | 11.570.198 | | 11.151.438 | | 11.151.438 | |
| Grüngut | 1.761.930 | - | 2.498.926 | | 3.349.811 | | 3.778.811 | |
| Biogut aus privaten Haushalten | 2.243.344 | - | 2.219.284 | | 2.209.339 | | 2.209.339 | |
| Gärreste | - | - | - | | - | | - | |
| Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen | 575.839 | - | 575.839 | | 575.839 | | 575.839 | |
| Laub | 19.277 | - | 222.944 | | 222.944 | | 222.944 | |
| Reststoffe aus der Fleischverarbeitung | 453.182 | - | 456.965 | | 456.965 | | 456.965 | |
| Speiseöle und -fette aus privaten Haushalten | 66 | 1.072.000 | 327.341 | | 327.341 | | 327.341 | |
| Sonstige vergärbare Reststoffe | 2.334.168 | - | 14.009.718 | | 14.009.718 | | 14.009.718 | |
| Altpapier | 1.637.340 | - | 1.520.907 | | 1.467.043 | | 1.467.043 | |
| Altholz | 5.836.000 | - | 4.365.177 | | 3.278.432 | | 2.731.092 | |
| Sägenebenprodukte und Hobelspäne | 3.344.925 | - | 2.405.827 | | 1.806.878 | | 1.505.216 | |
| Ablauge/ Schwarzlaug | - | - | 1.364.411 | | 1.024.731 | | 853.650 | |
| Sonstiges Industrierestholz | 1.114.840 | - | 1.792.762 | | 1.346.440 | | 1.121.650 | |
| Sonstiges Holz | 2.206.134 | - | 1.459.097 | | 2.159.633 | | 2.502.779 | |
| Gewerbe Nicht-Derbholz/Derbholz/Waldrestholz | 2.870.751 | 1.000 | - | | - | | - | |
| Palmölabwässer | - | 90.000 | | | | | | |
| Palmfettsäuredestillate | - | 41.000 | | | | | | |
| Algen | - | - | - | | - | | - | |
| Paludikulturen | - | - | 750.000 | | 3.470.000 | | 3.470.000 | |
| Privat Derbholz/Scheitholz | 10.387.163 | - | 8.015.000 | | 8.015.000 | | 8.015.000 | |
| Palmöl | - | 1.970.000 | | | | | | |
| Sojaöl | - | 60.000 | | | | | | |
| Zuckerrohr | - | 387.000 | | | | | | |
| Zuckerrübe | 179.000 | 17.000 | | | | | | |
| Raps | 848.000 | 1.272.000 | | | | | | |
| Maissilage | 167.000 | - | | | | | | |
| Körnermais | 34.000 | 5.393.000 | | | | | | |
| Weizen | 24.000 | 698.000 | | | | | | |
| Pappel | | | | | | | | |
| Miscanthus | | | | | | | | |
| | | | BenOpt Modell-ergebnis | | BenOpt Modell-ergebnis | | BenOpt Modell-ergebnis | |
| | | | | Ausphasen bis 2030 | | Ausphasen bis 2030 | | Ausphasen bis 2030 |