



Oktober 2021

Energieperspektiven 2050+

Exkurs Biomasse

Potenziäle und Einsatz in den Szenarien



Quelle: © iStock-IGphotography

Datum: 13.10.2021

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Prognos AG
INFRAS AG
TEP Energy GmbH
Ecoplan AG

Autoren/-innen:

Prognos AG

Thorsten Spillmann
Andreas Kemmler (Projektleitung)
Sven Kreidelmeyer (Projektleitung)
Samuel Straßburg (ehemals Prognos)

INFRAS AG

Hans-Jörg Althaus
Alex Wunderlich

BFE-Bereichsleitung: Michael Kost, Bundesamt für Energie BFE, michael.kost@bfe.admin.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhalt

Ansprechpartner	II
Inhalt	III
1 Einleitung	1
2 Anforderungen an Biomasse	2
2.1 Abgrenzung und Definition von Biomasse	2
2.2 Aktuelle rechtliche Situation in der Schweiz	3
3 Potenziale von Biomasse	5
3.1 Globales Biomasse-Produktionspotenzial	6
3.2 Inländisches Potenzial	8
3.3 Importe von Biomasse	13
3.4 Gesamtpotenzial	15
4 Technologien zur Biomasse-Umwandlung	17
5 Aktuelle Verwendung von Biomasse in der Schweiz	23
6 Einsatz von Biomasse in den Szenarien	25
6.1 Szenario Weiter wie bisher	25
6.2 Klimazielszenarien – Szenario ZERO	28
6.2.1 ZERO Basis	28
6.2.2 Variante ZERO A	31
6.2.3 Variante ZERO B	34
6.2.4 Variante ZERO C	36
7 Zusammenfassung und Fazit	40
Literaturverzeichnis	IV

1 Einleitung

Der Begriff Biomasse bezeichnet grundsätzlich die Stoffmasse von Lebewesen. Die energetische Verwendung von rezenter¹ Biomasse wird bilanziell als nahezu treibhausgasneutral angesehen, da der in Biomasse gespeicherte Kohlenstoff während der Wachstumsphase der Pflanze oder des Tieres in jüngerer Vergangenheit als CO₂ der Atmosphäre entzogen wurde. Die Biomasse fungiert als eine Art Pufferspeicher: Während der Wachstumsphase nehmen die Pflanzen (und anderen Lebewesen) CO₂ aus der Luft auf und binden dieses in Form von Biomasse. Bei der Verbrennung oder dem natürlichen Verfall wird dieses CO₂ wieder frei und an die Atmosphäre zurückgegeben.

Biomasse aus nachhaltiger Waldnutzung und solche, die aus Abfall- oder Reststoffen gewonnen wurde, kann als erneuerbarer und CO₂-armer Energieträger einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der energie- und klimapolitischen Ziele der Schweiz leisten. Biomasse kann als fester, flüssiger und gasförmiger Energieträger genutzt werden. Dabei sind vielfältige Einsatzmöglichkeiten zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie als Treibstoff möglich. Zudem existieren eine Reihe von Technologien zur Abscheidung von CO₂ und langfristigen Speicherung von Kohlenstoff. Dadurch könnte die Nutzung von Biomasse in Kombination mit CCS² eine zentrale Rolle bei der Erzeugung von negativen Emissionen spielen. Gleichzeitig sind jedoch auch Grenzen der nachhaltigen Nutzung in der Schweiz und der Nutzung von Biomasse-Importen zu berücksichtigen.

Für die zukünftige Verwendung von Biomasse stellen sich mehrere Fragen:

- Wie hoch sind die (nachhaltigen) Potenziale an Biomasse für den Schweizer Markt im Inland und im Ausland und woher kommen sie? Dabei sind Nutzungskonkurrenzen mit nicht energetischen Anwendungen (Nahrungsmittel und stoffliche Nutzung, die der energetischen Nutzung vorzuziehen sind) und insbesondere auch für die Importpotenziale Nutzungskonkurrenzen mit anderen Ländern zu berücksichtigen.
- Für den energetischen Einsatz von Biomasse stellt sich die Frage, welche Allokation innerhalb des Energiesystems zielführend ist. Dabei sind Fragen der Kosten der Aufbereitung, möglicher Alternativen in den jeweiligen Sektoren und Anwendungen sowie der Energieeffizienz der Nutzung (z.B. in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen) besonders relevante Kriterien für den Einsatz von Biomasse.
- Für die Verwendung von gewissen Biomassen steht die (direkte) energetische Nutzung in Konkurrenz der nicht energetischen stofflichen Verwendung. Eine besondere Rolle für einen ressourcenschonenden Einsatz insbesondere bei der hölzernen Biomasse nimmt der Begriff der kaskadischen Nutzung ein, wo eine energetische Verwendung erst dann stattfindet, wenn eine stoffliche (Weiter-)Verwendung nicht möglich ist.

Im Folgenden wird die Verwendung von Biomasse in den Szenarien der Energieperspektiven 2050+ beschrieben. Der vorliegende Bericht stellt somit eine Ergänzung dar zu den Ausführungen zu den Szenarienergebnissen im Kurzbericht zu den Energieperspektiven 2050+ (Prognos AG

¹ Gemäss der allgemeinen Definition könnten auch fossile Rohstoffe und Torf als «Biomasse» gelten, da sie vor langer Zeit aus Lebewesen gebildet wurden. Die Beschränkung auf «rezente Biomasse» bedeutet konkret, dass Torf und ältere fossile Produkte der Verrottung von Biomasse nicht mehr unter den Begriff der Biomasse fallen. Dem entgegen wird Torf in einigen Ländern Europas (u.a. Schweden, Finnland und Länder Osteuropas) durchaus der Biomasse zugerechnet.

² CCS: Carbon Capture and Storage

et al., 2020). Der Fokus liegt hierbei auf den Varianten des Szenario ZERO, da besonders bei einem umfassenden Einsatz von Biomasse Potenzialgrenzen erreicht werden können und die Nutzungskonkurrenzen zwischen den Anwendungen, Sektoren und Ländern zunehmen.

2 Anforderungen an Biomasse

2.1 Abgrenzung und Definition von Biomasse

Biomasse im biologischen Sinn bezeichnet die gesamte durch Lebewesen anfallende organische Substanz. Im Kontext der EP2050+ wird der Begriff aber auf die energetisch nutzbare rezente Biomasse beschränkt, also vor allem auf Erzeugnisse, Abfälle und Reststoffe der Land- und Forstwirtschaft mit biologischem Ursprung (einschließlich tierischer und pflanzlicher Stoffe). Dabei ist eine Zuordnung nach Quellen nicht immer eindeutig, da der Energieträger Biomasse oft als Nebenprodukt oder Abfall aus der Nutzung als Nahrungs- und Futtermittel oder der stofflichen Nutzung von Biomasse anfällt.

Biomasse als Energieträger

Die Ressource Biomasse kann in verholzte und nicht-verholzte Biomasse unterteilt werden. In der Schweiz werden naturbelassenes Wald- und Flurholz, Restholz aus Holzverarbeitungsbetrieben und Altholz (verholzte Biomasse) sowie Klärschlamm, Hofdünger, Grüngut, organische Anteile im Kehricht, Abfällen und Produktionsrückständen aus der Industrie und Landwirtschaft (nicht-verholzte Biomasse) genutzt. Die zur energetischen Nutzung relevanten Biomassequellen in der Schweiz sind einheimisches Holz, Abfälle und Reststoffe aus Landwirtschaft, Industrie, Gewerbe und Haushalten sowie Klärschlamm (Oliver Thees et al., 2017). Im Ausland wird auch Biomasse aus Energiepflanzen (auch als «energy crops» bekannt) und Holz aus Kurzumtriebsplantagen genutzt.

Nachhaltige Nutzung von Biomasse

In der Schweiz gelten die aktuellen Biomassequellen für die energetische Nutzung in der Regel als nachhaltig, da nur organische Abfälle oder Produktionsrückstände und Holz genutzt werden. Global gesehen wird jedoch auch Biomasse aus ausschliesslich oder überwiegend auf die Produktion von Energiepflanzen ausgerichteter Landwirtschaft und Holz aus Kurzumtriebsplantagen genutzt. Die Nutzung von Energiepflanzen, meist in der Form von biogenen Treibstoffen erster Generation und von Plantagenholz führt zu Konflikten in der Landnutzung, der Nahrungsmittelproduktion und zu negativen Effekten wie der Brandrodung von Urwäldern. Solche Nutzungsformen können dazu führen, dass gesamtheitlich betrachtet durch Produktion und Nutzung von Bioenergie gegenüber erdölbasierten Energieträgern nur eine geringe bzw. keine Treibhausgasreduktion und meist auch eine höhere Umweltbelastung resultieren (Zah et al., 2007). Über die Nutzung von Biomasse in Kaskaden oder nach dem Prinzip «Teller-Trog-Tank» wie in der noch immer gültigen Biomassestrategie des Bundes (BFE, 2009) festgehalten können die negativen Umwelteffekte verringert werden. Mehrere Bedürfnisse werden dabei über den gleichen Landflächeneinsatz gedeckt. Nahrungs- und Futtermittel sollten demnach zunächst als solche eingesetzt werden und erst die entstehenden Abfälle und Nebenprodukte zur Energiegewinnung. Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern kann sowohl direkt energetisch genutzt werden - als Koppelprodukt und bei niedrigen Holzqualitäten -wie auch sekundär, z.B. nach der Verwendung als Baustoff.

Konventionelle und moderne Biotreib- und Biobrennstoffe

Biotreib- und Biobrennstoffe (oder biogene Treib- und Brennstoffe) im klassischen oder konventionellen Sinn, sind vor allem Ethanol aus Zucker- und Stärkepflanzen (z.B. Zuckerrohr, Zuckerrüben, Weizen, Mais oder Kartoffeln) und Biodiesel aus Ölpflanzen (z.B. Ölpalme, Soja oder Raps). Biogas aus Abfällen, Gülle oder Klärschlamm wird aufgrund der Rohstoffquelle den «modernen biogenen Treib- und Brennstoffen» zugeordnet. Der globale Markt für flüssige biogene Treibstoffe wird heute noch von konventionellen biogenen Treibstoffen dominiert. Die sogenannten modernen Biotreib- und Biobrennstoffe (auch als «advanced biofuels» bekannt oder zweiten und dritten Generation) basieren auf Abfällen, Nebenprodukten/Produktionsrückständen oder Algen und stehen so nicht in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. In der Schweiz werden hingegen praktisch nur abfallbasierte biogene Treibstoffe vermarktet, da diese aktuell von der Mineralölsteuer befreit sind und zudem die Emissionsverminderung bei deren Einsatz als handelbare Kompensationsbescheinigungen anerkannt wird.

Potenzialbegriffe

Das Biomassepotenzial wird je nach Quelle in Tonnen oder Kubikmeter Frisch- und Trockensubstanz, als Primärenergiewert oder als Biomethanertrag angegeben. Je nach Quelle müssen für die Bestimmung des Energieinhalts daher Verunreinigungen oder Feuchtigkeitsanteile zunächst bestimmt und in der Umrechnung zu Primärenergiewerten berücksichtigt werden. Das Biomassepotenzial, als Primärenergiewert, beziffert dann den maximalen Energieinhalt einer Biomassequelle, das energetisch nutzbare Potenzial. Die Menge an Endenergie, die aus dem energetisch nutzbaren Potenzial bereitgestellt werden kann, ist von der Biomassequelle abhängig und davon, wozu der Energieträger eingesetzt wird. Die allfälligen Weiterverarbeitungs- oder Umwandlungsschritte und die verwendete Technologie gehen mit Umwandlungs- und Wirkungsgradverlusten einher. Eine weitere Unterscheidung der Potenzialbegriffe «theoretisches, technisches, wirtschaftliches und nachhaltiges Potenzial» wird in Abschnitt 3 beschrieben.

2.2 Aktuelle rechtliche Situation in der Schweiz

Grundsätzlich darf heute jeder biogene Treibstoff in der Schweiz in Verkehr gebracht werden. Die heutige Gesetzgebung fördert aber seit 2008 gewisse biogene Treibstoffe durch eine zeitlich begrenzte Mineralölsteuererleichterungen. Dies gilt für in der Schweiz produzierte wie auch für importierte biogene Treibstoffe und ist an ökologische und soziale Anforderungen gebunden. Die Steuererleichterung wird im Mineralölsteuergesetz Artikel 12b-e geregelt (MinöStG, SR 641.61, vom 21. Juni 1996). Zertifikate auf Basis einer Massenbilanz, wie sie die EU kennt, reichen zur Steuererleichterung nicht aus. Zudem muss sichergestellt sein, dass die biogenen Treibstoffe segregiert in die Schweiz importiert werden. Bei Biogas bedeutet das de facto, dass es nicht über eine Pipeline importiert werden darf. Dafür wird, im Gegensatz zu flüssigen biogenen Treibstoffen, der Biogasanteil im Treibstoff (aktuell mind. 20%) bei den CO₂-Emissionsvorschriften für Personwagen und leichten Nutzfahrzeugen mit 0 g CO₂ angerechnet.

Seit 2013 können zudem Bescheinigungen für die Emissionsverminderungen durch biogene Treibstoffe erstellt werden. Diese können wiederum zur Erfüllung der Kompensationspflicht gemäss Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen Artikel 7 und 26 (CO₂-Gesetz, SR 641.71) eingesetzt werden. Der Branchenverband Biofuels Schweiz betreibt dafür seit 2014 ein entsprechendes Kompensationsprogramm durch mineralölsteuerbefreite Biotreibstoffe bei der Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation (KliK).

Biogene Brennstoffe dagegen fallen weder unter das Mineralölsteuergesetz (MinöStG, Art. 2) noch unter die CO₂-Abgabe gemäss CO₂-Gesetz (Art. 30). Dementsprechend werden auch keine ökologischen oder sozialen Anforderungen an biogene Brennstoffe gesetzt. Allerdings kann der Bundesrat nach Artikel 35 d Umweltschutzgesetz eine Zulassungspflicht vorsehen, wenn in erheblichem Mass biogene Treib- und Brennstoffe oder Gemische, die biogene Treib- und Brennstoffe enthalten, in Verkehr gebracht werden, welche die Anforderungen nach Artikel 12b Absätze 1 und 3 des Mineralölsteuergesetzes vom 21. Juni 1996⁷⁹ nicht erfüllen. (USG, SR 814.01)

Die Nutzung von einheimischem und importiertem Energieholz (u. a. Pellets) für Wärmeenergie wird heute gefördert. Über das Gebäudeprogramm fördern der Bund und die Kantone Holzfeuerungen in Gebäuden sowie Wärmenetze und Wärmeerzeugungsanlagen finanziell (CO₂-Gesetz, Art. 34). Zudem können biogene Wärmenetze auch als Kompensationsprojekte angemeldet werden. Damit können zusätzliche Emissionsreduktionen bescheinigt und an kompensationspflichtige Importeure fossiler Treibstoffe veräussert werden (gemäss CO₂-Gesetz, Art. 7 und Art. 26). Seit Sommer 2020 läuft die neue nationale Klimaprämie für den Ersatz von Öl- und Gasheizungen mit Holzheizungen. Insbesondere grosse Heizungen profitieren von der Förderung von KliK, der Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation. Auch Biomasseanlagen zur Stromproduktion (Kehrichtverwertungs- und Klärgasanlagen sowie Holzheizkraftwerke von regionaler Bedeutung) werden vom Bund über Investitionsbeiträge gefördert (Energiegesetz vom 30. September 2016, EnG, SR 730.0, Art. 24c). Auch beziehen rund 320 Biomasseanlagen die kostenorientierte Einspeisevergütung (KEV). Neuanlagen können jedoch seit 2019 nicht mehr aufgenommen werden und Anlagen können nicht von beiden Fördermechanismen profitieren.

Diverse Regelungen hinsichtlich der Nutzung von Biomasse, insbesondere auch der Nutzung von Biomasseabfällen und welche Reststoffe verbrannt oder nicht verbrannt werden dürfen, finden sich im Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG, SR 814.01) und in darauf basierenden Verordnungen, zum Beispiel in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) oder der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA).

Auf politischer Ebene existiert ausserdem die Biomassestrategie Schweiz (vom 23. März 2009). Sie setzt die wichtigsten strategischen Ziele für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz. Basierend auf der Biomassestrategie wurde die Strategie für die energetische Nutzung von Biomasse in der Schweiz (vom 28. September 2010) erstellt. Sie umfasst Ziele wie z.B. den Erhalt der Fruchtfolgeflächen oder die Vermeidung von Verdrängungseffekten zu Lasten der Biodiversität für den Zeitraum bis 2035. Zu Wald und Holz gibt es die Waldpolitik und die Ressourcenpolitik Holz 2030.

3 Potenziale von Biomasse

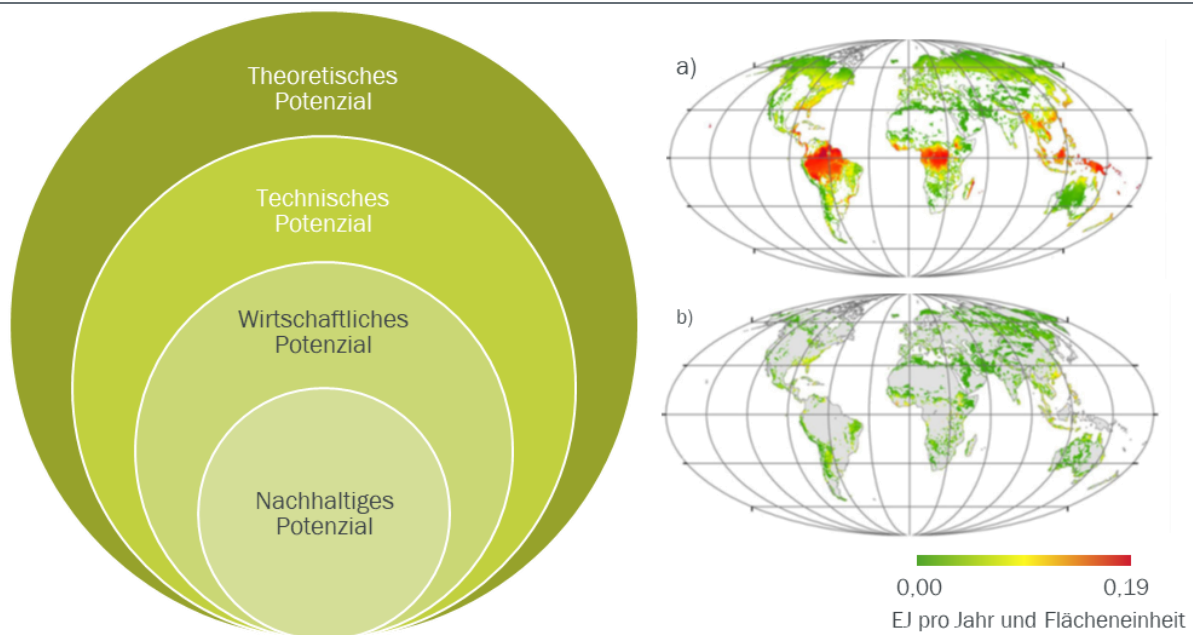
Der Begriff des energetischen Biomassepotenzials beschreibt die Menge zur Verfügung stehender Biomasse zur energetischen Nutzung. Der Begriff bezieht sich in der Regel auf unverarbeitete Rohbiomasse. Bei der Quantifizierung des Biomassepotenzials werden verschiedene Abgrenzungen unterschieden, die in Abbildung 1 dargestellt sind.

Das theoretische Potenzial stellt die Gesamtmenge verwertbaren biogenen Materials dar, welches innerhalb der betrachteten Systemgrenzen zur Verfügung stehen. Das technische Potenzial stellt die Teilmenge davon dar, welche tatsächlich erschliessbar ist, unabhängig von wirtschaftlichen und ökologischen Restriktionen. Das wirtschaftliche und schliesslich das nachhaltige Potenzial stellen jeweils weitere Teilmengen dar, welche diese weiter einschränkenden Kriterien erfüllen.

Biomassepotenziale werden üblicherweise in Masseinheiten Tonnen Frisch- oder Trockensubstrat oder als primärenergetisches Potenzial in Joule angegeben. Dieses Potenzial entspricht nicht ohne Weiteres der letztlich zum energetischen Endverbrauch nutzbaren Energiemenge: So müssen bei Rohstoffen, die zu sekundären Energieträgern wie Biogas oder Biotreibstoffen weiterverarbeitet werden die Umwandlungsverluste und nichtvergärbaren Bestandteile der Rohbiomasse berücksichtigt werden.

Abbildung 1: Unterschiedliche Abgrenzungen des Potenzialbegriffs für Biomasse

Schaubild der Potenzialbegriffe (links), sowie beispielhafte regionalisierte Abschätzung für das a) theoretische und b) technische globale Biomassepotenzial in Exajoule (EJ) pro Jahr



Quelle: (Schueler et al., 2013)

Im Folgenden wird näher auf die Potenzialannahmen eingegangen, welche den Szenariorechnungen für die Schweizer Energieperspektiven 2050+ unterstehen.

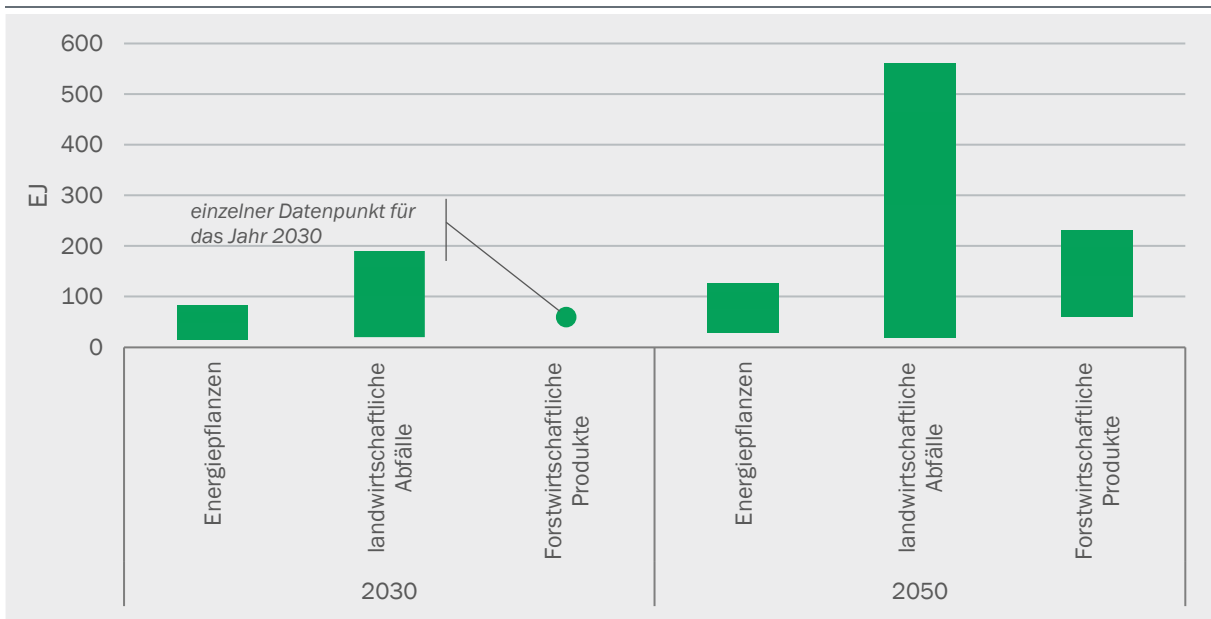
3.1 Globales Biomasse-Produktionspotenzial

Die Quantifizierung des globalen Gesamtpotenzials ist eine komplexe Aufgabe. Eine Vielzahl von Studien befassen sich mit dem Thema und kommen auf zum Teil sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die meisten biogenen Stoffe werden auf internationalen Märkten gehandelt. Als Folge davon erfordert eine Abschätzung des national verfügbaren Biomassepotenzials auch eine Betrachtung des globalen Bereitstellungspotenzials. Eine wichtige Ausnahme stellen die biogenen Abfälle dar, die im Wesentlichen lokal anfallen und nur in sehr geringem Ausmass grenznah gehandelt werden.

Grundsätzlich kann konstatiert werden, dass das Biomasseproduktionspotenzial der Erde durch den Menschen bereits heute im Wesentlichen ausgenutzt ist: 75 % der Landflächen werden vom Menschen bewirtschaftet, bei den übrigen 25 % handelt es sich um unwirtliche Flächen (Wüsten, Gebirge, etc.) oder die letzten unberührten Urwälder (Klepper and Thrän, 2019). Signifikante Unterschiede bestehen in der Bewertung der Produktionspotenziale von Flächen und deren Steigerungspotenzialen durch verbesserte landwirtschaftliche Praktiken und Düngung. Konservativere Studien gehen davon aus, dass eine weitere signifikante Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge nicht ohne weiteres möglich ist, so dass eine verstärkte energetische Nutzung der Biomasse nur durch ein Umschichten der Nutzungsarten erfolgen kann.

In einem Projektionsbericht der International Renewable Energy Agency zu Angebot und Nachfrage von Biomasse für die energetische Nutzung (IRENA, 2014) werden die Ergebnisse aus 15 Studien verglichen, die das globale primärenergetische Biomassepotenzial für die Kategorien Energiepflanzen, landwirtschaftliche Abfälle und forstwirtschaftliche Produkte angeben. Die Bandbreiten der Potenzialangaben für die Stichjahre 2030 und 2050 ist in Abbildung 2 wiedergegeben. Für das Jahr 2030 schwanken die Werte der Energiepflanzen zwischen 10 und 90 EJ (bis 130 EJ für das Jahr 2050). Noch grösser ist die Varianz bei der Quantifizierung der landwirtschaftlichen Abfälle: Die publizierten Werte für das Jahr 2030 liegen zwischen 20 und 190 EJ (bis 560 EJ für das Jahr 2050). Für das energetische Biomassepotenzial aus forstwirtschaftlichen Produkten ist für das Jahr 2030 nur ein Literaturwert um 60 EJ gegeben (im Jahr 2050 beträgt die Obergrenze für das Potenzial rund 230 EJ). Insgesamt zeigt diese Gegenüberstellung die hohe Unsicherheit auf, welche mit der langfristigen Abschätzung von Biomassepotenzialen zur energetischen Nutzung einhergeht.

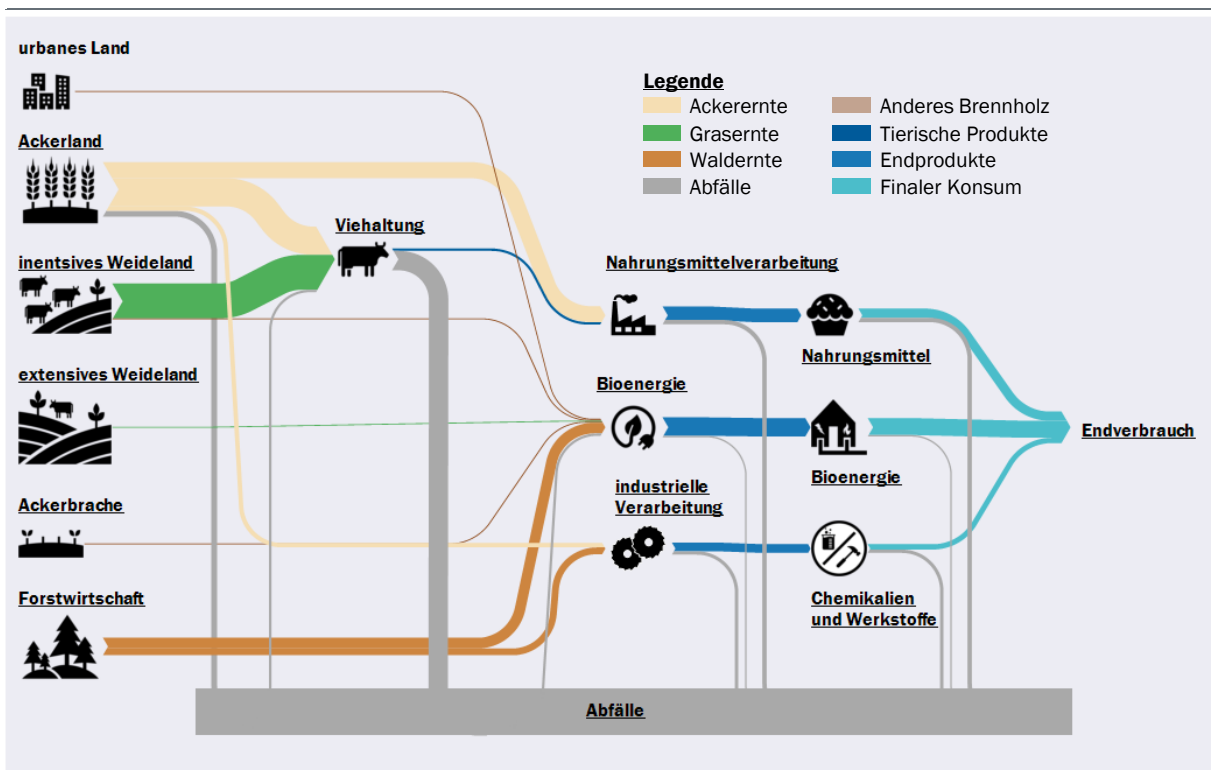
Abbildung 2: Bandbreite der Literaturwerte für das nachhaltige globale Biomassepotenzial



Bandbreite von Potenzialabschätzungen aus 15 publizierten Studien aus den Jahren 2001 bis 2014

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Irena (2014)

Abbildung 3: globale Nutzung der geernteten Biomasse im Jahr 2000 in Exajoule



Quelle: Darstellung nach (Klepper and Thrän, 2019)

Die globale Verwendung von Biomassen ist bereits heute vielseitig, wie in Abbildung 3 verdeutlicht wird. Hier werden die globalen Güterflüsse biogener Stoffe anhand ihres Primärenergiegehalts in Exajoule (EJ) für das Jahr 2000 dargestellt. Der grösste Teil der Rohbiomasse bezogen auf den Energiegehalt wird heute auf Acker- und intensivem Weideland produziert und der Viehhaltung zugeführt. Ein deutlich geringerer Teil der Erträge von Ackerböden wird unmittelbar der Nahrungsmittelverarbeitung zugeführt. Forstwirtschaftsflächen machen die drittgrösste Quelle biogener Rohstoffe aus. Hiervon gehen etwa 60 % in die biogene Energieerzeugung, während die übrigen 40 % der Industriellen/ stofflichen Verarbeitung zugeführt wird. Insgesamt spielt die energetische Nutzung im Sinne der Strom- und Wärmeerzeugung in Verbrennungsanlagen eine eher nachrangige Rolle: Knapp drei Viertel des Rohstoffertrags aus biogenen Quellen landen in der Viehzucht und Nahrungsmittelverarbeitung, während ca. 18 % direkt der Bioenergieerzeugung zugeführt wird. Die industrielle Verarbeitung macht etwa 10 % aus.

Insgesamt landen von ca. 240 EJ Primärenergieinput etwa 65 EJ im finalen Konsum und 90 EJ in biogenen Abfallprodukten. Der Rest geht in Form von Umwandlungsverlusten und der Stoffwechselung («*Veratmung*») bei der Viehhaltung verloren.

Die globalen Produktions- und Exportpotenziale wurden im Rahmen der Arbeiten für die Energieperspektiven 2050+ nicht explizit analysiert. Stattdessen wurde auf energiewirtschaftliche Projektionen (Prognos AG et al., 2021) im Rahmen des Nationalen Energie- und Klimaplanes für die Bundesrepublik Deutschland zurückgegriffen, in denen Studien über nachhaltige Importpotenziale der EU aus den relevantesten Biomasse-Exportländern herangezogen wurden (Projekt BioTrade2020+, 2016), um ein nachhaltiges nationales Importpotenzial abzuleiten. Eine nähere Beschreibung der Arbeiten und die daraus folgenden Potenzialabschätzung für die Schweiz erfolgt in Abschnitt 3.3.

3.2 Inländisches Potenzial

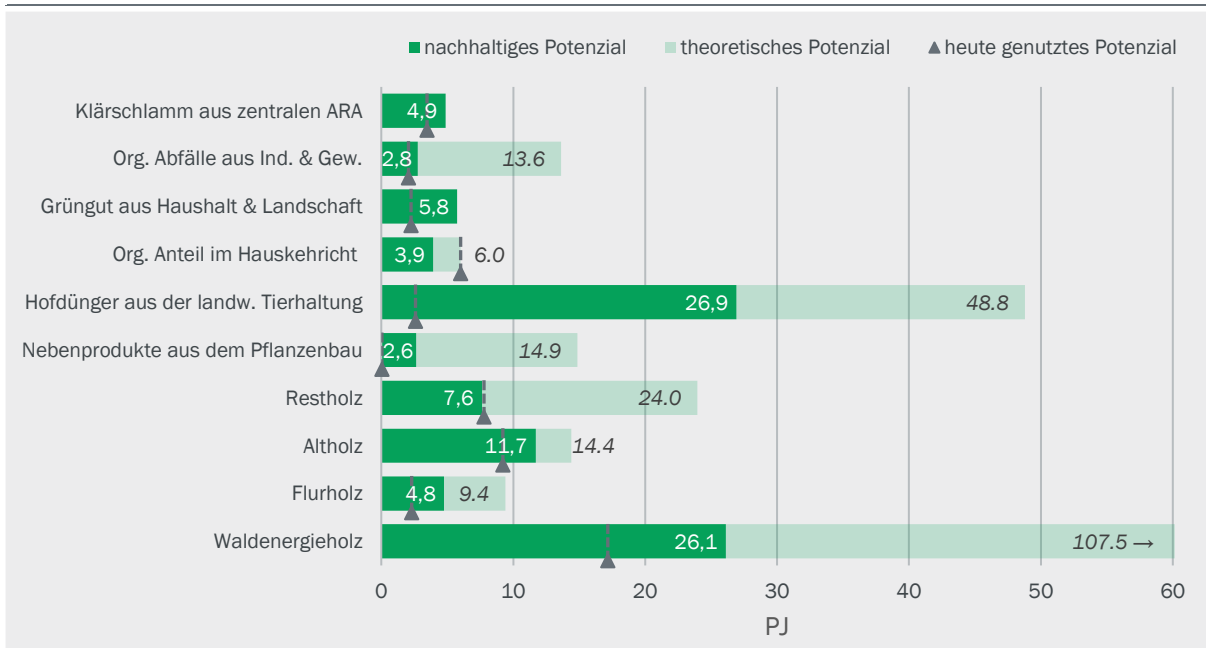
Das inländische Potenzial für die nachhaltige Biomasseproduktion zur energetischen Verwendung in der Schweiz wurde detailliert in einer Studie der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL untersucht (Oliver Thees et al., 2017). Diese wurde bei den Potenzialabschätzungen für die Szenariorechnungen für die Energieperspektiven 2050+ zugrunde gelegt. In der Studie werden zehn Kategorien von Rohstoffen unterschieden und deren theoretisches, technisches sowie nachhaltiges Potenzial ermittelt. Das verwendete Nachhaltigkeitskriterium hat sowohl eine ökologische als auch eine ökonomische Dimension. Die folgenden Kategorien werden unterschieden und sind in Tabelle 1 näher erläutert:

- Holz
 - Waldenergieholz
 - Flurholz
 - Restholz
 - Altholz
- nicht-verholzte Biomassen
 - Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Viehhaltung
 - Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau
 - Organischer Anteil des Haushaltskehrichts
 - Grüngut aus Haushalten und Landschaft
 - Klärschlamm aus Abwasserreinigungsanlage

Die ermittelten Potenziale sind in Abbildung 4 zusammengefasst. Hier wird das ermittelte nachhaltige Biomassepotenzial dem theoretisch verfügbaren Gesamtpotenzial gegenübergestellt und der Stand der aktuellen Potenzialausnutzung aufgezeigt.

Abbildung 4: Inländisches Biomassepotenzial zur energetischen Nutzung der Schweiz

Darstellung des theoretischen und nachhaltigen Potenzials sowie der Potenzialausnutzung im Auswertungsjahr, in PJ



Quelle: Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung (Oliver Thees et al., 2017)

Das Waldenergieholz stellt mit rund 108 PJ die Quelle mit dem mit Abstand größten theoretischen Potenzial dar. Die zweitgrößte Quelle ist der Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung mit rund 50 PJ. Das Potenzial an Restholz bemisst sich auf knapp ein Viertel des Waldholzpotenzials. Die theoretischen Potenziale organischer Abfälle aus Industrie und Gewerbe, landwirtschaftlicher Nebenprodukte und von Altholz haben ein vergleichbares Niveau von 14 bis 15 PJ. Die übrigen Quellen weisen theoretische Potenziale von unter 10 PJ auf. Betrachtet man die nachhaltigen Potenziale, so zeigen sich andere Mengenverhältnisse. Hier weist der Hofdünger ein geringfügig höheres Potenzial auf als das Waldenergieholz, obwohl das theoretische Potenzial an Hofdünger deutlich kleiner ist. Alt- und Restholz sind mit rund 12 bzw. 8 PJ die dritt- und viertgrössten Quellen, gefolgt von Grüngut aus Haushalt und Landschaft (6 PJ) sowie Klärschlamm aus Abwasserreinigungsanlagen und Flurholz (jeweils 5 PJ).

Der aktuelle Potenzialausnutzungsgrad gemäss der Studie von (Oliver Thees et al., 2017) ist in der Abbildung 4 durch die grauen Pfeile dargestellt. Es zeigt sich, dass mit Ausnahme der Kategorien *Restholz* und *organischer Anteil des Haushaltskehrichts* das jeweilige nachhaltige Potenzial nicht ausgeschöpft ist. Wie in Tabelle 1 erläutert, entspricht das theoretische Potenzial der Kehrichtverwertung dem heutigen Stand. Bei der Quantifizierung des nachhaltigen Potenzials wird davon ausgegangen, dass ein grösserer Anteil der Bio-Abfälle von Haushalten gesondert gesammelt und der Vergärung zugeführt wird. Dieser Teil wird der Kategorie *Grüngut aus Haushalten und Landschaft* zugerechnet.

Tabelle 1: Übersicht Schweizer Biomassequellen

Kategorien und deren Abgrenzung aus der Studie der Forschungsanstalt WSL (Oliver Thees et al., 2017)

Kategorie und Beschreibung

verholzte Biomasse

- **Waldenergieholz** bezeichnet Holz, welches nach der Ernte in naturbelassenem Zustand direkt einer energetischen Nutzung zugeführt wird. Das theoretische Waldholzenergiepotenzial entspricht der maximal nutzbaren Holzmenge aus dem Wald. Das nachhaltige Potenzial ergibt sich aus dem theoretischen Potenzial abzüglich der stofflich verwendeten Holzmassen, sowie der Holzmassen, welche bei bestandserhaltender Waldbewirtschaftung nicht erschliessbar sind (Reservate, Ernteverluste) bzw. nicht kostendeckend bereitgestellt werden können.
- **Flurholz** bezeichnet Holz, welches bei Landschaftspflegearbeiten in der Flur und in Siedlungsgebieten anfällt und naturbelassen – resp. unbehandelt - ist. Der Holztertrag dieser Kategorie ist ein Nebenprodukt der Pflanzen- und Landschaftspflegearbeiten.
- **Restholz** umfasst Nebenprodukte (Schwarten, Spreissel, Kappstücke, Säge- und Hobelspäne sowie Sägemehl), die neben dem gewünschten Hauptprodukt in Säge-, Hobel- und Leimholzwerken oder in den Zimmereien und Schreinereien anfallen. Diese Nebenprodukte können sowohl energetisch (z.B. zur Pelletproduktion) als auch stofflich (vor allem zur Herstellung von Spanplatten) genutzt werden. Das Restholzpotenzial ist eng mit der Nutzung von Waldholz verbunden: Je mehr Waldholz in den Sägereien und in der Weiterverarbeitung stofflich genutzt wird, desto mehr Restholz fällt an. Dementsprechend ist das theoretische bzw. nachhaltige Potenzial definiert als das aus der Verarbeitung des theoretischen bzw. nachhaltigen Waldholznutzungspotenzials in einem Jahr anfallendes Restholz.
- Unter **Altholz** wird sämtliches Holz subsumiert, das bereits einmal in Gebrauch war. Nicht zum Altholz zählen insbesondere Abfälle von naturbelassenem Waldholz, mechanisch bearbeitetes Industrierestholz oder Baum- und Strauchschnitt. Das Theoretische Potenzial entspricht der im Markt maximal verfügbare Altholzmenge und enthält die innerbetrieblich verwendeten Mengen sowie die Mengen, welche im Ausland an Endverwerter vertrieben werden. Das nachhaltige Potenzial berücksichtigt die kaskadische und damit auch die stoffliche Nutzungsart des Altholzes sowie die sachgerechte Entsorgung von belastetem Altholz im In- und Ausland.

sonstige Biomassen

- Unter **Hofdünger aus der landwirtschaftlichen Viehhaltung** werden alle Ausscheidungen (sowohl in flüssiger als auch in fester Form) aus der landwirtschaftlichen Tierhaltung verstanden. Je nach Stallsystem können diese in reiner Form (Gülle) oder mit dem Einstreumaterial vermischt (Mist) anfallen. Das theoretische Potenzial umfasst die Gesamtmenge an Hofdünger (Gülle und Mist), die aktuell in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung der Schweiz in einem Jahr anfällt. Das nachhaltige Potenzial beschreibt die Menge an Hofdünger, die aktuell von Landwirten für die energetische Verwendung mobilisierbar wäre. Dies beinhaltet einen Abzug von Verlusten durch Stallabwesenheit der Tiere durch Weidegang oder Alpsommerung und einen Ausschluss von Betrieben mit zu geringer Gülleproduktion und Gebieten mit zu geringem Viehbestand, in denen auch der Betrieb einer gemeinschaftlichen Biogasanlage nicht möglich wäre.
- **Nebenprodukte aus dem Pflanzenbau** umfassen Rückstände nach der Ernte (Stängel-, Kraut- oder Stroharten) des eigentlichen landwirtschaftlichen Hauptproduktes sowie integrierte Zwischenkulturen. Gemäss heutiger Praxis werden Ernterückstände grösstenteils auf dem Feld liegen gelassen und durch den Einsatz von Bodenfräse, Grubber oder Pflug in den Boden eingearbeitet oder alternativ einer weiteren Verwertung zugeführt (z.B. als Futter oder Einstreu für die Tierhaltung). Das theoretische Potenzial umfasst das gesamte jährliche Aufkommen an Nebenprodukten aus dem landwirtschaftlichen Pflanzenbau. Dabei ist zu bemerken, dass solche Nebenprodukte, welche derzeit in erster Linie zur Tierfütterung oder als Einstreu verwendet werden, nicht mit eingerechnet werden, da diese Energiemengen dem Hofdüngerpotenzial zugerechnet werden. Das nachhaltige Potenzial zur energetischen Nutzung ist aufgrund verschiedener technischer, ökonomischer und ökologischer Restriktionen deutlich geringer.

fortgeführt auf der nächsten Seite

Kategorie und Beschreibung

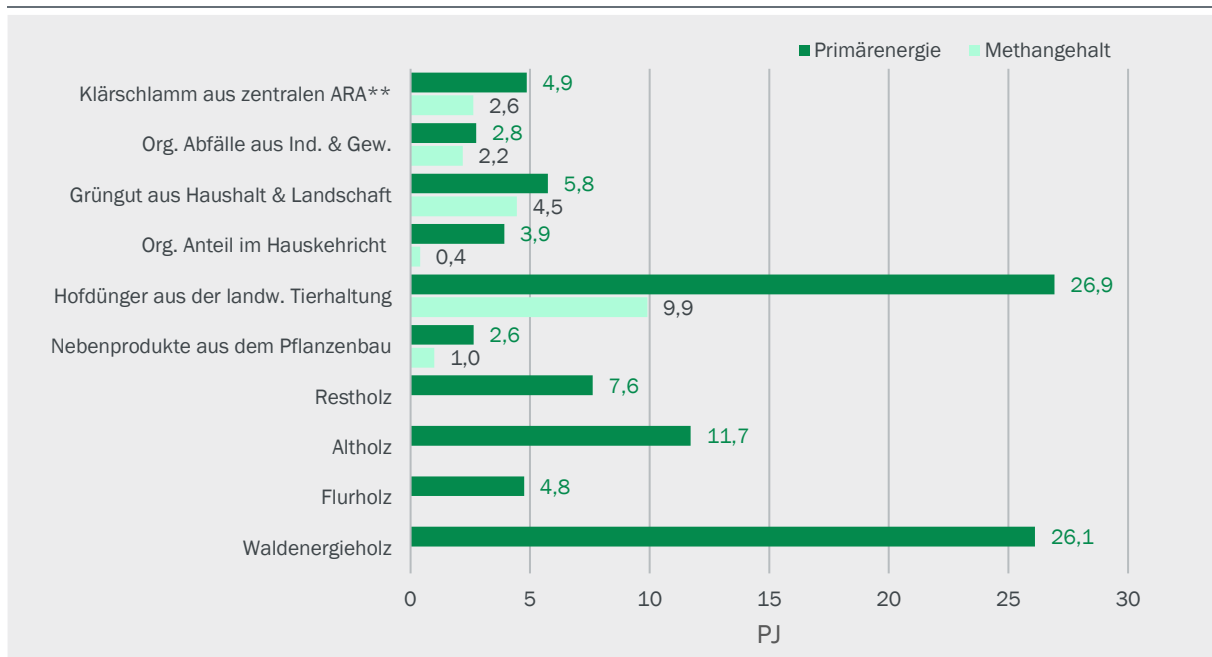
(fortgeführt von vorheriger Seite)

- **Organischer Anteil des Haushaltskehrichts.** Unter Hauskehricht werden allgemein von Haushalten stammende, vermischte Siedlungsabfälle verstanden, die nicht getrennt gesammelt oder stofflich verwertet werden. Dieser wird heute zusammen mit Abfällen aus Industrie und Gewerbe in Kehrlichtverwertungsanlagen verbrannt. Das theoretische Potenzial wurde im Rahmen der Untersuchung anhand eines bottom-up-Ansatzes zur Zusammensetzung des Haushaltskehrichts abgeschätzt und entspricht dem organischen Anteil des gesamten heutigen Aufkommens von Haushaltskehricht. Aus ökologischer Sicht ist eine bessere Absonderung biogener Abfälle sinnvoll, weil auf diese Weise ein grösserer Anteil der Vergärung zugeführt werden kann und somit der Nährstoffkreislauf nicht durch Verbrennung gebrochen wird. Da der vergäerte Teil des Haushaltskehrichts der Kategorie *Grüngut aus Haushalten und Landschaft* zugerechnet wird, ist das nachhaltige Potenzial der Kategorie *Organischer Anteil des Haushaltskehrichts* entsprechend geringer.
- **Grüngut aus Haushalten und Landschaft** umfasst nicht-verholzte, biogene Abfälle, die aus den Haushalten oder aus der Landschaftspflege stammen und im Rahmen der kommunalen Abfallwirtschaft separat gesammelt werden. Kleinmengen vergleichbarer Abfälle von Unternehmen, die der gewöhnlichen Separatsammlung der Gemeinde angeschlossen sind, gehören auch dazu. Nicht in diese Kategorie fallen spezifische Abfälle aus der industriellen oder gewerblichen Produktion, sowie gemischte Siedlungsabfälle respektive Kehrlicht. Verholzte Gartenabfälle werden der Kategorie «Flurholz» zugerechnet. Das theoretische Potenzial umfasst die gesamte Menge Grüngut aus Haushalt und Landschaft, welche aktuell in der Schweiz in einem Jahr getrennt gesammelt wird. Das nachhaltige Potenzial beinhaltet zusätzlich die Menge an Bio-Abfällen, die heute zusammen mit dem restlichen Haushaltskehricht verbrannt werden, aber der Vergärung zugeführt werden könnten. Diese Abfallmengen sind im theoretischen Potenzial der Kategorie *Organischer Anteil des Haushaltskehrichts* enthalten.
- Zu den **organischen Abfällen aus Industrie und Gewerbe** werden nicht-hölzerne Abfälle pflanzlicher, tierischer oder mikrobieller Herkunft gezählt. Dazu gehören diverse Lebensmittelrückstände aus der industriellen Verarbeitung, der Gastronomie und dem Detailhandel, aber auch weitere organische Abfälle aus der Papier- und Tabakproduktion. Holzabfälle sowie Haushaltsabfälle sind den Kategorien *Restholz* und *Organischer Anteil im Hauskehricht* zugerechnet. Im Gegensatz zum theoretischen Potenzial, welches dem gesamten jährlichen Abfallaufkommen entspricht, wird für das nachhaltige Potenzial die Menge abgezogen, die heute stofflich wiederverwendet wird (Lebensmittelspende, Tierfutter, interne Prozesse) oder unter den aktuellen Gegebenheiten vorzugsweise durch dezentrale Kompostierung möglichst am Ort ihrer Entstehung zu verwerten sind.
- **Klärschlamm aus Abwasserreinigungsanlagen** kann durch ein Verfahren der anaeroben Vergärung abgebaut werden, wodurch energetisch nutzbares Biogas entsteht. Bereits heute wird in der Schweiz sämtlicher Klärschlamm in entsprechenden Anlagen thermisch behandelt bzw. verbrannt, sodass das nachhaltige Potenzial dieser Kategorie dem theoretischen Potenzial entspricht.

Quelle: Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung (Oliver Thees et al., 2017)

Für nicht verholzte Biomassen, die nicht direkt der Verbrennung zugeführt werden, ist der Primärenergie keine geeignete Bezugsgrösse, um das im Endkonsum nutzbare Potenzial zu quantifizieren. Hierfür ist der Biomethangehalt indikativ, der in Abbildung 5 dem primärenergetischen Potenzial gegenübergestellt ist. Abhängig von der Kategorie liegt der Biomethangehalt nicht verholzter Biomassen zwischen 37 und 79 %. Eine Ausnahme stellt wiederum der Haushaltskehricht dar, dessen gut vergärbare Anteil der Kategorie *Grüngut aus Haushalt und Landschaft* zugerechnet ist.

Abbildung 5: Vergleich von primärenergetischem Energiegehalt zum Methangehalt für das nachhaltige energetisch nutzbare Biomassepotenzial



Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung (Oliver Thees et al., 2017)

In der Szenariorechnung für die Energieperspektiven wurde davon ausgegangen, dass prinzipiell alle nicht-hölzige Biomassequellen zur Biogasherstellung eingesetzt werden. Die einzige Ausnahme bildet der organische Anteil des Haushaltskehrichts, welcher in Kehrichtverwertungsanlagen verbrannt wird, sowie die organischen Abfälle aus Industrie und Gewerbe, die teilweise in biogenen Dieseltreibstoff umgewandelt werden. Um einen möglichst flexiblen Einsatz als Brenn- oder Treibstoffstoffe in allen Sektoren zu gewährleisten, wird der Grossteil des Biogases zu Biomethan aufbereitet und in das Gasnetz eingespeist. Insbesondere bei kleinen dezentralen Biogasanlagen ist eine Aufbereitung und Einspeisung des Produktes aus Kostengründen oder fehlendem Zugang zum Gasnetz jedoch nicht immer möglich. In diesem Fall stellt die lokale Verstromung in Blockheizkraftwerken die einzige Nutzungsmöglichkeit dar. Das Einspeisepotenzial von erneuerbarem Gas in das Schweizer Netz bis 2030 wurde im Rahmen einer Studie von E-Cube Strategy Consultants untersucht (E-CUBE Strategy Consultants, 2018). Basierend auf statistischen Daten des BFS (landwirtschaftliche Betriebe) und des VSG (an das Erdgasnetz angeschlossene Gemeinden) wurde die Entfernung der Schweizer Landwirtschaftsbetriebe zu dem bestehenden Gasnetz modellgestützt quantifiziert. Unter der Annahme einer maximalen Anschlussdistanz von 5 km, ergab sich gemäss der Modellierung ein Einspeisepotenzial von rund 50 % des landwirtschaftlichen Biogasproduktionspotenzials. Bevor das Rohbiogas in das Erdgasnetz eingespeist werden kann, muss es aufbereitet werden, indem es von Schwefel und anderen Verunreinigungen gereinigt und das im Gasgemisch enthaltene CO₂ herausgefiltert wird (vgl. Abschnitt 4).

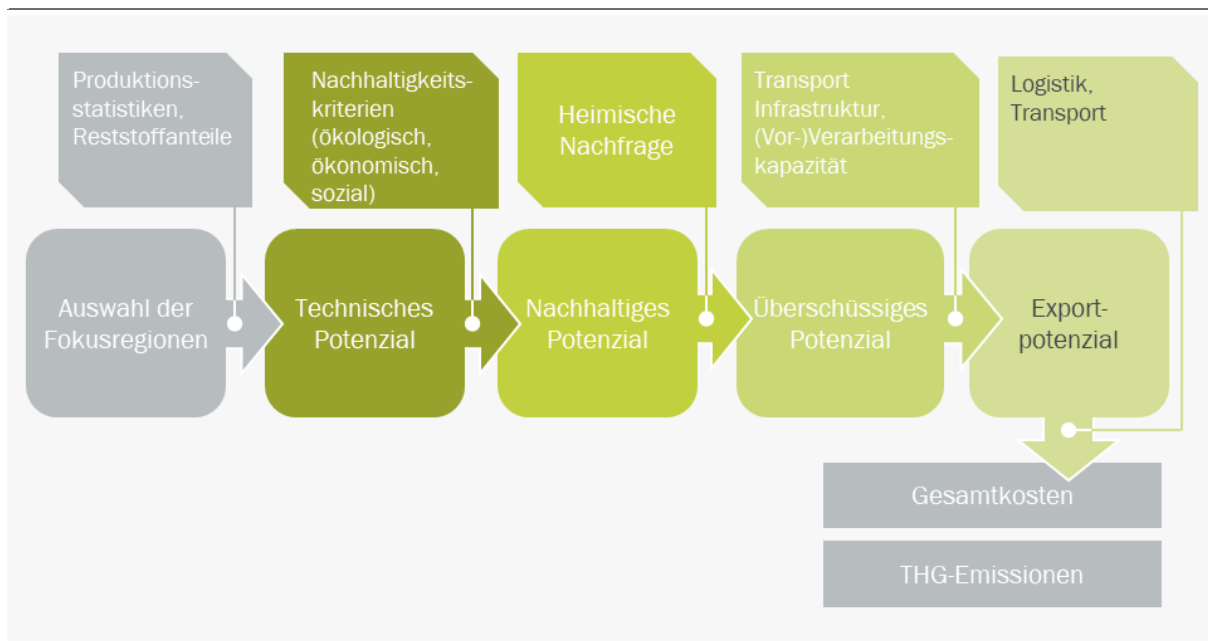
3.3 Importe von Biomasse

Für die Einschätzung möglicher Importmengen biogener Energieträger sind neben den Produktionspotenzialen der Herkunftsländer weitere Restriktionen relevant, wie ökonomische und ökologische Anforderungen an die Nachhaltigkeit der Supply Chain als auch Nutzungskonkurrenzen mit anderen potenziellen Importländern sowie dem lokalen Verbrauch im Herstellungsland selbst. Das europäische Importpotenzial wurde für den mittelfristigen Zeithorizont bis 2030 in verschiedenen Studien untersucht (IINAS, 2016; Mai-Moulin et al., 2019; Ric Hoefnagels et al., 2015).

Die Abschätzung der Importmengen in den Energieperspektiven 2050+ basiert auf den Potenzialabschätzungen, die im Rahmen der EU-Projekte Biomass Policies (IINAS, 2016) und BioTrade2020+ (Projekt BioTrade2020+, 2016) unternommen wurden. Die Studien quantifizieren ein Exportpotenzial relevanter Fokusregionen und leiten daraus die Gesamtkosten für den europäischen Import ab. Die zugrundeliegende Methodik ist in Abbildung 6 zusammenfasst.

Abbildung 6: Methodik der Exportpotenzialbestimmung

Definition des nachhaltigen Exportpotenzials nach (Mai-Moulin et al., 2019)



Quelle: eigene Darstellung nach (Mai-Moulin et al., 2019)

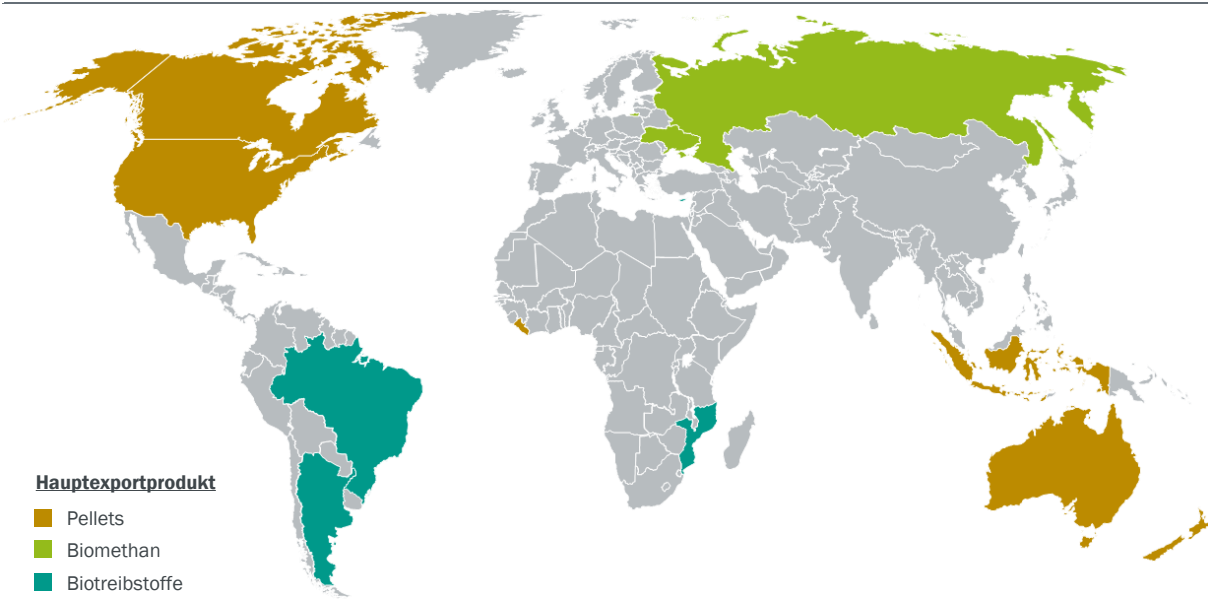
Die Potenzialabschätzungen werden für feste Biomasse (Pellets und Holzschnitzel), flüssige Biotreibstoffe zweiter Generation sowie Biomethan vorgenommen. Die relevanten Herkunftsländer sind in Abbildung 7 dargestellt. Beim Biomethan wurden lediglich die beiden EU-Nachbarstaaten Russland und Ukraine betrachtet, zum einen, weil diese über ein beträchtliches Produktionspotenzial verfügen, und zum anderen, weil das Gastransportnetz für den Transport nach Europa hier bereits vorhanden ist.

Die Exportpotenziale wurde jeweils als Überschusspotenzial abzüglich der nationalen Bedarfe der Bioökonomie (Biomaterialien, Bioenergie, Nahrungs- und Futtermittel) bestimmt. Bei Biomethan wird hierbei vorrangig auf Grasschnitt als Rohstoff gesetzt. Die Entwicklung des überschüssigen

Potenzials in den Herkunftsländern ist abhängig von der unterstellten Entwicklung in den Herkunftsländern und auf dem globalen Markt. In den Studien werden unterschiedliche Entwicklungsszenarien zugrunde gelegt: Neben einem Business-As-Usual-Szenarios als Referenzentwicklung werden in Biomass Policies (IINAS, 2016) zwei Szenarien berechnet, die auf dem Energy Roadmap 2050-PRIMES „high RES scenario“ (EU-COM, 2011) basieren und sich hinsichtlich der globalen Nachhaltigkeitsanforderungen unterscheiden. Beide Szenariorechnungen weisen eine höhere globale Nachfrage nach Bio-Energieträgern gegenüber der Referenzentwicklung auf.

Abbildung 7: Biomassenexportländer

Nichteuropäische Länder mit hohen potenziellen Biomasseproduktionsüberschüssen nach Hauptexportprodukt



Quelle: eigene Darstellung nach (IINAS, 2016; Mai-Moulin et al., 2019; Ric Hoefnagels et al., 2015)

Tabelle 2: Exportpotenziale 2050/2060

Land/ Region	Pellets, Holzhackschnitzel	Biotreibstoffe	Biomethan	Summe
USA & Kanada	500 PJ	-	-	500 PJ
Russland	250 PJ	-	938 PJ	1'188 PJ
Ukraine	-	-	375 PJ	375 PJ
Brasilien & Argentinien	200 PJ	500 PJ	-	700 PJ
Mozambique	100 PJ	250 PJ	-	350 PJ
globales Exportpotenzial	1'050 PJ	750 PJ	1'313 PJ	3'113 PJ

Quelle: Energiewirtschaftlichen Projektionen für die Bundesrepublik Deutschland (Prognos AG et al., 2021)

Die Studien quantifizieren ein Biomasseexportpotenzial im Jahr 2030. Im Rahmen der Energiewirtschaftlichen Projektionen für die Bundesrepublik Deutschland (Prognos AG et al., 2021) wurden diese Potenzialabschätzungen auf das Jahr 2050 extrapoliert, indem die globalen Trends der

Energienachfrage aus den Szenarienarbeiten den IEA Technology Perspectives (IEA, 2017a) und der IEA Technology Roadmap (IEA, 2017b) zugrunde gelegt wurden. Da keine vergleichbaren globalen Energieszenarien bis zum Jahr 2060 vorliegen, wurde das ermittelte Potenzial auch für das Stichjahr 2060 als indikativ aufgefasst. Auf diese Weise wurden für die Jahre 2050/2060 die in Tabelle 2 aufgeführten Herkunftsländer und langfristigen Exportpotenziale bestimmt.

Tabelle 3: Bruttoinlandsprodukte 2050

Anteil des Schweizer BIP am globalen und europäischen Bruttoinlandsprodukt

BIP* Welt 2050	BIP* Europa** 2050	BIP* Schweiz ³ 2050	Anteil CH/Welt	Anteil CH/EU*
118'376 Mrd. EUR ₂₀₁₀	24'838 Mrd. EUR ₂₀₁₀	823 Mrd. EUR ₂₀₁₀	0.7 %	3.3 %

* Rohdaten aus dem Prognos Economic Outlook 2019 (Prognos AG, 2019)

** EU 28 zusammen mit Norwegen und Schweiz

Quelle: eigene Berechnung Prognos AG

Das oben beschriebene Exportpotenzial wird auf den internationalen Märkten gehandelt. Der Anteil, der hiervon der Schweiz zum Import zur Verfügung steht, wurde in einem einfachen Ansatz aus den abgestimmten Rahmendaten abgeleitet. Das Importpotenzial fester Biomasse und Biotreibstoffe wurde anhand des Anteils des Schweizer Bruttoinlandsprodukts am globalen BIP im Jahr 2050 abgeschätzt. Für das Importpotenzial von Biomethan wurde entsprechend der Anteil des Schweizer BIP am europäischen Bruttoinlandsprodukt angewandt. Die Werte sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Tabelle 4 zeigt die daraus abgeleiteten Schweizer Biomasseimportpotenziale.

Tabelle 4: Schweizer Importpotenziale

Land/ Region	Pellets, Holzhackschnitzel	Biotreibstoffe	Biomethan	Summe
USA & Kanada	3 PJ	-	-	3 PJ
Russland	2 PJ	-	31 PJ	33 PJ
Ukraine	-	-	12 PJ	12 PJ
Brasilien & Argentinien	1 PJ	3 PJ	-	5 PJ
Mozambique	1 PJ	2 PJ	-	2 PJ
globales Importpotenzial	7 PJ	5 PJ	44 PJ	56 PJ

Quelle: eigene Berechnung basierend auf (Prognos AG et al., 2021)

3.4 Gesamtpotenzial

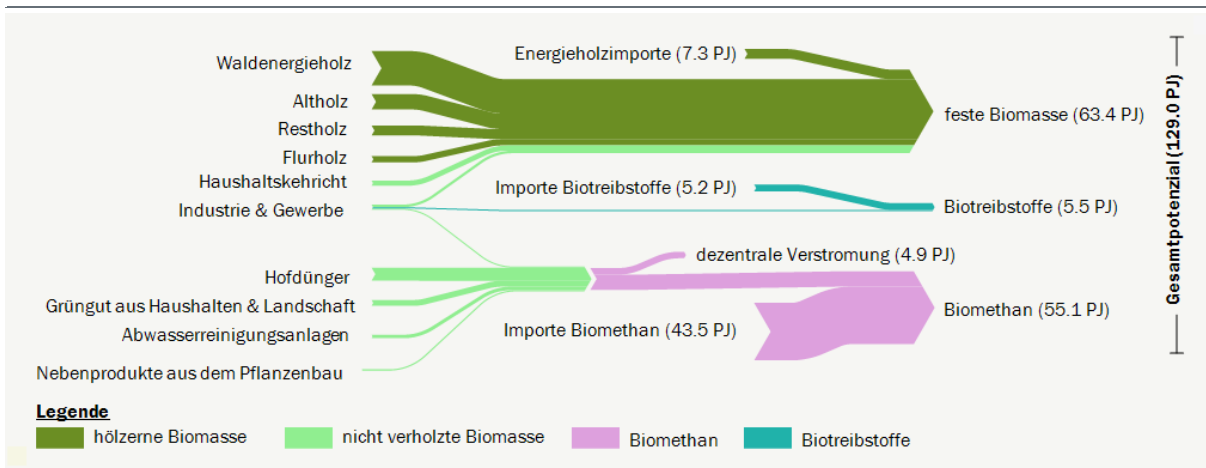
Aus dem inländischen Potenzial (Abschnitt 3.2) und dem Importpotenzial (Abschnitt 3.3) ergibt sich das energetisch nutzbare Gesamtpotenzial für die Schweiz. In Abbildung 8 ist dieses als

³ Um eine einheitliche Datenquelle für die BIP-Anteile zu verwenden, wurden alle Zahlen derselben Quelle entnommen. Aus diesem Grund unterscheidet sich die hier verwendete Zahl für das Schweizer Bruttoinlandsprodukt im Jahr 2050 von jener aus dem Rahmendatenset.

Flussdiagramm dargestellt. Das Diagramm veranschaulicht die relative Bedeutung der jeweiligen Biomassequellen und stellt die mit der Einspeisung von Biomethan verbundenen Einschränkungen dar. Für den inländischen Energieverbrauch stehen insgesamt 63.4 PJ feste Biomassen zur Verfügung, welche zu knapp 90 % aus inländischen Quellen stammen. Demgegenüber machen Importe knapp 95 % des Potenzials an Biotreibstoffen (5.5 PJ) aus. Auch das langfristig zur Verfügung stehende Biogas geht grossenteils auf ausländische Biomethanimporte zurück. Das inländische nachhaltige Produktionspotenzial beträgt 18.3 PJ. Davon sind knapp 5 PJ nur in dezentralen Blockheizkraftwerken energetisch nutzbar. Unter Berücksichtigung der damit verbundenen Energieeinsätze, können knapp 12 PJ zu Biomethan aufbereitet und ins Gasnetz eingespeist werden. Das Biomethanpotenzial beläuft sich auf rund 55 PJ.

Abbildung 8: Nachhaltiges energetisches Potenzial für die Szenariorechnung

Verteilung der Rohbiomassen und Importe auf Bioenergieträger



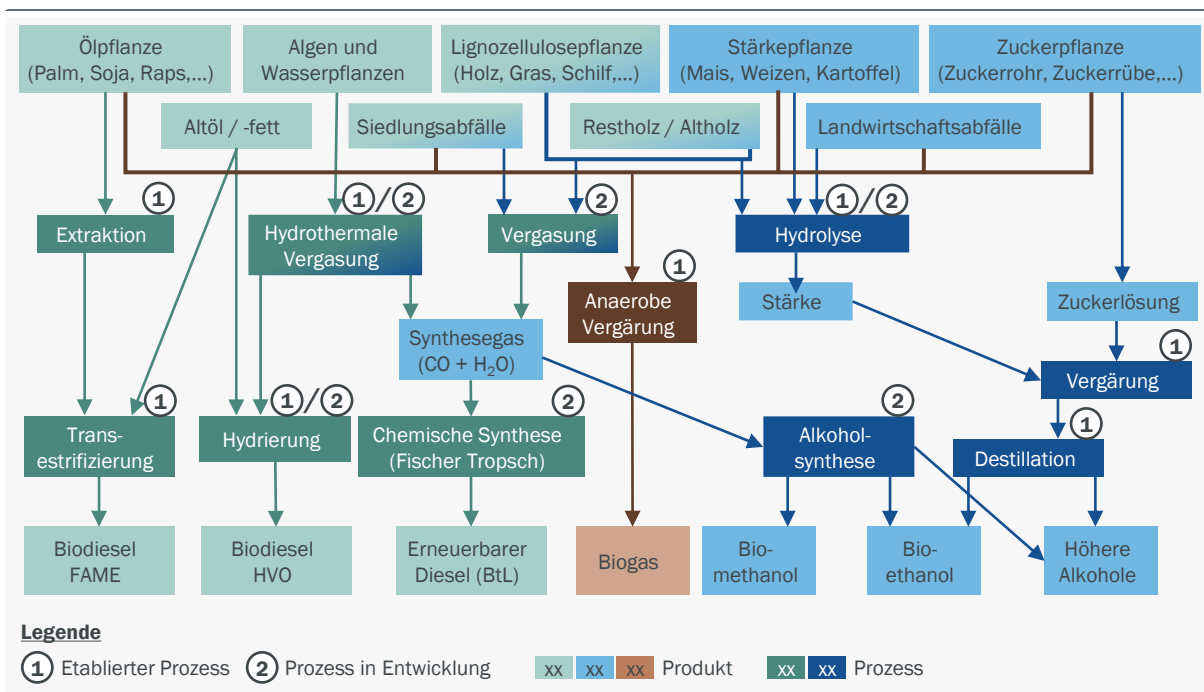
eigene Berechnung auf Basis (E-CUBE Strategy Consultants, 2018; Oliver Thees et al., 2017; Prognos AG et al., 2021)

Prinzipiell sind weitere Umwandlungen von Aggregatzuständen möglich und kommen in den Energieszenarien zum Einsatz, so zum Beispiel die Verflüssigung von Biomethan oder der Einsatz von Biomass-To-Liquid-Technologien (Abschnitt 4) zur Nutzbarmachung fester und gasförmiger Biomassen im Strassenverkehr. Solche Umwandlungen gehen mit weiteren Energieverbräuchen und Verlusten einher und reduzieren die für den Endverbrauch zur Verfügung stehenden Endenergie-mengen. Aus diesem Grund werden diese nicht bei der Potenzialbetrachtung, sondern erst bei der Beschreibung der Biomasseeinsätze in den Energieszenarien in Abschnitt 6 näher diskutiert.

4 Technologien zur Biomasse-Umwandlung

Viele Prozesse und Anwendungen können nicht mit primären Bioenergieträgern betrieben werden, sondern erfordern flüssige oder gasförmige Energieträger mit bestimmten chemischen und physikalischen Eigenschaften. Für die Konversion der Rohstoffe in biogene Sekundärenergieträger stehen verschiedene Umwandlungstechnologien zur Verfügung, die in Abbildung 9 zusammengefasst sind.

Abbildung 9: Technologien zur Biomasse-Umwandlung



eigene Darstellung nach (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)

Nachfolgend sind die wichtigsten Umwandlungsverfahren von Biomasse in flüssige Biotreib- und Biobrennstoffe gemäss der Zusammenstellung in (Althaus et al., 2018) und (Awgustow et al., 2017) beschrieben:

Biodiesel (FAME)

Durch die Transesterifizierung von Pflanzenöl kann Biodiesel gewonnen werden. Die Fettsäuremethylester (FAME) werden aus Ölpflanzen und Altöl/-fett produziert. Für eine nachhaltige Biodieselproduktion kommt nur die Verwendung von Altöl/-fett und anderen Abfällen in Frage, insbesondere gebrauchtes Speiseöl. Ein Nachteil von FAME ist, trotz seiner chemischen Ähnlichkeit zu Diesel, dass FAME nur begrenzt stabil sind und es zu höheren Schadstoffemissionen bei der Verbrennung kommt.

Die Technologie ist ausgereift, günstig und gut etabliert. Der Umwandlungswirkungsgrad bei der Verwendung von gebrauchtem Speiseöl liegt bei 98% (Awgustow et al., 2017). Global dominieren heute FAME aus Ölpflanzen den Biodieselmärkte, u. a. Palm-, Raps- oder Sojaöle. Die Prozesskosten liegen bei ungefähr 0.12 CHF/l und werden kaum weiter sinken. Den grössten Kostenanteil an den gesamten Produktionskosten haben die Rohmaterialkosten (bei Raps ca. 85 %; Naumann et al., 2016). Die Produktionskosten von FAME aus gebrauchtem Speiseöl liegen schätzungsweise zwischen 0.3 bis 1.1 CHF/l (0.03 bis 0.12 CHF/kWh; Althaus et al., 2018)

Biodiesel (HVO)

Durch die Hydrierung von Pflanzenöl kann Biodiesel gewonnen werden (HVO). Primär werden heute noch Ölpflanzen dazu verwendet. Es können über diesen Prozess aber auch gebrauchtes Speiseöl, Tierfette oder auch ölhaltige Algen zu Biodiesel verarbeitet werden. Gegenüber FAME haben HVO den Vorteil, dass sie langzeitstabil sind und daher ohne Weiteres Diesel oder auch Heizöl substituieren können.

Der Umwandlungswirkungsgrad bei der Verwendung von gebrauchtem Speiseöl liegt bei 98% (Awgustow et al., 2017). Der Herstellungsprozess ist noch relativ neu, technisch ist er ausgereift. Die Prozesskosten liegen schätzungsweise bei 0.3 bis 0.4 CHF/l und damit rund dreimal höher als jene von FAME. HVO Biodiesel machen dementsprechend heute auch nur wenige Prozent der gesamten Biotreibstoffproduktion aus. Wie bei FAME haben die Rohstoffkosten, mit ungefähr zwei Drittel, den grössten Anteil an den Herstellungskosten. Auf Basis von Altspeiseölpreisen werden HVO Biodiesel Herstellungskosten aus Altspeiseöl auf 0.5 bis 1.4 CHF/l geschätzt (0.06 bis 0.15 CHF/kWh; Althaus et al., 2018).

Biomass to Liquid (BtL)

Über ein zweistufiges Verfahren können synthetische Biotreib- und Biobrennstoffe und Alkohole hergestellt werden. Zunächst wird dazu Biomasse vergast (Pyrolyse), zu einem Synthesegas aus Wasserstoff (H₂) und Kohlenmonoxid (CO). Mit diesen Bausteinen lässt sich durch chemische Synthese (z.B. Fischer-Tropsch-Verfahren) oder durch Alkoholsynthese flüssiger Kohlenwasserstoff synthetisieren. Abhängig vom Verfahren ist das Produkt erneuerbarer Diesel (erneuerbares Heizöl/Benzin/Kerosin über Fischer-Tropsch-Verfahren) oder Bioethanol/-methanol (über die Alkoholsynthese). Diese Verfahren sind zwar technisch erprobt und verfügbar, jedoch noch nicht in der industriellen Nutzung. Im Vergleich zu den übrigen Umwandlungsverfahren in flüssige Biotreib- und Biobrennstoffe ist es aufgrund des Technologiereifegrads und des niedrigen Wirkungsgrads noch teurer. Ein grosser Vorteil ist, dass grundsätzlich praktisch jede Biomasse über diesen Prozess zu flüssigem Biotreibstoff umgewandelt werden kann.

Aufgrund der höheren Kosten und des tieferen Umwandlungswirkungsgrads eignen sich jedoch insbesondere diejenigen Rohstoffe, die nicht für andere Prozesse geeignet sind, insbesondere verholzte Biomasse oder Siedlungsabfälle. Der Umwandlungswirkungsgrad von Rohbiomasse zu erneuerbarem Diesel wird auf 20 % (Searle and Malins, 2016) bis 36 % (Awgustow et al., 2017) geschätzt, respektive auf rund 47 % bei der Alkoholsynthese (Awgustow et al., 2017). Die Produktionskosten für Biomass to Liquid beliefen sich gemäss aktuellen Literaturwerten und Abschätzungen um 2017 auf 1.5 bis 2.5 CHF/l (0.17 bis 0.28 CHF/kWh; Althaus et al., 2018).

Höhere Alkohole und Bioethanol

Damit Bioethanol und höhere Alkohole aus Lignocellulosepflanzen, wie z.B. Stroh oder sonstiger verholzter Pflanzen, gewonnen werden kann ist ein aufwändiges Verfahren notwendig. Zunächst

muss das Rohmaterial mechanisch im Häcksler und in Mühlen zerkleinert werden. Danach erfolgt eine thermische Vorbehandlung, um die Holzzellen zu zerstören. Nach dieser mechanischen und thermischen Vorbehandlung folgt eine chemische oder biotechnologische Aufschlüsselung (Hydrolyse). Je nach verwendetem Rohstoff werden andere Enzyme für den Aufschluss des Materials benötigt respektive kann der Prozess durch die Verwendung spezifischer Enzyme optimiert werden. Durch die Hydrolyse wird aus der verholzten Biomasse Zucker (Stärke) gewonnen, welcher danach zu Alkohol vergoren und zu höheren Alkoholen oder Bioethanol destilliert werden kann.

Der Prozess der Holzhydrolyse, auch Holzverzuckerung genannt, ist noch im vorindustriellen Stadium und relativ teuer. Der Umwandlungswirkungsgrad von Rohbiomasse (Abfallholz) zu Bioethanol wird auf 25% (Searle and Malins, 2016) bis 34% und für Stroh auf 42% (Awgustow et al., 2017) geschätzt. Kostenabschätzungen gehen heute von Herstellungskosten von 1.0 bis 2.5 CHF/l aus (0.17 bis 0.43 CHF/kWh). Anders als bei FAME und HVO sind heute bei diesem Verfahren die Prozesskosten mit rund 80% noch dominierend.

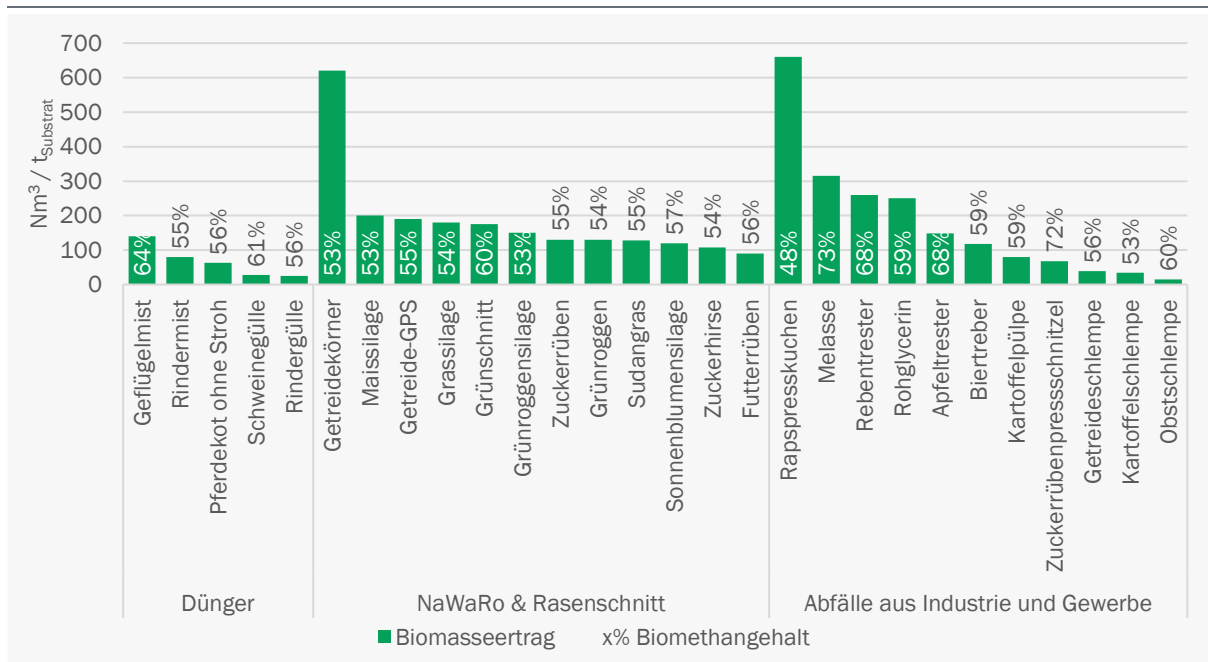
Die direkte Vergärung von Biomasse zu Alkohol mit anschliessender Destillation zu höheren Alkoholen oder Bioethanol setzt voraus, dass die verwendete Biomasse einfache Zucker enthält. Infrage kommende Pflanzen, wie Zuckerrohr oder Zuckerrüben, stehen jedoch in direkter Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion. Aus diesem Grund ist dieser Prozess nicht für die Herstellung von nachhaltigen Biotreib- und Biobrennstoffen geeignet (Althaus et al., 2018).

Anaeroben Vergärung zu Biogas

Bei der anaeroben Vergärung wird unter Ausschluss von Sauerstoff durch eine Reihe von Mikroorganismen organische Masse fast vollständig zersetzt und zu Biogas umgewandelt. Zusätzlich entstehen gewisse Mengen an Energie (Wärme) und neuer Biomasse. Dieser Prozess ist auch in der Natur weit verbreitet und findet beispielsweise in Mooren, auf dem Grund von Seen, in Güllegruben sowie im Pansen von Wiederkäuern statt. Das gebildete Gasgemisch wird als Rohbiogas bezeichnet und besteht überwiegend aus Methan (50–75 Vol.-%) und Kohlendioxid (25–50 Vol.-%). Daneben befinden sich im Biogas noch geringe Mengen an Wasser (2–7 Vol.-%), Wasserstoff, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen Spurengasen. Die Zusammensetzung wird im Wesentlichen von den eingesetzten Substraten, dem Fermentationsverfahren und verschiedenen technischen Ausführungen beeinflusst. Die angewandte Verfahrenstechnik unterscheidet sich hinsichtlich der Vergärungsart (Nassvergärung oder Feststoffvergärung), Art der Beschickung (diskontinuierlich, quasikontinuierlich, kontinuierlich), Anzahl der Prozessphasen (ein- oder zweiphasig) sowie der Prozesstemperatur (psychrophil, mesophil, thermophil).

Zahlreiche Substrate können anaerob vergärt werden. Zwei zentrale Grössen für deren Charakterisierung sind zum einen der Ertrag an Rohbiogas je Gewichtseinheit Frischsubstanz und zum anderen dessen Methangehalt. Die erste Kenngrösse ist stark vom Wassergehalt der Rohbiomasse abhängig. In Abbildung 10 sind die beiden Grössen für verschiedene Substrate nach Kategorien dargestellt. Der Biogasertrag aus der Kategorie Hofdünger liegt zwischen 20 und 270 Nm³/t_{Substrat} und jener aus nachwachsenden Rohstoffen zwischen 75 und 620 Nm³/t_{Substrat}. Abfälle aus Industrie und Gewerbe liefern Biogaserträge zwischen 10 und 660 Nm³/t_{Substrat}. Die Biomethangehalte liegen zwischen 55 und 65 % bei den Hofdüngern und zwischen 53 und 60 % bei den nachwachsenden Rohstoffen. Aufgrund der Vielseitigkeit der in der Kategorie Abfälle aus Industrie und Gewerbe subsumierten Substrate ist die Varianz der Biomethangehalte (48–73 %) deutlich höher.

Abbildung 10: Biogasertrag und Methangehalt verschiedener Substrate



Quelle: Leitfaden Biogas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2016)

Tabelle 5: Verfahren zur Biogasaufbereitung

	Druckwechsel-adsorption	Druckwasser-wäsche	Physikalische Absorption	Chemische Absorption	Membran-trenn-verfahren	Kryogene Verfahren
Strombedarf [kWh / Nm ³]	0.20-0.25	0.20-0.30	0.23-0.33	0.06-0.15	0.18-0.25	0.18-0.33
Wärmebedarf [kWh / Nm ³]			- 0.3*	0.5-0.8		
Prozesstemperatur [°C]			55-80	110-160		
Prozessdruck [bar]	4-7	5-10	4-7	0.1-4	5-10	
Methanverlust [%]	1-10	0.5-2	1-4	0.1	2-8	< 1
Abgasbehandlung	✓	✓	✓	x	✓	✓
Feinentschwefelung	✓	x	x	✓	✓	✓
Wasserbedarf	x	✓	x	✓	x	x
Chemikalienbedarf	x	x	✓		x	x

* exothermer Prozess, bei dem Abwärme frei wird

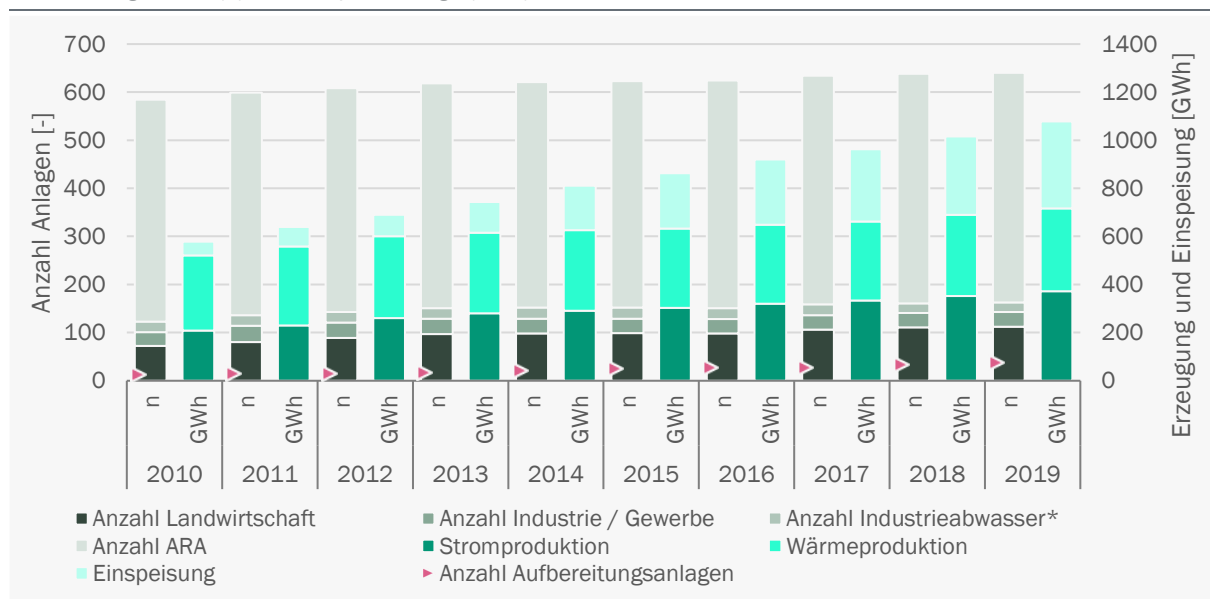
Quelle: Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014), Methanverluste bei der Biogasaufbereitung (ZHAW und PSI, 2008)

Während der spezifische Biogasertrag und der Methangehalt des verwendeten Substrats nicht unbedingt ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage sind, so sind diese

Größen indikativ für die Energiedichte und lassen Rückschlüssen darauf, ob es sich lohnt, den Rohstoff über eine grössere Distanz zu transportieren. Diese ist vor allem vor dem Hintergrund der Aufbereitung von rohem Biogas zu Biomethan relevant, die in der Regel in grösseren Anlagen stattfindet. Für die Einspeisung in das Gasnetz sind eine Vielzahl von Verfahrensschritten notwendig: Es werden unerwünschte Gasbestandteile (Schwefelwasserstoff, Ammoniak, Wasserdampf) aus dem Rohbiogas entfernt. Im weiteren Verlauf werden Inertgasbestandteile, insbesondere Kohlendioxid vom Rohbiogas abgetrennt. Abhängig vom eingesetzten Reinigungsverfahren können bei dem Aufbereitungsprozess zwischen 0.1 und 10 vol.-% Biomethan als Verluste entweichen (Methanschlupf). Der zurückbleibende methanreiche Teilstrom wird als aufbereitetes Biogas oder Biomethan bezeichnet. Damit Biomethan anschließend in das Erdgasleitungsnetz eingespeist werden kann, wird dessen Beschaffenheit auf die Bedingungen im Erdgasnetz und an die erforderliche Erdgasqualität angepasst. Je nach Einspeisestelle sind hierfür unterschiedliche technische Einrichtungen zur Druck- und Brennwertanpassung, aber auch zur Odorierung des Biomethans, erforderlich. Die oben genannten Schritte zur Biogasaufbereitung können in unterschiedlichen Anlagentypen realisiert werden, die sich hinsichtlich ihrer Energieeinsätze und Prozesscharakteristika unterscheiden. Die gängigen Verfahren sind in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Abbildung 11: Anzahl der Biogasanlagen in der Schweiz und deren erzeugte Energiemengen

Entwicklung Anzahl (n) und Einspeisemenge (GWh) von 2010 bis 2019



* exkl. Abwasserreinigungsanlagen (ARA).

ARA-Posten errechnet aus Differenz der Angaben in der GEST (BFE, 2020) und von Biomasse Suisse (Biomasse Suisse, 2021). Anzahl der Aufbereitungsanlagen aus der Jahresstatistik der Schweizerischen Gasindustrie (VSG, 2020).

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von (BFE, 2020; Biomasse Suisse, 2021; VSG, 2020).

Im Jahr 2019 waren in der Schweiz insgesamt 640 Biogasanlagen in Betrieb (Abbildung 11). Als Substrate kommen nur Hofdünger sowie organische Abfallprodukte zum Einsatz, welche nicht mehr in der menschlichen oder tierischen Nahrung verwendet werden können, d.h. keine Produkte auf Basis von «Energiepflanzen» (O'Connor et al., 2020). Die überwiegende Mehrheit der Biogasanlagen gehören zu Abwasserreinigungsanlagen. Die Anzahl der Biogasaufbereitungsanla-

gen mit Einspeisekapazitäten in das Erdgasnetz ist mit 37 Anlagen im Vergleich zu den Erzeugungsanlagen deutlich geringer. Obgleich der Grossteil der Biomasseanlagen für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt wird, wurde im Jahr 2019 mit 361 GWh annähernd die gleiche Energiemenge an Biomethan in das Gasnetz eingespeist, wie Strom produziert (372 GWh) und Wärme ausgekoppelt wurde (345 GWh). Die eingespeiste Menge Biomethan entspricht etwa 1 % des Gesamtdurchsatzes im Gasnetz.

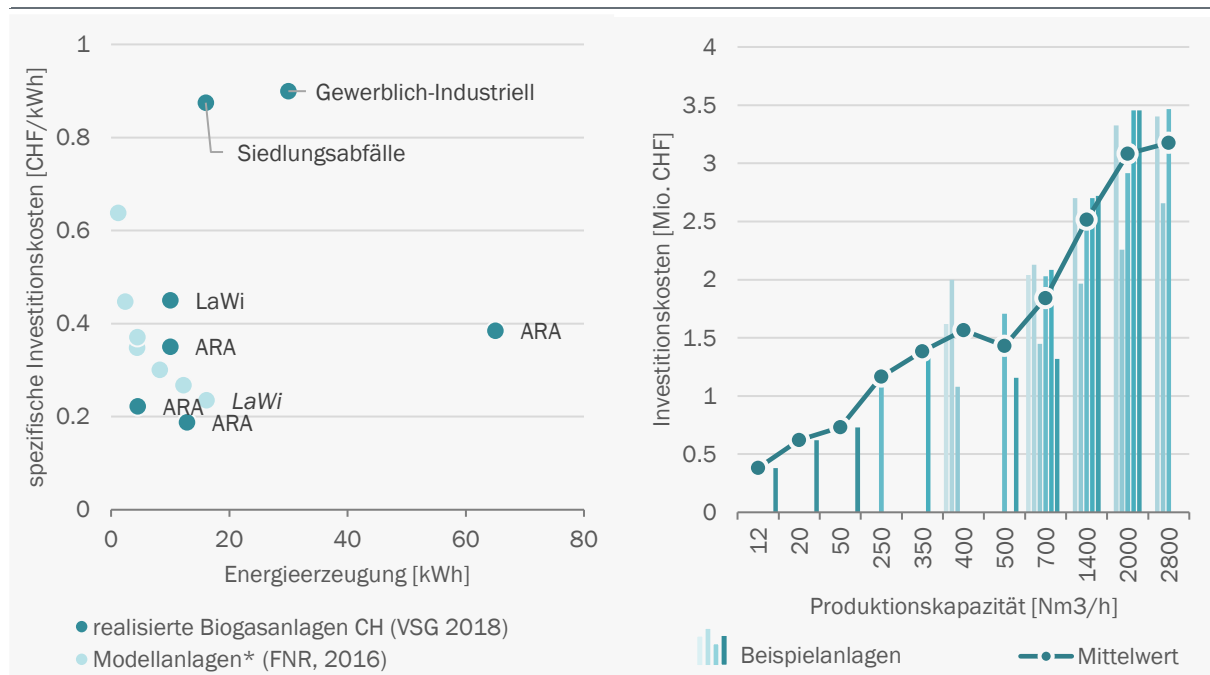
Die Stromgestehungskosten einer landwirtschaftlichen Biogasanlage lagen 2016 bei 20 bis 49 Rp./kWh inkl. Wärmegutschriften (PSI, 2017). Dies deckt sich mit den Kostenangaben für Modellanlagen aus anderen Quellen (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014). Die spezifischen Investitionskosten liegen in einer Grössenordnung von 0.2–1.0 CHF/kWh produzierte Energie und variieren je nach Anlagengrösse und Typus (Abbildung 12).

Kosten für Biogasaufbereitungsanlagen sind im Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014) angegeben, Kosten für kleinere Anlagen zur dezentralen Aufbereitung sind zum Beispiel im Schlussbericht des InfraBiogas-Projekts aufgeführt (fahrBiogas, 2020).

Abbildung 12: Literaturwerte für spezifische Investitionskosten von Biogas- und Biomethananlagen

links: spezifische Investitionskosten für Biogaserzeugungsanlagen

rechts: absolute Investitionskosten für Biomethanaufbereitungsanlagen nach Produktionskapazität



* unterstellter Wechselkurs für den Preisvergleich: 1.08 CHF/€

Quellen: Erfolgreich realisierte Biogasanlagen (VSG, 2018), Leitfaden Biogas (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2016), Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014), InfraBiogas (fahrBiogas, 2020)

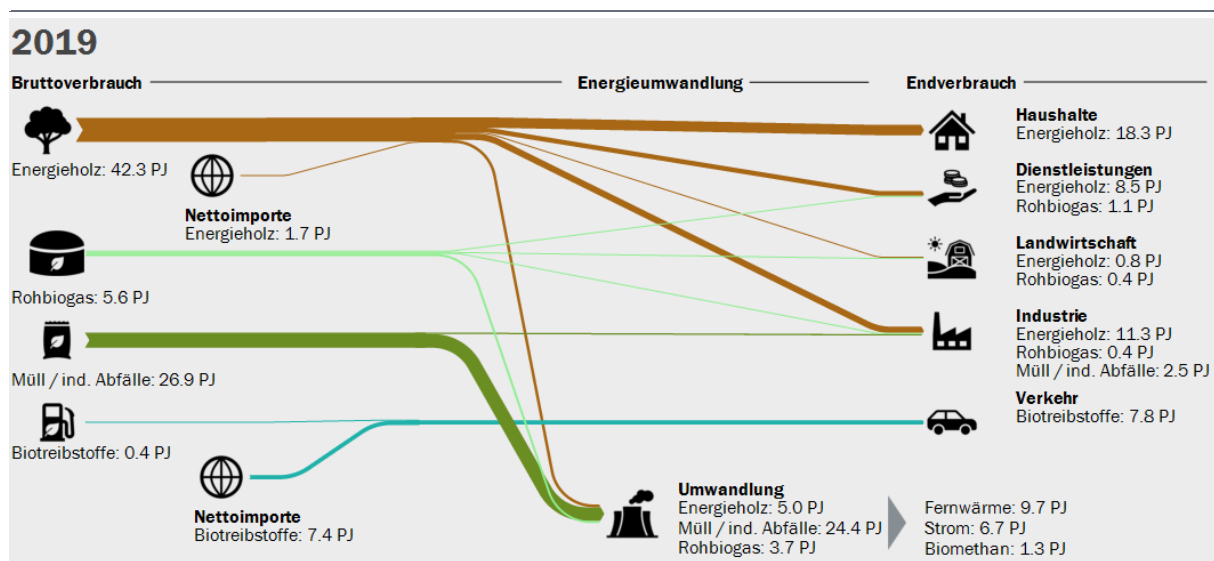
5 Aktuelle Verwendung von Biomasse in der Schweiz

Der aktuelle energetische Einsatz von Biomassen ist der Schweizerischen Gesamtenergiestatistik zu entnehmen (BFE, 2020) und in Abbildung 13 dargestellt. Im Jahr 2019 wurden rund 84 PJ Biomasseenergie in der Schweiz verbraucht. Damit macht Biomasse knapp 8 % des Bruttoenergieverbrauchs (1.103 PJ) bzw. 35 % des Bruttoenergieverbrauchs an erneuerbaren Energien (242 PJ) aus. Den grössten Anteil der verbrauchten Biomasse hat das Energieholz (44 PJ) mit 52 % und der biogene Anteil von Müll und Industrieabfällen (27 PJ) mit einem Anteil von 32%. Daneben kommen 7.8 PJ Biotreibstoffe (9.3 %) und 5.6 PJ Biogas (7.4 %) zum Einsatz. Biomasse wird überwiegend im Inland produziert, mit Ausnahme von flüssigen Biotreibstoffen, welche zu 95 % importiert werden.

Auf der Ebene des Endenergieverbrauchs (Energieverbrauch der Sektoren Haushalte, Dienstleistungen, Verkehr und Industrie) kommen 53 PJ Biomasse zum Einsatz, welche einen Anteil von 6.3 % am gesamten Endenergieverbrauch (834 PJ) und von 72 % am erneuerbaren Endenergieverbrauch (73 PJ; exklusive Endverbrauch an Strom und Fernwärme aus erneuerbaren Quellen) ausmachen. Daneben werden 6.2 PJ erneuerbarer Strom aus Biomasse verbraucht, welcher überwiegend in Kehrichtverwertungsanlagen erzeugt wird (68 %) und einen Anteil von 5 % am gesamten Endverbrauch an erneuerbarem Strom ausmacht. Für die Erzeugung von Fernwärme werden 8.9 PJ Biomasse eingesetzt, ein Grossteil davon in Kehrichtverwertungsanlagen (81 %).

Das Energieholz hat mit 74 % den grössten Anteil an der Endenergieenergie an Biomasse, flüssige biogene Treibstoffe haben einen Anteil von 15 %, Biogas (Rohbiogas und eingespeistes Biomethan) hat einen Anteil von 6.1 % und der biogene Anteil des Abfalls/Kehrichts hat einen Anteil von 4.8% am Endverbrauch und werden ausschliesslich in der Industrie eingesetzt.

Abbildung 13: Energetischer Einsatz von Biomassen in der Schweiz im Jahr 2019



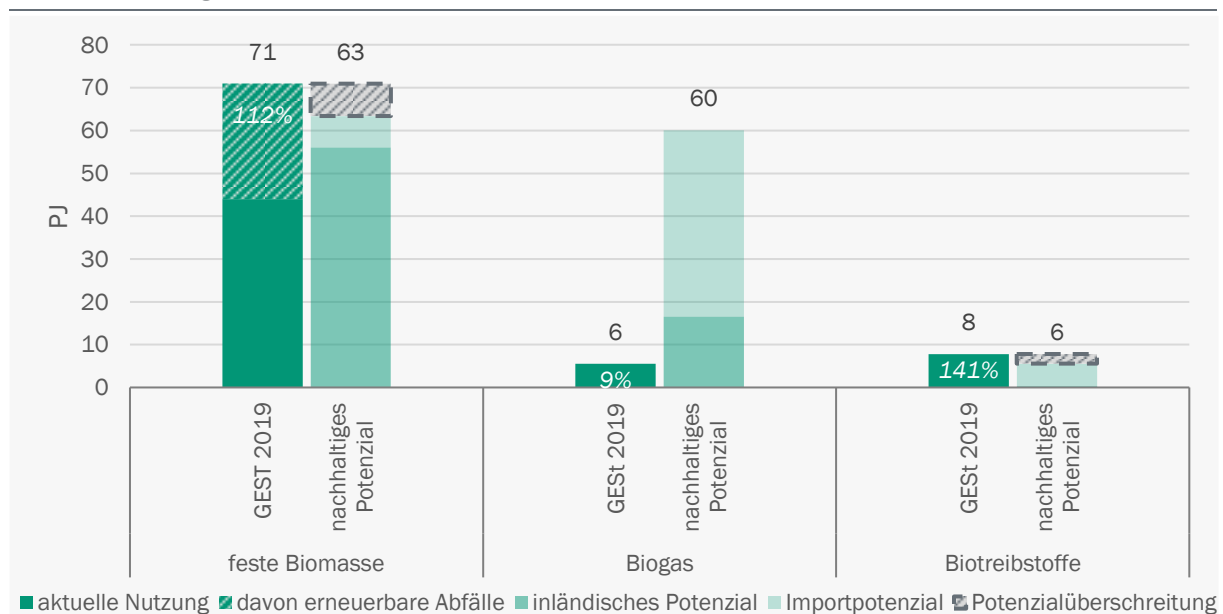
Quelle: eigene Darstellung auf Basis der Schweizerischen Gesamtenergiestatistik (BFE, 2020)

Der Einsatz von 39 PJ Holz und Holzkohle auf Ebene des Endenergieverbrauchs erfolgt grösstenteils in den Haushalten (47%), daneben sind Industrie (29 %) und Dienstleistungen (22 %) weitere relevante Einsatzfelder. Ein kleiner Anteil wird in der Landwirtschaft eingesetzt.

Aus der oben beschriebenen Abschätzung der nachhaltigen Biomassepotenziale ergeben sich die in Abbildung 14 dargestellten Potenzialausnutzungsgrade. Während insbesondere beim Biogas das nachhaltige Potenzial noch grossenteils unerschlossen ist, zeigt sich bei der festen Biomasse und bei den Biotreibstoffen eine Überschreitung der in Abschnitt 3 hergeleiteten Potenziale. Bei der festen Biomasse ist dies insbesondere auf das im Vergleich zum heutigen Verbrauch niedrige nachhaltige Potenzial zur energetischen Abfallverwertung zurückzuführen. Im Fall der biogenen Treibstoffe ist die Potenzialüberschreitung dadurch begründet, dass die langfristigen Importmöglichkeiten nachhaltiger Biotreibstoffe unter Berücksichtigung der global zunehmenden Nachfrage begrenzt sind. Langfristig kann die inländische Nachfrage an Biotreibstoffen gedeckt werden, indem durch Einsatz von Umwandlungstechnologien (Abschnitt 4) Teile der festen und gasförmigen Biomassen in Biotreibstoffe umgewandelt werden.

Abbildung 14: Potenzialausnutzungsgrade im Jahr 2019

Gegenüberstellung aktueller Energieverbräuche und langfristig nachhaltiger Potenziale, Potenzialausnutzungsgrade als Prozentzahlen dargestellt.



Quelle: eigene Darstellung auf Basis (BFE, 2020; E-CUBE Strategy Consultants, 2018; Oliver Thees et al., 2017; Prognos AG et al., 2021)

6 Einsatz von Biomasse in den Szenarien

In den Energieperspektiven 2050+ wurden vier Zielszenarien definiert. Für die Berechnung der Energieumwandlung wurden für jedes Szenario unterschiedliche Ausprägungen berechnet, die sich hinsichtlich der Laufzeit der Kernkraftwerke (*KKW-Laufzeit 50 Jahre, KKW-Laufzeit 60 Jahre*) sowie der erzeugungsseitigen Rahmenbedingungen (*aktuelle Rahmenbedingungen, Ausbauziele des Bundesrates/Richtwerte des Energiegesetzes, ausgeglichene Jahresbilanz*) unterscheiden. Diese Ausprägungen haben keinen Einfluss auf die Energieverbräuche in den Nachfragesektoren. Im Folgenden werden die Szenarienergebnisse mit einer KKW-Laufzeit von 50 Jahren beschrieben. Beim Szenario Weiter wie bisher wird von einem *Fortbestand der aktuellen Rahmenbedingungen* ausgegangen, während die hier beschriebenen ZERO Szenarien von einer *ausgeglichene Jahresbilanz* im Jahr 2050 ausgehen.

6.1 Szenario Weiter wie bisher

Das Szenario Weiter wie bisher (WWB) beschreibt eine Fortschreibung der bisher beobachtbaren Entwicklung. Dieses Szenario bildet die heute in Kraft gesetzten Instrumente der Energie- und Klimapolitik sowie die heutigen Marktbedingungen und sonstigen Rahmenbedingungen im Strommarkt ab (zum Stand 01.01.2019). Ein autonomer technischer Fortschritt wird unterstellt. Gegenwärtig in Diskussion befindliche, aber noch nicht in Kraft getretene Massnahmen werden in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

Die Entwicklung der energetischen Nutzung von Biomasse im Szenario WWB ist in Abbildung 15 dargestellt. Der Gesamtverbrauch setzt sich zusammen aus jenem der Endenergieverbrauchssektoren Haushalte, Dienstleistungen, Verkehr und Industrie sowie dem Einsatz im Energieumwandlungssektor, wo Biomassen insbesondere zur Erzeugung von Elektrizität und Fernwärme eingesetzt werden. Im Ex-Post-Zeitraum bis 2019 wies der Biomasseverbrauch in allen Sektoren eine steigende Tendenz auf. Insgesamt steigt der Bruttoenergieverbrauch im Zeitraum zwischen 2000 und 2010 um 33 % auf 72 PJ an und nimmt in der darauffolgenden Dekade um weitere 24 % zu (2019: 89 PJ). Absolut gesehen nimmt der Biomasseeinsatz im Umwandlungssektor am stärksten zu (+15 PJ ggü. 2000). Die zweitstärkste Steigerung fand im Verkehrssektor statt (+8 PJ ggü. 2000), der Grossteil davon in den Jahren 2015 bis 2019.

Aktuell ist der Umwandlungssektor der bedeutendste Verbrauchssektor für Biomasse. Auf diesen gehen 39 % des Gesamtverbrauchs im Jahr 2019 zurück. Der Haushalts- und Industriesektor sind mit 21 % bzw. 20 % die zweit- und drittbedeutendsten Verbraucher. Nach der starken Zunahme des Biomasseeinsatzes im Verkehrssektor ist dessen Verbrauchsanteil im Jahr 2019 mit 9 % annähernd auf dem gleichen Niveau wie der des Dienstleistungssektors (11 %).

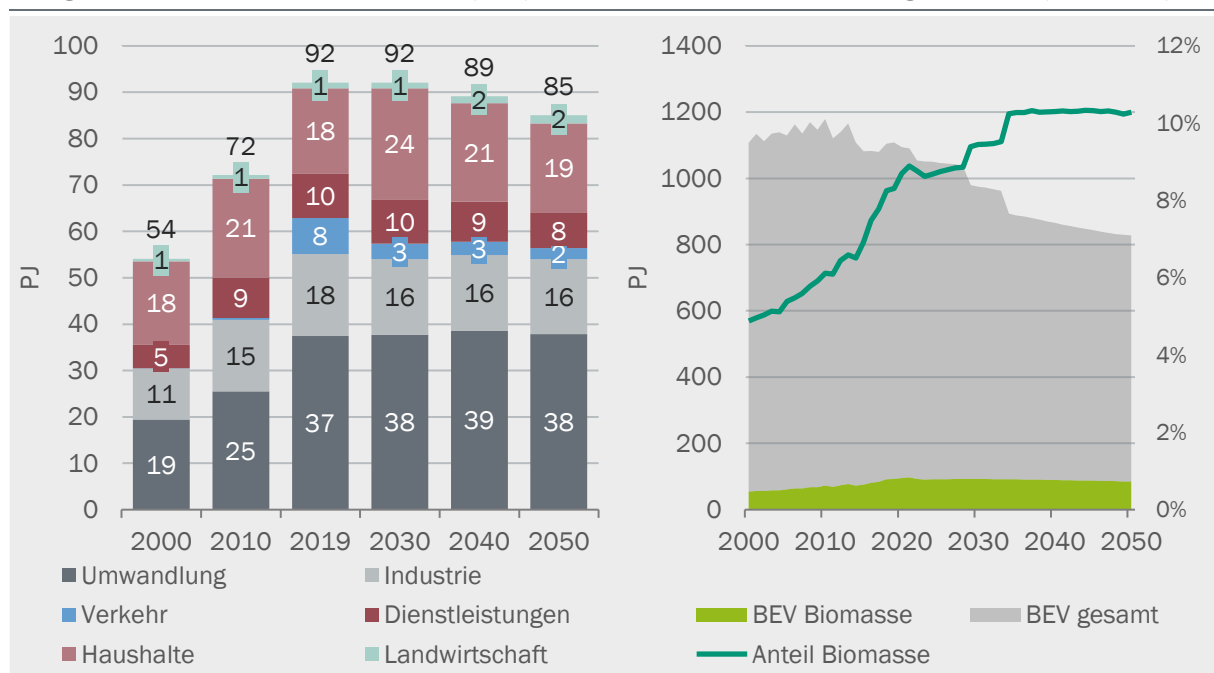
Die relative Bedeutung der Verbrauchssektoren ändert sich im Szenarioverlauf bis 2050 nur geringfügig. Eine Ausnahme stellt der Verkehrssektor dar, dessen Anteil bereits bis 2030 wieder auf 4 % absinkt und langfristig auf 3 % im Jahr 2050 zurückgeht. Grund für den kurzfristig starken Rückgang ist die Änderung rechtlichen Rahmenbedingungen, aufgrund derer Biotreibstoffe ab

2024 nicht mehr von der Mineralölsteuer befreit sind⁴ (Abschnitt 2.2). Langfristig nimmt durch die weitgehende Elektrifizierung des Landverkehrs die Bedeutung von Treibstoffen insgesamt ab. Die Biomasseverbrauchs-niveaus in den Sektoren Umwandlung und Industrie bleiben im Szenarioverlauf nahezu unverändert. Demgegenüber stellt sich im Haushalts- und Dienstleistungssektor nach 2030 eine rückläufige Bewegung ein. Hauptgrund hierfür sind die langfristig zur Verfügung stehenden kostengünstigeren emissionsarmen Alternativtechnologien zur Gebäudeheizung, welche zunehmend in den Bestand diffundieren.

Die Veränderung der Sektorverbräuche führt dazu, dass der Biomasseverbrauch insgesamt im Szenariozeitraum abnimmt (Abbildung 15). Der Anteil am Bruttoenergieverbrauch steigt hingegen bis zum Jahr 2035 auf rund 10 % an und verbleibt ungefähr auf diesem Niveau (Anteil 2050: 9.8 %).

Abbildung 15: Biomasseinsatz im Szenario Weiter wie bisher

Energieeinsatz im Zeitverlauf nach Sektoren (links) und Biomassenanteil am Bruttoenergieverbrauch (BEV; rechts)



Die hier angegebenen Werte unterscheiden sich geringfügig von jenen im Kurzbericht EP2050+ (Prognos AG et al., 2020) aufgrund von Rundungsdifferenzen.

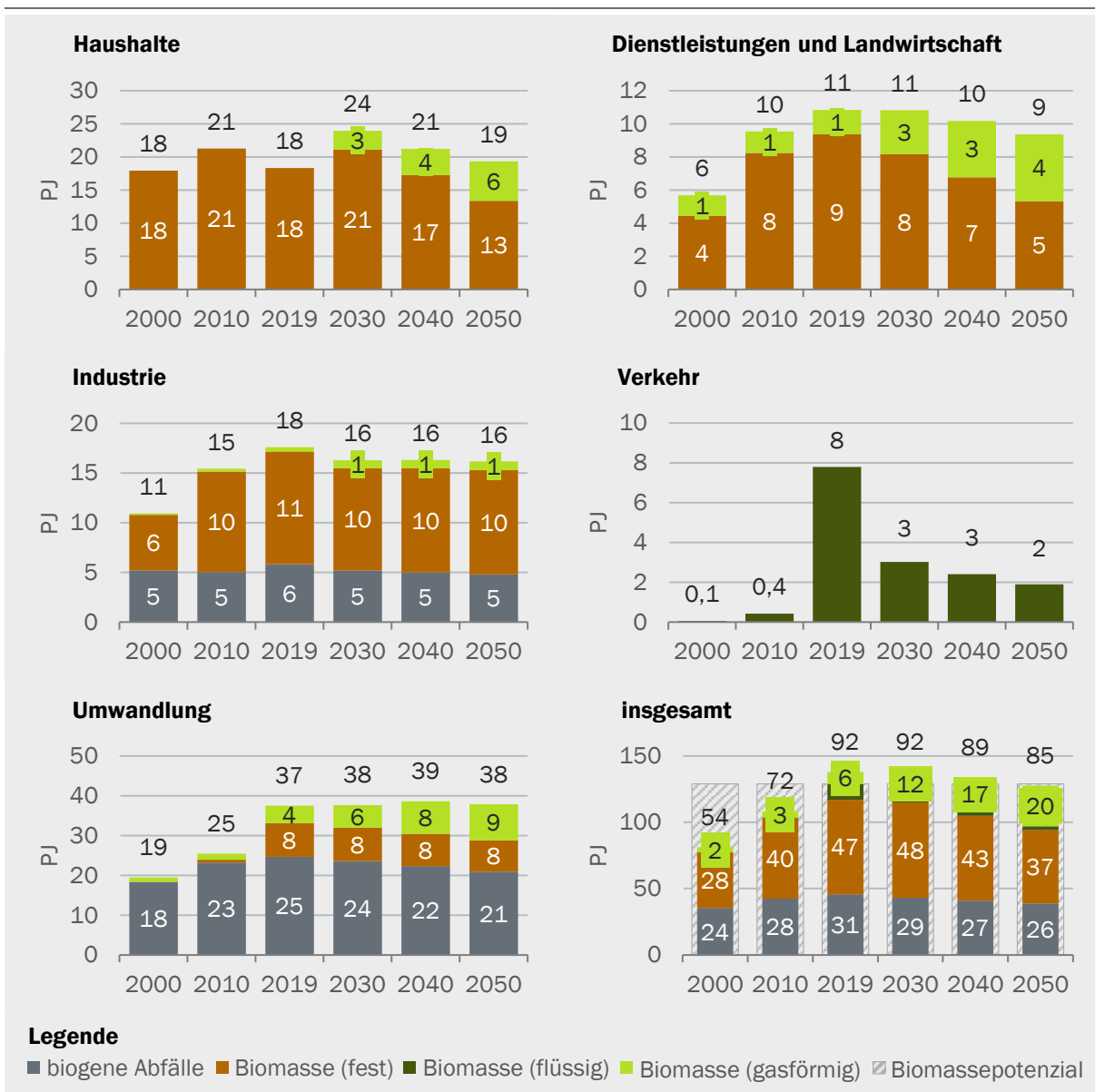
Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infrac

Die Sektorverbräuche der unterschiedlichen biogenen Energieträger ist in Abbildung 16 dargestellt. Es wird deutlich, dass Energieholz aktuell der bedeutendste Bioenergieträger im Haushalts- und Dienstleistungssektor ist. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit von dem ins Gasnetz beigemischten Biomethan, nimmt der Anteil von Biomethan an den Sektorverbräuchen in der Szenario-rechnung ab dem Jahr 2019 kontinuierlich zu. Die Struktur der Bioenergieträger im Industriesektor bleibt im Verlauf des Szenarios WWB nahezu unverändert, da es sich im Wesentlichen um die

⁴ Zur Zeit der Modellierung stand eine Verlängerung der Steuerbefreiung nur bis Ende 2021 zur Diskussion. Entsprechend ist der Rückgang im Modell bereits ab 2022 angesetzt. Aktuell steht eine parlamentarische Initiative (21.466) im Raum, die eine Verlängerung bis 2030 fordert. Sie wurde noch nicht diskutiert.

Verwertung von Abfällen bzw. biogenen Nebenprodukten handelt, die weiterhin in etwa gleichem Masse anfallen. Im Umwandlungssektor stellt der biogene Anteil des Abfalls, welcher in Kehr-richtverwertungsanlagen energetisch genutzt wird, sowohl aktuell als auch langfristig den bedeutendsten biogenen Energieträger dar. Ähnlich wie beim Haushalts- und Dienstleistungssektor nimmt nach 2019 der Anteil an Biogas zu. Bei der festen Biomasse erfolgt kein weiterer Zubau im Szenario WWB aufgrund der ausbleibenden Wirtschaftlichkeit. Erdgas bleibt für kleinere dezentrale WKK-Anlagen aus Kostengründen attraktiver.

Abbildung 16: Biomasseeinsatz in den Sektoren im Szenario Weiter wie bisher



Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

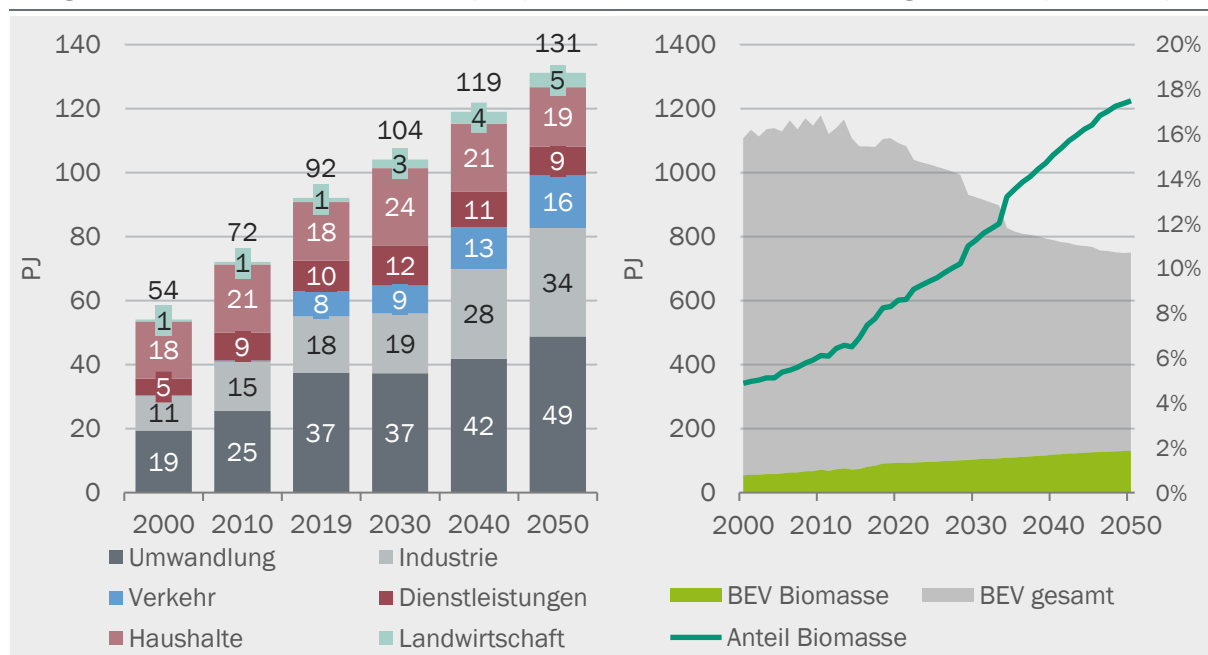
6.2 Klimazielszenarien – Szenario ZERO

6.2.1 ZERO Basis

Im Netto-Null Szenario der Variante ZERO Basis steigt der Biomasse-Einsatz bis ins Jahr 2050 kontinuierlich an und beträgt dann 131 PJ (Abbildung 17). Das nachhaltige Biomassepotenzial von 129 PJ wird damit langfristig ausgeschöpft und in einzelnen Jahren leicht überschritten. Gegenüber dem WWB-Szenario liegt der Biomasseverbrauch im Jahr 2050 um knapp 60 % höher.

Abbildung 17: Biomasseeinsatz im Szenario ZERO Basis

Energieeinsatz im Zeitverlauf nach Sektoren (links) und Biomassenanteil am Bruttoenergieverbrauch (BEV; rechts)



Die hier angegebenen Werte unterscheiden sich geringfügig von jenen im Kurzbericht EP2050+ (Prognos AG et al., 2020) aufgrund von Rundungsdifferenzen.

Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infrac

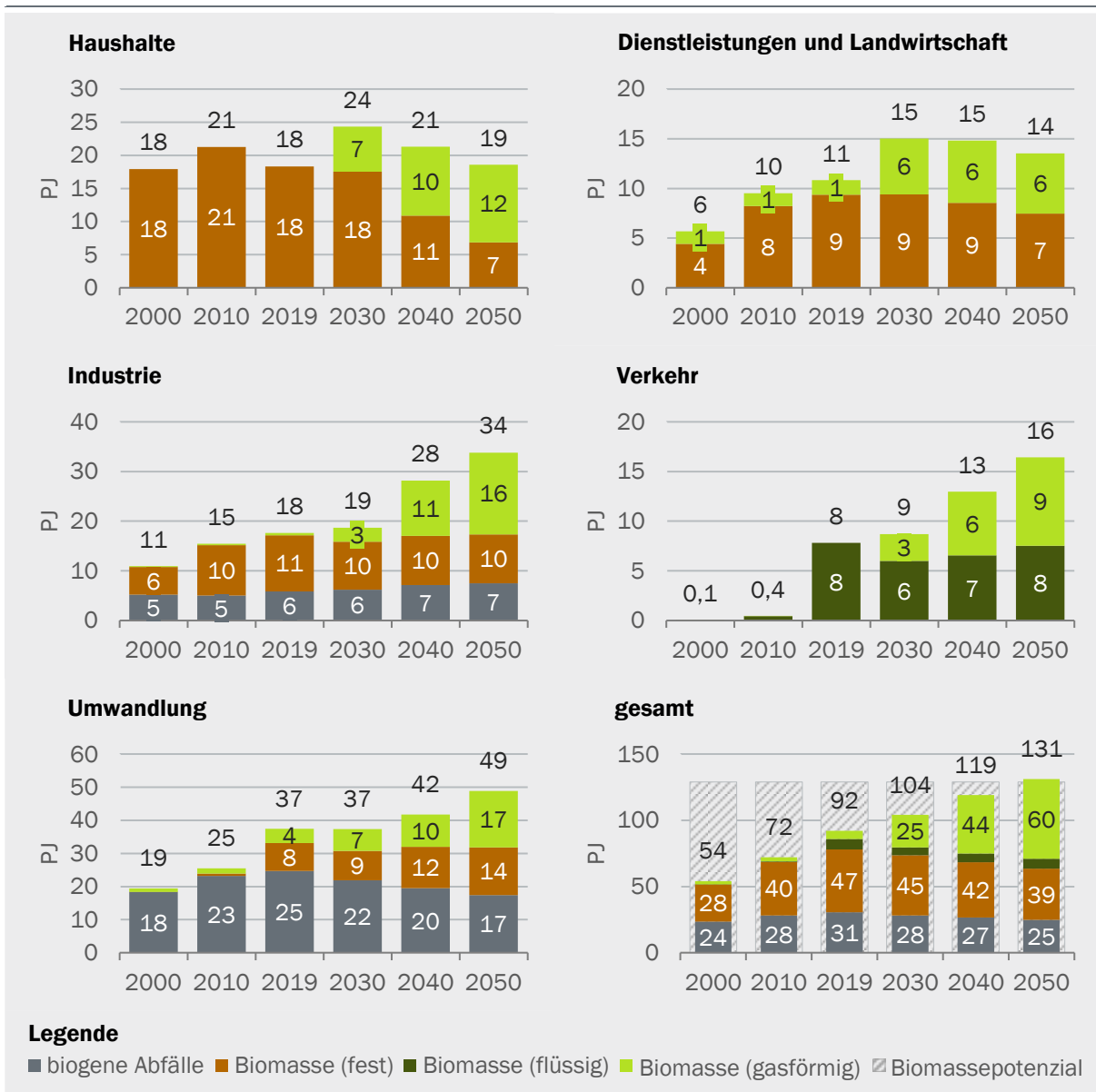
Bis 2030 steigt der Biomasseeinsatz in allen Sektoren deutlich an und liegt im Sektordurchschnitt auf einem um 13 % höheren Niveau als im Jahr 2019. Der steigende Trend setzt sich in den Sektoren Industrie, Umwandlung und Verkehr auch im Zeitraum bis 2050 fort. Demgegenüber stellt sich in den Sektoren Private Haushalte und Dienstleistungen nach 2030 eine Trendumkehr ein, da alternative Heizungstechnologien wie Wärmepumpen oder Fernwärme an Bedeutung gewinnen und der Einsatz von Biomassen in anderen Sektoren zur Befuerung von Hochtemperaturprozessen und die Erzeugung von negativen Emissionen priorisiert wird.

Die Vorgabe, im Jahr 2050 das Netto-Null-Ziel zu erreichen, führt dazu, dass zu dieser Zeit der Ersatz fossiler Energieträger durch klimaneutrale Alternativen in allen Sektoren nahezu komplett ist.

Im Laufe der darauffolgenden Dekade nimmt der Biomasseeinsatz in allen Nachfragesektoren wieder etwas ab, was auf Steigerungen in der Energieeffizienz zurückzuführen ist.

Bedingt durch die Entwicklungen der Einsätze in den Sektoren steigt der Biomasseanteil am Bruttoenergieverbrauch im Szenario ZERO Basis bis 2050 kontinuierlich auf 17 % an (WWB: 10 %) und verbleibt auf diesem Niveau.

Abbildung 18: Biomasseeinsatz in den Sektoren im Szenario ZERO Basis



Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

Der Einsatz der verschiedenen Bioenergieträger in den Sektoren ist in Abbildung 18 dargestellt. In den Sektoren Private Haushalte und Dienstleistungen/Landwirtschaft zeigt sich gegenüber dem

WWB-Szenario eine deutlich stärkere Zunahme von Biogas in Form von eingespeistem Biome-
than. Der Biomethananteil im Gasnetz steigt langfristig auf 100 %. In den Gebäuden werden ne-
ben Gas-Brennwertkesseln teilweise auch Gas-Wärmepumpen und Gas-Blockheizkraftwerke ein-
gesetzt. Auch zu Nahwärmeverbunden zusammengesessene Gebäude erhalten ihre Energie-
versorgung teilweise durch Holz und Biogas, insbesondere zur Abdeckung der Leistungsspitzen.
Der Verbrauch an Holz nimmt hingegen sowohl im Sektor Private Haushalte auch im Sektor
Dienstleistungen/Landwirtschaft im Zeitverlauf ab.

In der Industrie werden Hochtemperaturprozesse verstärkt durch Biomethan befeuert. Feste Bio-
masse kommt zur Bereitstellung von Nieder- und Mitteltemperaturprozesswärme und in geringem
Ausmass für Gebäudebeheizung zum Einsatz. Während der Einsatz von Biogas in dem Zeitraum
nach 2019 insgesamt stark zunimmt, bleibt das Verbrauchsniveau fester Biomasse nahezu kon-
stant. Die energetische Verwendung von Abfällen in der Industrie nimmt im Szenarioverlauf ge-
ringfügig zu, weil von einem höheren Abfallanteil in der Befeuerung von Zementöfen ausgegangen
wird. Da diese langfristig mit CCS-Technologie ausgestattet sind, können durch den Einsatz von
Biomasse negative Emissionen erzeugt werden (BECCS).

Im Verkehrssektor sinkt der Einsatz von flüssigen Biotreibstoffen zunächst geringfügig von 8 PJ
im Jahr 2019 auf 6 PJ im Jahr 2030. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Befreiung bioge-
ner Triebstoffe von der Mineralölsteuer wegfällt. Langfristig steigt der Einsatz von Biotreibstoffen
wieder auf 8 PJ im Jahr 2050 an. Der Bedarf an Biotreibstoffen liegt somit durchgängig über dem
in Abschnitt 3 hergeleiteten nachhaltigen Importpotenzial von knapp 6 PJ. Für das Szenario ZERO
Basis wird unterstellt, dass die Diskrepanz mittels Biomass-To-Liquid-Technologien aus verholzter
Biomasse gewonnen wird⁵, da die übrigen biogenen Quellen mit der Herstellung von Biogas aus-
geschöpft sind und alternative Bereitstellungsverfahren über Power-To-Liquid-Technologien ineffi-
zienter wären. Für die Konversion wurde ein pauschaler Umwandlungsfaktor von 60 % unterstellt.
Neben flüssigen Biotreibstoffen werden bei den schweren Nutzfahrzeugen verstärkt Gasantriebe
eingesetzt, die ab 2026 zu 100 % mit Biogas betrieben werden. Bei leichten Nutzfahrzeugen und
Personenwagen spielt diese Technologie jedoch nur eine kleine Rolle und wird längerfristig von
den Herstellern nicht mehr angeboten.

Im Umwandlungsbereich findet kein weiterer Zubau von Wärme-Kraftkopplung mit fester Bio-
masse statt. Vor allem ab 2030 werden vermehrt dezentrale Biogas-Wärme-Kraftkopplungsanla-
gen zugebaut, die stromgeführt betrieben werden und bei denen die Auskopplung von Wärme
folglich nicht im Fokus steht. In Fernwärmenetzen werden bestehende Gaskraftwerke durch Gas-
Wärme-Kraftkopplungsanlagen ersetzt, die langfristig ausschliesslich mit Biomethan befeuert und
vor allem wärmegeführt betrieben werden. Die Anlagen leisten wichtige Beiträge zur Abdeckung
der Spitzenlast im Wärmenetz. Der Umwandelungseinsatz biogener Abfälle in den Kehrrechtverwer-
tungsanlagen ist rückläufig, da ein zunehmender Teil der Siedlungsabfälle separat gesammelt
und der Vergärung zugeführt wird (vgl. Abschnitt 3.2). Des Weiteren wird in den Zero-Szenarien
davon ausgegangen, dass ein zunehmender Teil der Siedlungsabfälle (ca. 4 PJ im Jahr 2050) in
Zementwerken energetisch verwendet wird, anstelle in Kehrrechtverwertungsanlagen verbrannt zu
werden. Dies wird dadurch begründet, dass auf diese Weise der Einsatz fossiler Energieträger in
der Zementherstellung reduziert werden können, so dass sich der gesamtsystemische Nutzen
des Abfalleinsatzes erhöht, zumal die Zementwerke selbst oftmals weitere Energieeffizienzmass-
nahmen umgesetzt haben, wie eine Abwärmeauskopplung in das Fernwärmenetz oder die Nut-
zung von Prozessabwärme zur Stromerzeugung in ORC-Anlagen. Durch den Einsatz von Carbon-
Capture-Storage (CCS) bei grossen Biomasse-Kraftwerken, Kehrrechtverwertungsanlagen und Ze-
mentwerken werden nach 2040 negative Emissionen erzeugt, die einen zusätzlichen Beitrag zur

⁵ In den Energieperspektiven 2050+ ist dieser Verbrauch in der Kategorie „biogene Treibstoffe“ subsumiert.

Erreichung des Netto-Null-Ziels leisten. Im Jahr 2050 wird ebenfalls ein sehr geringer Teil fester Biomasse als Massnahme zur Erzeugung von Negativemissionen eingesetzt, indem sie in Form von Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Böden eingearbeitet wird, wodurch neben dem Klimanutzen auch landwirtschaftliche Vorteile einhergehen können.

6.2.2 Variante ZERO A

Im Szenario ZERO A wird eine verstärkte Elektrifizierung der Endenergienachfrage unterstellt. Dies hat zur Folge, dass der langfristige Hochlauf des Biomasseeinsatzes in den meisten Nachfragesektoren weniger stark ausfällt als im Szenario ZERO Basis. Eine Ausnahme stellen die Sektoren Dienstleistungen und Landwirtschaft dar, wo sowohl der Biomasseeinsatz als auch der Elektrifizierungsgrad in beiden Szenariovarianten sehr ähnlich ausfallen. Insgesamt fällt der Biomasseverbrauch im Szenario ZERO A geringer aus als im Szenario ZERO Basis. Der maximale Verbrauch wird um das Jahr 2045 mit rund 120 PJ erreicht. Das einheimische nachhaltige Biomassepotenzial wird vollständig ausgenutzt, das unterstellte Importpotenzial wird hingegen nur teilweise ausgeschöpft.

Im Haushaltssektor steigt der Biomasseverbrauch mittelfristig mit 29 PJ im Jahr 2030 auf ein höheres Niveau an als in der Basisvariante (Abbildung 19). Die Beimischung von Biomethan ins Gasnetz und der damit verbundene Verbrauch an Biomethan in Privaten Haushalten fällt im Szenario ZERO A bis zum Jahr 2040 in etwa gleich aus wie im Szenario ZERO Basis. Der Rückgang der Holzheizungen verläuft im Szenario A hingegen etwas langsamer, dadurch erklärt sich der insgesamt leicht höhere Biomasseverbrauch im Jahr 2030. Langfristig steigt der Anteil der mit Wärmepumpen versorgten Wohnflächen auf rund 80 % im Jahr 2050. Dies führt, neben der verbesserten Energieeffizienz der Gebäudehüllen, zu einem verstärkten Rückgang im Biomasseeinsatz in den Wohngebäuden. Der Biomasseverbrauch in den Wohngebäuden verringert sich auf 15 PJ im Jahr 2050 (ZERO Basis: 19 PJ).

Auch in der Industrie erfolgt eine weitgehende Elektrifizierung der Prozesswärmebereitstellung, insbesondere in der Nahrungsmittelbranche sowie der Papier-, Stahl- und Glasindustrie. Durch die Umstellung auf elektrische Wärmebereitstellungstechnologien fällt die Notwendigkeit der Substitution fossiler Energieträger durch biogene Alternativen weniger stark aus. Der Biomasseeinsatz steigt von 18 PJ im Jahr 2030 auf ein Maximum von 30 PJ im Jahr 2050 an.

Im Verkehrssektor erfolgt ein verstärkter Ausbau der Elektromobilität. Dennoch kommen flüssige Treibstoffe im gleichen Ausmass zum Einsatz wie im Szenario ZERO Basis und werden insbesondere dort eingesetzt, wo Elektrofahrzeuge relevante Nachteile aufweisen. Für die Dekarbonisierung des schweren Nutzverkehrs wird ab 2040 von einem Aufbau eines elektrischen Überleitungsnetzes ausgegangen, der bis 2050 95 % des Autobahnnetzes abdeckt. Insgesamt steigt der Biomasseeinsatz im Verkehr von 8 PJ im Jahr 2030 auf ein Maximum von 11 PJ im Jahr 2050.

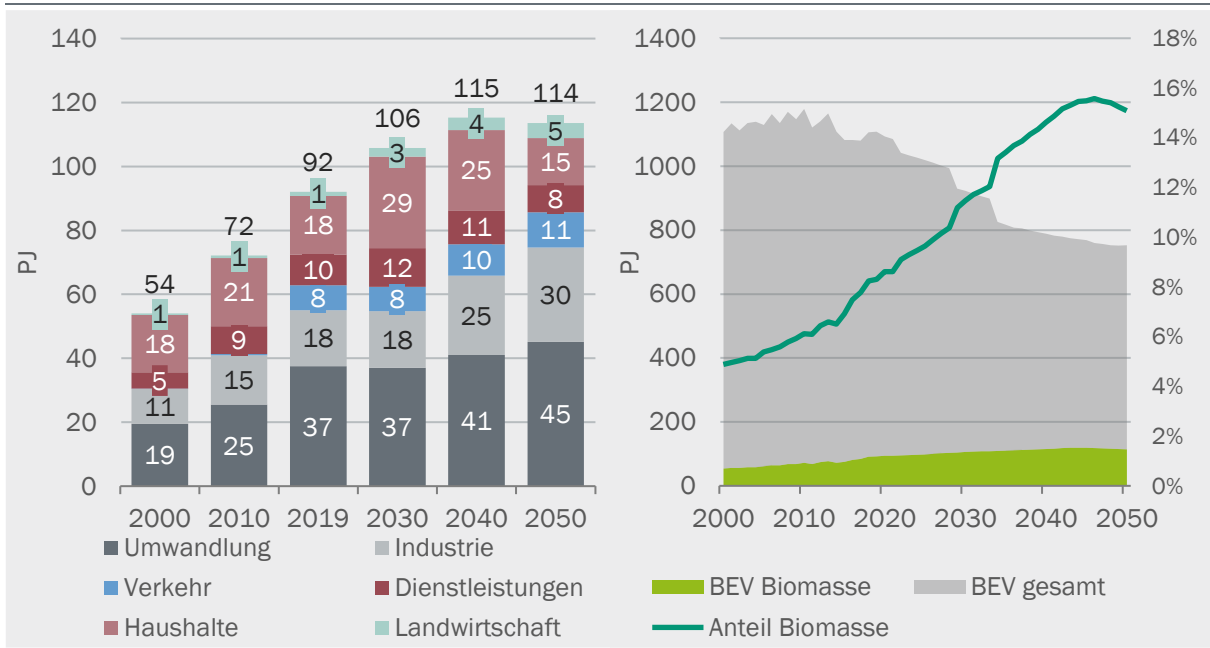
Wie auch in der Zero Basisvariante steigt der Biomasseeinsatz im Umwandlungssektor bis 2050 kontinuierlich an. Der erhöhten Stromnachfrage wird erzeugungsseitig in Szenario ZERO A jedoch hauptsächlich mit einem verstärkten Ausbau von Photovoltaikanlagen begegnet. Dieser erhöhte Ausbaupfad hat zur Folge, dass der Umwandlungseinsatz von Biomassen mit 45 PJ im Jahr 2050 etwas schwächer ausfällt als im Szenario ZERO Basis.

Insgesamt steigt der Biomasseanteil am Bruttoendverbrauch im Szenario ZERO A etwas weniger stark an als in der Basisvariante. Das Maximum wird mit 16 % im Jahr 2046 erreicht, danach

sinkt der Anteil mit der zunehmenden Elektrifizierung des Endenergieverbrauchs auf rund 15 % ab.

Abbildung 19: Biomasse-Einsatz im Klimazielszenario – Variante ZERO A

Energieeinsatz im Zeitverlauf nach Sektoren (links) und Biomassenanteil am Bruttoenergieverbrauch (BEV; rechts)



Die hier angegebenen Werte unterscheiden sich geringfügig von jenen im Kurzbericht EP2050+ (Prognos AG et al., 2020) aufgrund von Rundungsdifferenzen.

Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

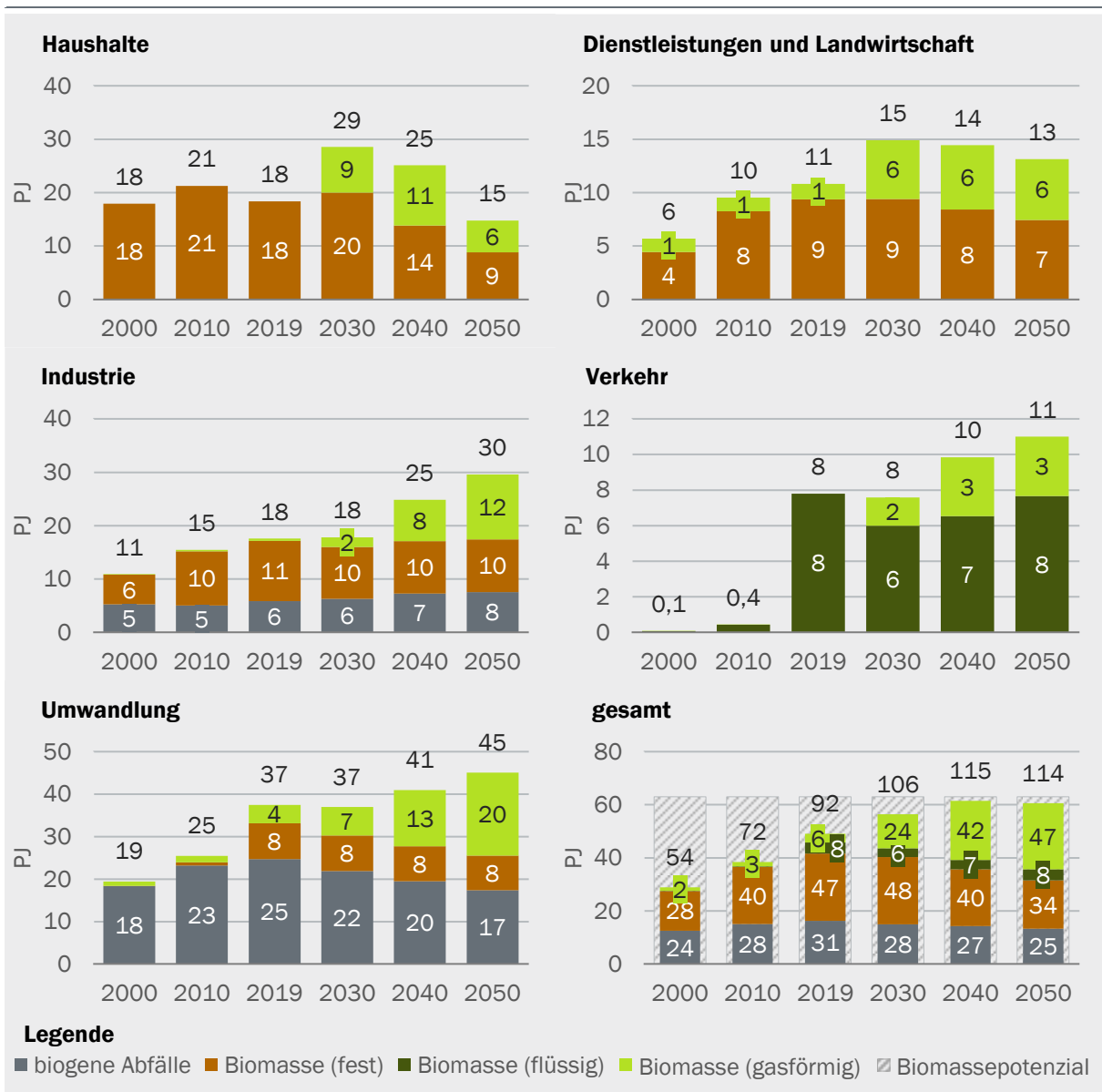
Eine detaillierte Sicht auf die Einsätze der verschiedenen biogenen Energieträger in den Sektoren gibt Abbildung 20. Während sich die Verbräuche von Dienstleistungen und Landwirtschaft zu jenen im Zero Basisszenario nur geringfügig unterscheiden, fällt der Einsatz von Biogas bei den privaten Haushalten langfristig geringer aus (2050: -6 PJ ggü. Zero Basis) und der Einsatz fester Biomasse etwas höher (2050: +2 PJ ggü. Zero Basis). In Szenario ZERO A bleibt die feste Biomasse mit Anteilen zwischen 60 und 70 % auch langfristig der bedeutendste biogene Energieträger.

In der Industrie sind die Verbräuche von fester Biomasse und biogener Abfälle bis 2050 in Summe nahezu unverändert gegenüber dem Szenario Zero Basis, mit Differenzen von jeweils weniger als 0.1 PJ. Die verstärkte Elektrifizierung der Prozesswärme in der Nahrungsmittelindustrie sowie der Papier-, Stahl- und Glasindustrie führt dazu, dass weniger Erdgas mit biogenem Gas ersetzt wird und der Biogaseinsatz im Jahr 2050 über 4 PJ geringer ausfällt als im Szenario Zero Basis.

Im Verkehrssektor führt vor allem die Einführung elektrischer Oberleitungen für den schweren Nutzverkehr in den Jahren 2040 und fortfolgenden zu einem deutlich niedrigeren Biogasverbrauch als im Szenario Zero Basis. Das Verbrauchsniveau biogener Treibstoffe bleibt nahezu unverändert und ist höher als nachhaltige Biotreibstoffpotenzial. In der Variante ZERO A werden die restlichen Biotreibstoffe durch Umwandlung von Biogas erzeugt.

Im Umwandlungssektor bleibt die energetische Verwertung der biogenen Abfälle in den Kehrichtverwertungsanlagen unverändert gegenüber dem Szenario Zero Basis. Auch die Strom- und Fernwärmeerzeugung aus Holz bleibt gegenüber dem Szenario Zero Basis unverändert. Der Umwandlungseinsatz von Biogas zur Strom- und Fernwärmeerzeugung steigt aufgrund des hohen Photovoltaikausbaus sowie der geringeren Fernwärmenachfrage weniger stark an und liegt im Jahr 2050 etwa 3 PJ unter dem Niveau des Szenario ZERO Basis. Da in der Variante ZERO A die Erzeugung biogener Treibstoffe auf Basis von Biogas erfolgt, bleibt der Energieverbrauch fester Biomasse im Umwandlungssektor insgesamt bis 2050 unverändert auf dem Niveau des Jahres 2020, während der Biogaseinsatz auf 20 PJ ansteigt

Abbildung 20: Biomasseeinsatz in den Sektoren im Szenario ZERO A



Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

6.2.3 Variante ZERO B

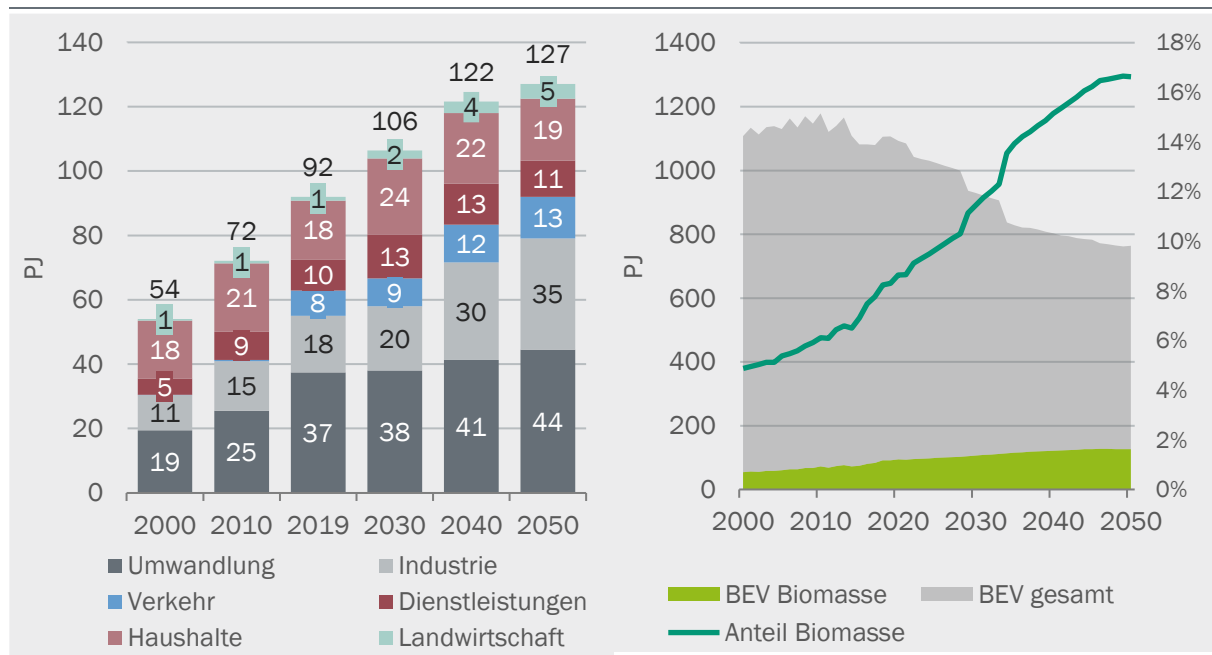
Die Variante ZERO B ist ein Szenario mit Gasfokus, in dem die Dekarbonisierung bevorzugt durch den Einsatz biogener und synthetischer Gase vorangetrieben wird. Der sich hierbei ergebende Biomasseeinsatz ist in Abbildung 21 dargestellt.

Insgesamt steigt der Biomasse-Einsatz von 106 PJ im Jahr 2030 auf 127 PJ im Jahr 2050. Das für die Modellierung angesetzte Biomassepotenzial wird dadurch vollständig ausgenutzt. Dabei erfolgt der Biomasseausbau in den Sektoren Private Haushalte, Dienstleistungen und Industrie etwas steiler als im Szenario ZERO Basis, so dass das Verbrauchsniveau in diesen Sektoren zwischen 2030 und 2050 um bis 2 PJ höher liegt. Demgegenüber werden im Verkehrs- und Umwandlungssektor weniger Biomassen eingesetzt und das Verbrauchsniveau liegt im Jahr 2050 zwischen 3 und 5 PJ unter dem des Basisszenarios.

Insgesamt steigt der Biomasseanteil am Bruttoenergieverbrauch über den Szenarioverlauf kontinuierlich an und erreicht im Jahr 2050 einen Anteil von 17 %.

Abbildung 21: Biomasse-Einsatz im Klimazielszenario – Variante ZERO B

Energieeinsatz im Zeitverlauf nach Sektoren (links) und Biomassenanteil am Bruttoenergieverbrauch (BEV; rechts)



Die hier angegebenen Werte unterscheiden sich geringfügig von jenen im Kurzbericht EP2050+ (Prognos AG et al., 2020) aufgrund von Rundungsdifferenzen.

Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

Die Verteilung der verschiedenen Biomassen auf die Sektoren ist in Abbildung 22 näher dargestellt. Bei den Haushalten ist die Verbrauchsstruktur derjenigen im Szenario ZERO Basis sehr ähnlich. In den Jahren 2030 bis 2050 kommen geringfügig mehr feste Biomassen und Biome than zum Einsatz. Wie auch in der Basisvariante kommen neben Gas-Brennwertkesseln vermehrt

Gas-Wärmepumpen (Gas-WP) und Gas-Blockheizkraftwerke (Gas-BHKW) zum Einsatz. Neben Biomethan wird im Szenario ZERO B auch synthetisches Methan (PtG) in das Gasnetz eingespeist, so dass sich der Biogasverbrauch gegenüber dem Basisszenario nicht wesentlich erhöht.

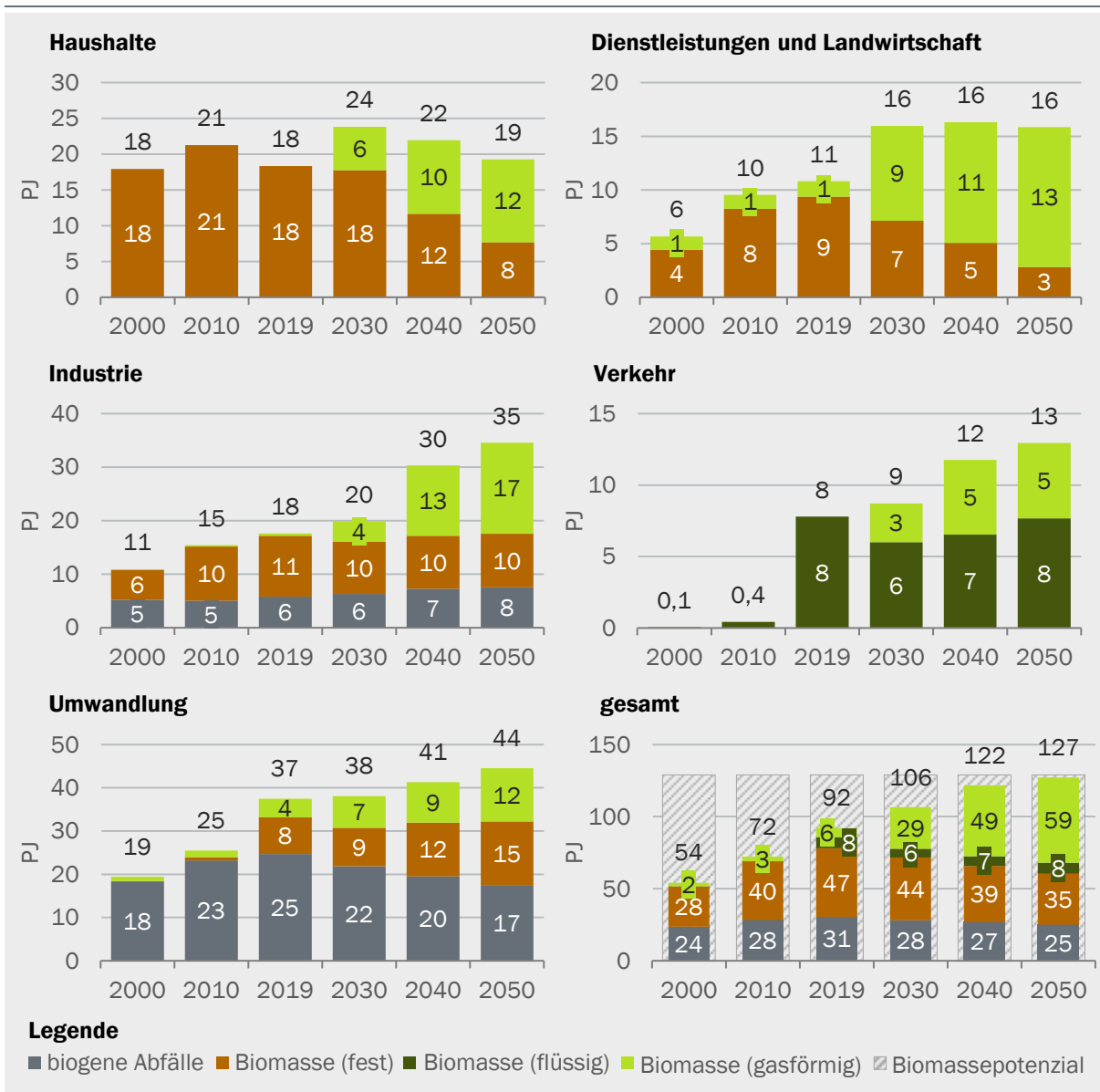
Ähnlich wie im Haushaltssektor verhält es sich in der Industrie, wo sich die Verbrauchsstruktur biogener Energieträger nur geringfügig von derjenigen der Basisvariante unterscheidet. Auch hier kommt neben Biomethan langfristig synthetisches Methan zum Einsatz, primär zur Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme. Während das Verbrauchsniveau von Biogas leicht über dem in der Basisvariante liegt, erfolgt der Einsatz fester Biomasse und biogener Abfälle nahezu unverändert.

In dem Sektoren Dienstleistungen und Landwirtschaft ist das Verbrauchsniveau von Biomasseenergie insgesamt etwas höher als in der Basisvariante und es wird ein höherer Anteil der Bioenergie in Form von Biogas eingesetzt.

Im Verkehrssektor erfolgt der Einsatz flüssiger Biotreibstoffe analog zum Szenario ZERO Basis. Auch in der Variante ZERO B wird beim schweren Nutzverkehr mittel- bis langfristig verstärkt auf Biogasantriebe gesetzt. Die Nachfrage nach Biogas bleibt in ZERO B längerfristig allerdings unter der vom Basisszenario, weil in B deutlich mehr Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff betrieben werden.

Im Umwandlungssektor kommt langfristig deutlich weniger Biogas zum Einsatz als im Szenario ZERO Basis, da dieses in grösserem Masse in den Endenergieverbrauchssektoren zum Einsatz kommt. Der Einsatz fester Biomassen und biogener Abfälle erfolgt hingegen analog zu der Basisvariante.

Abbildung 22: Biomasseeinsatz in den Sektoren im Szenario ZERO B



Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

6.2.4 Variante ZERO C

Im Szenario ZERO C erfolgt die Dekarbonisierung mit einem Fokus auf flüssige Energieträger und Wärmenetze. Die sich in diesem Szenario ergebenden Biomasseverbräuche sind in Abbildung 23 dargestellt.

Im Haushaltssektor steigt der Biomasseeinsatz mittelfristig auf 26 PJ im Jahr 2030, was auf die verstärkte Beimischung von Biomethan ins Gasnetz zurückzuführen ist. In den Jahren danach erfolgt eine Trendumkehr aufgrund des zunehmenden Anteils fernwärmeversorgter Gebäude am Gebäudepark und der Verbrauch geht kontinuierlich auf 17 PJ im Jahr 2050 zurück. Langfristig

wird über 40% der Wohnfläche bei Mehrfamilienhäusern mit Wärmenetzen versorgt. Bei den Ein- bis Zweifamilienhäusern steigt der Anteil auf rund 20%.

Eine vergleichbare Entwicklung findet im Dienstleistungssektor statt, wo der Biomasseverbrauch bis 2030 auf 15 PJ ansteigt und bis 2050 wieder auf bis zu 7 PJ zurückgeht. Somit weisen sowohl der Haushalts- als auch der Dienstleistungssektor für den Zeitraum 2030 bis 2050 zwischenzeitlich einen leicht höheren Biomasseverbrauch auf als im Szenario ZERO Basis. Dies ist dadurch begründet, dass synthetisches Heizöl aufgrund der aktuell noch geringen technischen Reife erst in den Jahren nach 2040 in das System kommen und der Biomassesubstitution in den Jahren davor somit eine grössere Rolle zukommt.

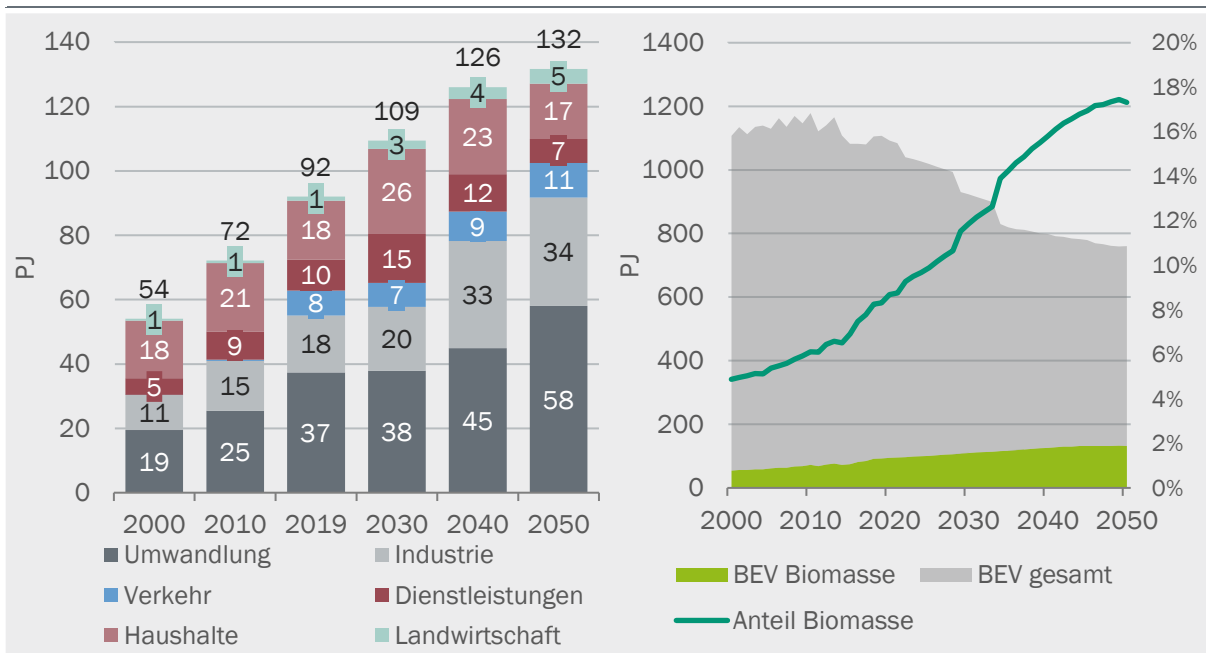
Im Verkehrssektor steigt der Biomasseeinsatz bis zum Jahr 2050 kontinuierlich auf 11 PJ (+4 PJ ggü. 2030) und ist somit auf einem vergleichbaren Verbrauchsniveau wie im Szenario ZERO A.

Im Industriesektor steigt der Biomasseverbrauch im Zeitraum 2030 bis 2050 von 20 PJ auf das gleiche Niveau wie im Zero Basisszenario von 34 PJ.

Der deutlichste Zuwachs ist im Umwandlungssektor zu verzeichnen, wo der Biomasseeinsatz von 38 PJ im Jahr 2030 bis 2050 auf 58 PJ im Zuge des verstärkten Ausbaus erneuerbarer Fernwärmeerzeugungskapazitäten ansteigt.

Abbildung 23: Biomasse-Einsatz im Klimazielszenario – Variante ZERO C

Energieeinsatz im Zeitverlauf nach Sektoren (links) und Biomassenanteil am Bruttoenergieverbrauch (BEV; rechts)



Die hier angegebenen Werte unterscheiden sich geringfügig von jenen im Kurzbericht EP2050+ (Prognos AG et al., 2020) aufgrund von Rundungsdifferenzen.

Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infras

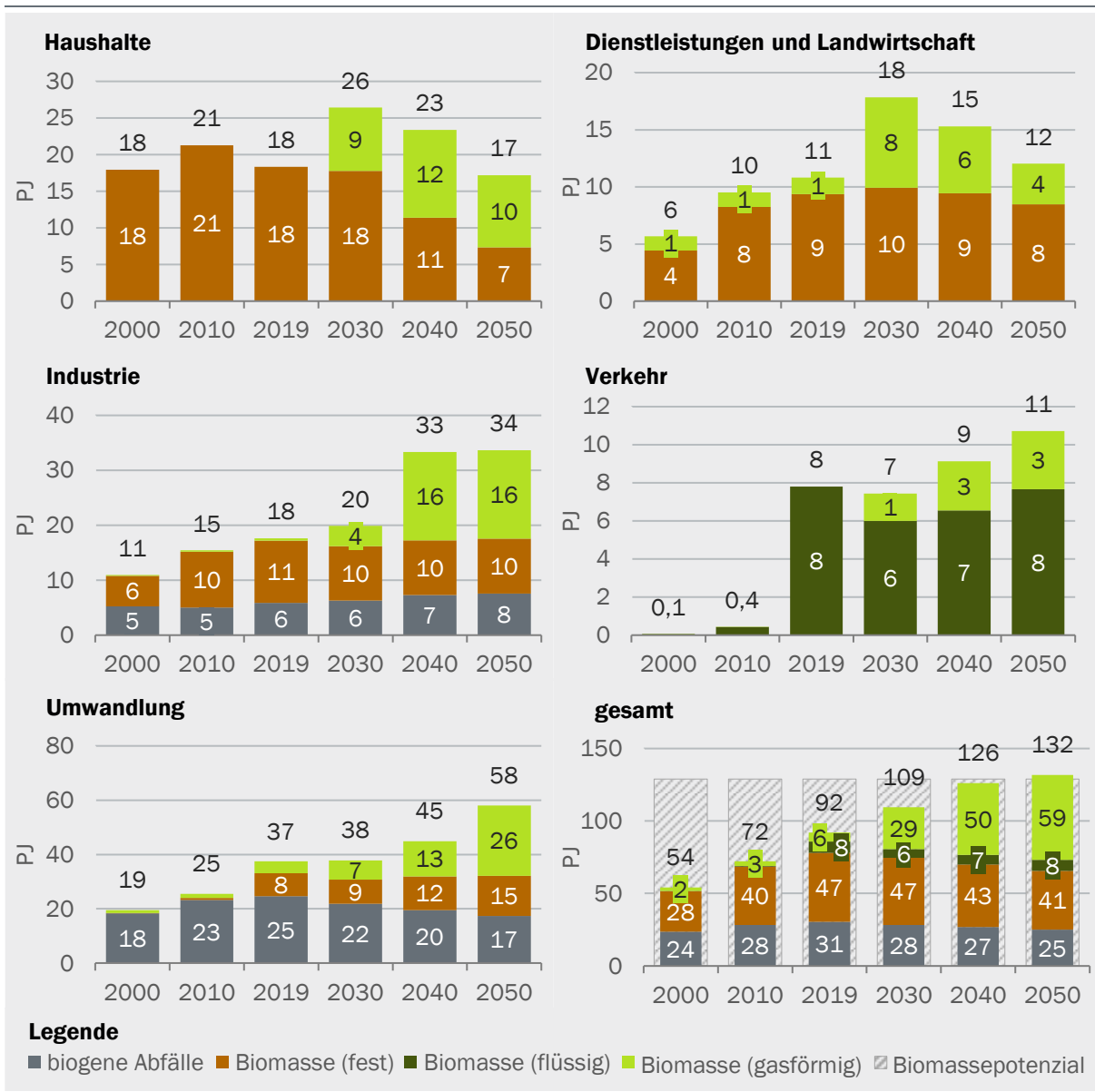
Die Verteilung der verschiedenen biogenen Energieträger auf die Sektoren ist in Abbildung 24 zusammengefasst. In den Sektoren Private Haushalte und Dienstleistungen inkl. Landwirtschaft unterscheidet sich der Einsatz fester Biomasse im Szenarioverlauf nur geringfügig von der ZERO Basisvariante. Der Biogaseinsatz ist im Zeitraum 2019 bis 2040 zwischenzeitlich höher als im Szenario ZERO Basis, bevor er in der darauffolgenden Dekade in Folge der zunehmenden Gebäudeeffizienz sowie des Fernwärmeausbaus stärker zurückgeht. Im Dienstleistungssektor bleibt Holz der wichtigste Bioenergieträger, während im Haushaltssektor nach 2040 das Biogas den höheren Verbrauchsanteil aufweist.

Ähnlich erfolgt auch im Industriesektor der Einsatz von biogenen Abfällen und fester Biomasse in nahezu gleicher Höhe wie im Szenario Zero Basis, während der Biogashochlauf im Zeitraum 2019 bis 2050 etwas steiler ausfällt als in der Basisvariante. Im Szenario Zero Basis wird Biogas ab dem Jahr 2035 der bedeutendste biogene Energieträger und steigt auf ein Maximum von 16 PJ im Jahr 2050 an, was einem Anteil von rund 48 % am Bioenergieverbrauch entspricht.

Die Bioenergieträgerstruktur im Verkehrssektor ähnelt stark jener in der Variante ZERO A, wo der Einsatz von flüssigen Biotreibstoffen in einem vergleichbaren Ausmass erfolgt wie in den übrigen Varianten, die Rolle von Gasantrieben in der Fahrzeugflotte jedoch weniger stark ausgeprägt ist.

Der höhere Biomasseverbrauch im Umwandlungssektor gegenüber dem Szenario Zero Basis ist ebenfalls hauptsächlich auf den Einsatz von Biogas zurückzuführen. Während die Entwicklung von biogenen Abfällen und fester Biomasse nahezu identisch ausfällt, steigt der Biogaseinsatz von 7 PJ im Jahr 2030 auf 26 PJ im Jahr 2050 und liegt damit um rund 50 % über dem Verbrauchsniveau im Szenario Zero Basis. Die Verbrauchszunahme ist vor allem auf den Ersatz bestehender Erdgas-WKK für die Strom- und Fernwärme-Versorgung durch Biogas-WKK zurückzuführen. Der Einsatz von Erdgas in der Strom- und Wärmeerzeugung läuft bis 2050 gegen Null. Ab 2030 werden auch weitere Biogas-Anlagen zur dezentralen Nutzung von Biogas-Potenzialen in Betrieb genommen.

Abbildung 24: Biomasseeinsatz in den Sektoren im Szenario ZERO C



Quelle: Eigene Berechnungen Prognos, TEP, Infrass

7 Zusammenfassung und Fazit

Biomassen bestehen aus gebundenem Kohlenstoff, welchen die Pflanzen (und andere Lebewesen) während ihrer Wachstumsphase als CO₂ aus der Umgebungsluft aufnehmen. Vernachlässigt man die mit der Ernte und dem Transport einhergehenden Vorkettenemissionen, kann die energetische Verwertung von nachhaltig erzeugter Biomasse als treibhausgasneutral angesehen werden, da mit ihrer Verbrennung das zuvor entnommene atmosphärische CO₂ lediglich wieder freigesetzt wird.

In den Szenariorechnungen für die Energieperspektiven 2050+ kommt der Biomasse eine tragende Rolle bei der Dekarbonisierung des Energiesystems zu. Biomassen kommen in allen Sektoren als Energieträger zum Einsatz und kommen in Form von fester Biomasse (Stückholz, Hackschnittel, Holzpellets), Biogas (Rohbiogas aus Vergärungsanlagen oder aufbereitet zu Biomethan), flüssiger biogener Treibstoffe (z.B. Biodiesel der zweiten Generation) sowie biogener Abfälle aus Siedlungen, Industrie und Gewerbe vor.

Das Potenzial von Biomasse zur nachhaltigen energetischen Nutzung ist begrenzt. Da biogene Energieträger ausgenommen der meisten biogenen Abfälle global gehandelte Güter darstellen, geht die Quantifizierung der langfristig verfügbaren Biomassequellen über eine Betrachtung der nationalen Begebenheiten hinaus und beinhaltet eine Abschätzung der Entwicklung der Produktionskapazitäten potenzieller Exportländer sowie der globalen Nachfrage biogener Güter und Energieträger. Die in den Energieperspektiven 2050+ angenommenen Grössen basieren auf Studien zum inländischen Biomassevorkommen (Oliver Thees et al., 2017), der Möglichkeit zur Einspeisung von erneuerbarem Gas in das Gasnetz (E-CUBE Strategy Consultants, 2018) sowie Abschätzungen zum langfristigen gesamteuropäischen Importpotenzial (IINAS, 2016; Prognos AG et al., 2021; Projekt BioTrade2020+, 2016), aus dem das Schweizerische Importpotenzial auf Grundlage der Schweizerischen Wirtschaftskraft abgeleitet wurde. Das nachhaltige inländische Potenzial an Primärbiomasse beträgt ca. 100 PJ. Wird unterstellt, dass der Grossteil der nicht holzigen Biomassen zur Herstellung von Biogas eingesetzt werden, können rund 75 PJ nutzbare Sekundärbiomasse erzeugt werden. Mit 84 PJ liegt der heutige Biomassenverbrauch in der Schweiz über dem inländischen Potenzial. Eine Steigerung des Biomasseeinsatzes ist durch verstärkte Importe möglich. Das Importpotenzial wird auf rund 60 PJ geschätzt, ein Grossteil davon in Form von Biomethan.

Der Einsatz der verschiedenen Bioenergieträger ist in den Sektoren unterschiedlich und variiert in den verschiedenen Szenariovarianten. Feste Biomassen spielen vor allem in den Sektoren Private Haushalte und Dienstleistungen für die Gebäudeenergieversorgung eine bedeutende Rolle, wobei der Anteil von Biogas je nach Szenario langfristig den der festen Biomasse teilweise übersteigt. In der Industrie spielt neben der festen Biomasse auch die Verwendung biogener Abfälle eine bedeutende Rolle. In den Zielszenarien kommt es langfristig zu einem immer stärkeren Einsatz von Biomethan zur Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme, die heute im Wesentlichen durch die Verbrennung von Erdgas erzeugt wird. Im Umwandlungssektor ist der in Kehrriechverwertungsanlagen genutzte biogene Abfall heute der wichtigste biogene Energieträger zur Strom- und

Fernwärmeerzeugung. Dies ändert sich in den Zielszenarien, in denen feste Biomassen und Biogas stärker in den Erzeugungsmix kommen und je nach Variante langfristig zum bedeutendsten biogenen Energieträger werden. Durch den verstärkten Einsatz biogener Energieträger in den Sektoren steigt der biogene Anteil am Bruttoendverbrauch in den Zielszenarien langfristig je nach Variante auf 16–18 % in den Jahren 2050 und fortfolgende an, während er im Szenario Weiter wie bisher bei 10 % liegt.

Nebst der Erzeugung von nahezu THG-emissionsfreier Wärme und Strom ist die Biomasse auch von hoher Bedeutung für die Erzeugung von negativen Emissionen. Werden Biomassefeuerungsanlagen und Kehrlichtverwertungsanlagen mit CCS kombiniert (BECCS) kann bei der Verbrennung das CO₂ abgeschieden und nachträglich dauerhaft gespeichert werden. Der Einsatz der Biomasse erfolgt deshalb langfristig prioritär in grossen Punktquellen, bei denen eine Ausstattung mit CCS-Technologie möglich ist. Weitere Optionen zur Generierung negativer Emissionen aus Biomasse stellt die Einarbeitung von Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Böden dar. Dafür wird Pflanzenkohle in einem pyrolytischen Verfahren aus holziger Biomasse gewonnen, bei dem das beim Prozess entstehende CO₂ abgeschieden und gespeichert wird (BECCS).

Literaturverzeichnis

- Althaus, H.-J., Wunderlich, A., Füssler, J., 2018.
Marktpotenzial für flüssige Biotreib- und Biobrennstoffe in der Schweiz 2020 –2030 (Schlussbericht). INFRAS, Zürich.
- Angustow, A., Thomas Kuchling, Wollmerstädt, H., 2017.
Herstellung THG-reduzierter flüssiger Kraft- und Brennstoffe. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Professur Reaktions-technik, im Auftrag des Instituts für Wärme und Oeltechnik IWO e.V.
- BFE, 2020.
Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2019. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- BFE, 2009.
Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz. Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- Biomasse Suisse, 2021.
Infografiken zum Thema Energie aus Biomasse [WWW Document]. Infografiken. URL <https://biomassesuisse.ch/infografiken> (accessed 2.5.21).
- E-CUBE Strategy Consultants, 2018.
Einspeisepotenzial von erneuerbarem Gas in das Schweizer Netz bis 2030. E-CUBE Strategy Consultants, Lausanne.
- EU-COM, 2011.
Impact Assessment Energy Roadmap 2050. Annex 1: Scenarios – assumptions and results (Commission Staff Working Paper). Europäische Kommission.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2016.
Leitfaden Biogas: von der Gewinnung zur Nutzung, 7. Auflage. ed, Bioenergie. Druckerei Weidner, Rostock.
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2014.
Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung, 5., vollständig überarbeitete Auflage. ed. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow-Prüzen.
- fahrBiogas, 2020.
InfraBiogas (Schlussbericht). Bundesamt für Energie BFE, Flurlingen.
- IEA, 2017a.
Energy Technology Perspectives 2017. International Energy Agency, Paris.

- IEA, 2017b.
Technology Roadmap: Delivering Sustainable Bioenergy. International Energy Agency, Paris.
- IINAS, 2016.
Biomass Policies Task 2.4: Sustainable Imports. Biomass Policies, Darmstadt, Madrid.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), 2014.
Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, NY.
- IRENA, 2014.
Global Bioenergy Supply and Demand Projections: A working paper for REmap 2030 (Endbericht). International Renewable Energy Agency.
- Klepper, G., Thrän, D., 2019.
Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik, (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München.
- Mai-Moulin, T., Visser, L., Fingerman, K.R., Elbersen, W., Elbersen, B., Nabuurs, G.-J., Fritsche, U.R., Del Campo Colmenar, I., Rutz, D., Diaz-Chavez, R.A., Roozen, A., Weck, M., Iriarte, L., Pelkmans, L., Sanchez Gonzalez, D., Janssen, R., Junginger, M., 2019.
Sourcing overseas biomass for EU ambitions: assessing net sustainable export potential from various sourcing countries. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13, 293–324.
- Naumann, K., Oehmichen, K., Remmele, E., Thuneke, K., Schröder, J., Zeymer, M., Zech, K., Müller-Langer, F., 2016.
Monitoring Biokraftstoffsektor, 3. Auflage. ed, DBFZ-Report. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig.
- O'Connor, I., Erny, I., Ribi, F., Spörri, A., Perch-Nielsen, S., 2020.
Stärken und Schwächen von Biogasanlagen (Literaturstudie). *energieschweiz*.
- Oliver Thees, Vanessa Burg, Matthias Erni, Gillianne Bowman, Renato Lemm, 2017.
Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET (No. 57), WSL Berichte. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- Prognos AG, 2019.
Prognos Economic Outlook 2019. Basel.
- Prognos AG, Fraunhofer ISI, GWS, iinas, 2021.
Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (Endbericht). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Basel.
- Prognos AG, TEP Energy GmbH, Infrac AG, Ecoplan AG, 2020.
Energieperspektiven 2050+ Kurzbericht. im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Bern.

Projekt BioTrade2020+, 2016.

BioTrade2020plus: Supporting a Sustainable European Bioenergy Trade Strategy [WWW Document]. URL <https://www.biotrade2020plus.eu/> (accessed 1.26.21).

PSI, 2017.

Potenziale, Kosten und Umweltauswirkungen von Stromproduktionsanlagen. Synthesebericht (Synthesebericht). Paul Scherrer Institut PSI, Bern.

Ric Hoefnagels, Martin Junginger, Gustav Resch, 2015.

Coordination of biomass resource availability import strategies and demand. DIA-CORE.

Schueler, V., Beringer, T., Weddige, U., 2013.

Global biomass potentials under sustainability restrictions defined by the European Renewable Energy Directive 2009/28/EC. GCB Bioenergy 13.

Searle, S.Y., Malins, C.J., 2016.

Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. Biomass and Bioenergy 89, 2–10.

VSG, 2020.

Jahresstatistik des VSG. Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG, Zürich.

VSG, 2018.

Erfolgreich realisierte Biogasanlagen. Verband der Schweizerischen Gasindustrie VSG.

Zah, R., Böni, H., Gauch, M., Hischier, R., Lehmann, M., Wäger, P., 2007.

Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa.