

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 172 (2021)

Heft: 1

Artikel: Die Rolle von Biomasse im zukünftigen schweizerischen Energie- und Rohstoffsystem

Autor: Brethauer, Simone / Riediker, Martin / Thees, Oliver

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097230>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 03.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Rolle von Biomasse im zukünftigen schweizerischen Energie- und Rohstoffsystem

Simone Brethauer

Martin Riediker

Oliver Thees

Michael Hans-Peter Studer

Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)

Schweizerischer Nationalfonds, Nationales Forschungsprogramm NFP 66 (CH)

Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL (CH)

Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, HAFL (CH)*

Die Rolle von Biomasse im zukünftigen schweizerischen Energie- und Rohstoffsystem

Das heutige Energie- und Rohstoffsystem basiert mehrheitlich auf klimaschädlichen und endlichen Ressourcen wie Erdöl und Erdgas sowie auf Kernbrennstoffen, die wegen Sicherheitsbedenken langfristig nicht mehr verwendet werden sollen. Ein Umstieg auf eine erneuerbare und umweltverträgliche Rohstoffbasis ist demnach unumgänglich und stellt eine globale, hochkomplexe Aufgabe dar. Biomasse ist prinzipiell ein CO₂-neutraler Rohstoff, der als Ersatz für fossile Rohstoffe verwendet werden kann. In diesem Artikel wird beleuchtet, welche Rolle Biomasse in der Schweiz für die Energiewende und für den Wandel des Rohstoffsystems spielen könnte. Da das jährliche nachhaltige Biomassepotenzial mit 97 PJ (Primärenergie) deutlich kleiner als der jährliche Endenergieverbrauch von 831 PJ im Jahr 2018 ist, sollte Biomasse zielgerichtet mit einem hohen Gesamtwirkungsgrad und einer hohen Wertschöpfung für Anwendungen genutzt werden, für die keine weiteren erneuerbaren Alternativen zur Verfügung stehen. Unter diesem Gesichtspunkt ist die Umwandlung von Biomasse in Bioraffinerien zu Chemikalien, Kunststoffen und Biotreibstoffen für den Luft- und Schwerverkehr empfehlenswert. Dafür stehen in Bioraffinerien sowohl thermo- als auch biochemische Umwandlungstechnologien zur Verfügung. Anstrengungen, um die damit noch verbundenen Herausforderungen zu überwinden, sind laut Modellrechnungen lohnend, da die stoffliche Nutzung der Biomasse deutlich mehr fossile CO₂-Emissionen verhindert als eine direkte Verbrennung zur Erzeugung von Raumwärme.

Keywords: energy transition, biomass availability, biomass allocation, resource efficiency, biorefinery

doi: 10.3188/szf.2021.0007

* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail michael.studer1@bfh.ch

Fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle sind seit Beginn des industriellen Zeitalters sowohl die dominierenden Energiequellen zur Deckung der Wärme- und Mobilitätsbedürfnisse der Menschheit als auch die wichtigsten Kohlenstoffquellen für die chemische Industrie. Dies ist in mehrfacher Hinsicht problematisch. Bei der Verbrennung von fossilen Ressourcen wird das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO₂) freigesetzt, das für rund zwei Drittel des derzeit beobachteten globalen Temperaturanstiegs ursächlich ist. Zudem sind insbesondere Erdöl und Erdgas endliche Ressourcen, die in den nächsten Jahrzehnten aufgebraucht sein werden. Diese Problematik wird durch die Zunahme der globalen Bevölkerung und des Lebensstandards in Entwicklungs- und Schwellenländern und den damit einhergehenden ansteigenden Energiebedarf noch verschärft. Ein Umstieg auf eine erneuerbare und umweltverträgliche Rohstoffbasis ist demnach unumgänglich. Sie stellt eine globale, hochkomplexe und dringliche Aufgabe dar. Auch die Schweiz hat sich

im Pariser Klimaübereinkommen verpflichtet, ihren Treibhausgasausstoss bis 2030 gegenüber dem Stand von 1990 zu halbieren, und laut einem Bundesratsbeschluss will sie bis 2050 das Netto-Null-Emissionsziel erreichen. Zudem wurde in der Schweiz nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima der schrittweise Ausstieg aus der Atomenergie beschlossen. Mit der Energiestrategie 2050 wird der Umbau des heutigen Energiesystems vorangetrieben. In diesem Artikel wird beleuchtet, welche Rolle Biomasse als erneuerbare Rohstoffquelle dabei spielen könnte. Zunächst werden der heutige Energieverbrauch sowie der fossile Rohstoffbedarf dargelegt und diesen Zahlen die potenzielle Verfügbarkeit von inländischer Biomasse gegenübergestellt. Anschliessend werden mögliche nicht fossile Alternativen für die heutigen Hauptverwendungszwecke der fossilen Rohstoffe diskutiert, um daraus sinnvolle Verwendungen von Biomasse aus gesamtsystemischer Perspektive abzuleiten. Da ein vielversprechender Verwendungszweck von Biomasse die Nutzung als Rohstoff zur Herstellung von Chemika-

lien ist, schliesst dieser Artikel mit einem Kapitel über den heutigen technologischen Stand von Bioaffinerien als Teil einer biobasierten Industrie und den damit verbundenen Herausforderungen und Chancen.

Verbrauch von Energie und fossilen Rohstoffen in der Schweiz

Die Gesamtenergiestatistik des Bundesamtes für Energie (BFE 2019a) beziffert den Endenergieverbrauch der Schweiz im Jahr 2018 auf 831 PJ, wobei 638 PJ (77%) aus nicht erneuerbaren Quellen stammen, d.h. entweder aus Kernbrennstoffen zur Erzeugung von Strom in Atomkraftwerken oder aus fossilen Rohstoffen wie Erdöl oder Erdgas (Abbildung 1a). Nur gerade 55 PJ des Endenergieverbrauchs wurden über Biomasse gedeckt (Abbildung 1b; BFE 2019c).

Gemäss der Ex-post-Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs nach Verwendungszwecken (BFE 2019b), deren Zahlen aufgrund der Datenerhebungsmethodik leicht von der Gesamtenergiestatistik (BFE 2019a) abweichen, sind die beiden grössten Treiber des Endenergieverbrauchs die Erzeugung von Wärme (358 PJ, 43%) und der Verkehr (316 PJ, 38%). An dritter Stelle folgt der sonstige Stromverbrauch (137 PJ, 17%)¹. Bei der Wärmebereitstellung beträgt der Anteil der Energie aus nicht erneuerbaren Quellen 71%. Er stammt vornehmlich aus der Verbrennung von Erdöl und Erdgas sowie zu einem geringen Teil aus Atomstrom. Beim Verkehrssektor, der den Personen- und den Güterverkehr auf der Strasse sowie den Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr umfasst, beläuft sich der Anteil fossiler Energieträger gar auf 95%. Der schweizerische Strommix besteht dagegen

bereits zu mehr als der Hälfte (56%) aus erneuerbaren Quellen. Insbesondere der beträchtliche Anteil an Wasserkraftwerken an der inländischen Stromproduktion trägt zu dieser hohen Quote bei.

Im Jahr 2018 wurden laut der Erdölbilanz der Gesamtenergiestatistik (BFE 2019a) in der Schweiz knapp 10 Millionen Tonnen Erdölprodukte wie Benzin, Diesel oder Heizöl sowie circa 2.3 Millionen Tonnen Erdgas zur energetischen Nutzung verbrannt oder stofflich genutzt. Die stoffliche Nutzung, die in dieser Bilanz ausgewiesen ist, umfasst dabei nur Produkte, die in einer Schweizer Raffinerie hergestellt werden, zum Beispiel Schmierstoffe für Maschinen und Fahrzeuge oder Bitumen für den Strassenbau. Das waren im Jahr 2018 484 000 Tonnen bzw. umgerechnet in Energie 20 PJ (Abbildung 1a) oder 5% des Gesamtendenergieverbrauchs. Allerdings sind Erdöl und Erdgas auch für die schweizerische Chemie- und Pharmaindustrie wichtige Rohstoffe. Sie erscheinen nur nicht in der Energiestatistik, da die Grundchemikalien importiert werden. Der hoch spezialisierte schweizerische Chemie- und Pharmasektor stellt mehr als 30 000 verschiedene Produkte her (z.B. Medikamente, Kunststoffe, Dünge- und Pflanzenschutzmittel oder Vitamine), von denen 95% wieder exportiert werden, und importiert dafür Chemikalien im Wert von 52 Milliarden Schweizer Franken (Kober et al 2019, Scienceindustries 2019). Eine rein lokale Betrachtung der Rohstoffbasis der Chemie- und Pharmaindustrie anhand der Gesamtenergiestatistik ist also schwierig und unterschätzt die Nutzung von Erdöl und Erdgas als Rohstoffe für die Chemikalienproduktion in der Schweiz. Weltweit werden für die Herstellung von Petrochemikalien circa 14% des Gesamtendenergieverbrauchs und 8% des konsumierten Erdgases verwendet (IEA 2018).

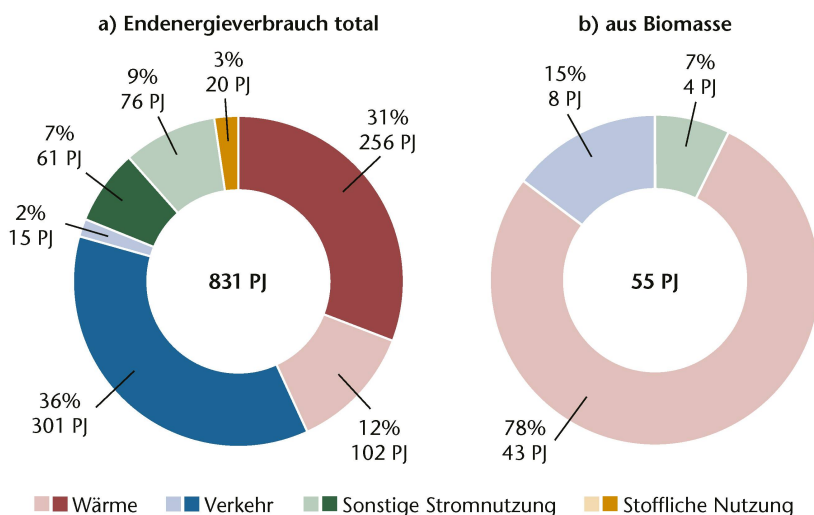


Abb 1 Endenergieverbrauch in der Schweiz im Jahr 2018 (BFE 2019a, 2019b, 2019c). a) Gezeigt werden die drei Verwendungszwecke, die am meisten zum jährlichen Energieverbrauch beitragen. b) Dargestellt sind der Anteil und die Verwendungszwecke der energetisch genutzten Biomasse. Hierin einbezogen sind auch importierte Biotreibstoffe, die nicht aus heimischer Biomasse hergestellt wurden. Helle Farben: erneuerbare Anteile, dunkle Farben: nicht erneuerbare Anteile.

Biomassepotenziale in der Schweiz

Da Pflanzen beim Wachstum gleich viel CO₂ aufnehmen, wie später bei der Verbrennung oder der Verrottung wieder frei wird, ist Biomasse prinzipiell ein CO₂-neutraler Rohstoff, der als Ersatz für fossile Rohstoffe verwendet werden kann. Um die in der Schweiz vorhandene energetisch nutzbare Biomasse abzuschätzen, wurden im Rahmen einer Studie der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL die Potenziale der wichtigen Biomasseressourcen quantifiziert und lokalisiert (Burg et al 2018, Thees et al 2017). Mit einem methodisch gleichen Ansatz wurde sowohl die verholzte als auch die nicht verholzte Biomasse untersucht, um die Vergleichbarkeit der Potenziale zu gewährleisten. Erfasst wurden zehn

¹ Alle Berechnungen wurden mit ungerundeten Zahlen durchgeführt und die Ergebnisse gerundet dargestellt. Identische Berechnungen nur mit gerundeten Zahlen können leicht abweichende Ergebnisse liefern.

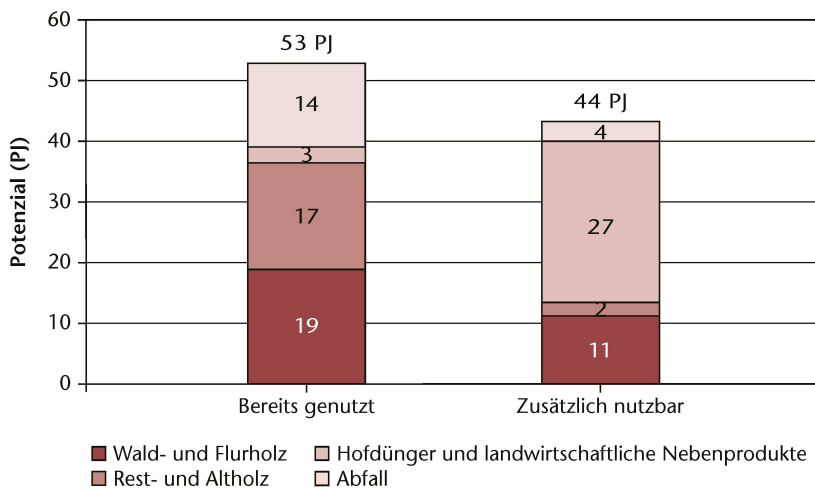


Abb 2 Bereits genutztes und noch zusätzlich nutzbares nachhaltiges Potenzial (Primärenergie) von Biomasse in der Schweiz im Jahr 2014 (Burg et al 2018, Thees et al 2017).

Biomassekategorien, nämlich das Waldholz, das Flurholz, das Restholz und das Altholz sowie der Hofdünger, die landwirtschaftlichen Nebenprodukte, die organischen Anteile im Kehrriech, das Grüngut der Haushalte und der Landschaftspflege, die biogenen Abfälle aus Gewerbe/Industrie und der Klärschlamm. Nicht untersucht wurden Energieholzplantagen auf landwirtschaftlichen Böden und Energiepflanzen. Sie stellen in der Schweiz aus politischen Gründen keine Option dar. Für alle genannten Biomassen wurden das theoretische Potenzial, das nachhaltige Potenzial, das im Jahr 2014 bereits genutzte und das zusätzlich nutzbare Potenzial bestimmt. Das theoretische Potenzial beinhaltet die im Inland erzeugte Biomasse, die maximal genutzt werden könnte. Aus diesem ergibt sich nach Abzug von ökologischen und ökonomischen sowie rechtlichen und politischen Restriktionen das nachhaltige Potenzial. Das zusätzlich nutzbare Potenzial errechnet sich, indem die bereits energetisch genutzte Biomasse vom nachhaltigen Potenzial abgezogen wird.

Das theoretische Potenzial der Schweizer Biomasse beträgt total 209 PJ Primärenergie pro Jahr, wohingegen das nachhaltig nutzbare Potenzial mit 97 PJ deutlich kleiner ist. Das jährlich nachhaltig nutzbare Potenzial von Wald- und Flurholz beläuft sich insgesamt auf 31 PJ (26.1 bzw. 4.8 PJ), wovon 61% bereits genutzt werden, und dasjenige von Hofdünger und landwirtschaftlichen Nebenprodukten auf 30 PJ (26.9 bzw. 2.6 PJ), wovon lediglich 10% genutzt werden. Die verbleibenden Biomassekategorien Rest- und Altholz sowie Abfall (organische Anteile Kehrriech, Grüngut aus Haushalt und Landschaft, organische Abfälle aus Industrie und Gewerbe und Klärschlamm) haben zusammen ein Potenzial von jährlich 37 PJ, von denen bereits 84% genutzt werden. Insgesamt war im Jahr 2014 knapp die Hälfte (44 PJ) der nachhaltig zur Verfügung stehenden Biomasse noch ungenutzt. Vergleicht man das bereits genutzte Potenzial mit dem noch zusätzlich nutzbaren, wird deutlich, dass der

Hofdünger und die landwirtschaftlichen Nebenprodukte bisher kaum genutzt werden und dass auf diese mit 27 PJ mehr als die Hälfte des zusätzlich nutzbaren Potenzials entfällt (Abbildung 2). Auch beim Wald- und Flurholz sind noch 11 PJ und bei den bereits in grossem Umfang genutzten Abfällen, Rest- und Althölzern immerhin noch 6 PJ zusätzlich nutzbar.

Im Jahr 2018 wurde mehr Biomasse genutzt (61 PJ Primärenergie), sodass das noch zusätzlich nutzbare Biomassepotenzial entsprechend tiefer sein wird. Eine vergleichbar detaillierte Analyse wie für das Jahr 2014 ist aber nicht verfügbar.

Biomasse im zukünftigen Rohstoffsystem: eine systemische Betrachtung

Der Umbau des Schweizer Energiesystems muss sowohl den Ersatz von Atomstrom durch alternative Quellen beinhalten als auch die deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen gewährleisten, ohne dass dabei die Leistungen und die Versorgungssicherheit beeinträchtigt werden. Daher müssen unter anderem geeignete Alternativen zu fossilen Rohstoffen sowohl für energetische als auch für nicht energetische Anwendungen gefunden und eingesetzt werden. Die Nutzung von Biomasse ist dabei eine nachhaltige Alternative, allerdings reicht die Verfügbarkeit selbst bei voller Ausschöpfung des bisher noch ungenutzten nachhaltigen Potenzials von 44 PJ pro Jahr bei Weitem nicht aus, um den jährlichen nicht erneuerbaren Endenergieverbrauch von 638 PJ zu decken. Biomasse ist also ein knappes Gut, das aber sehr vielfältig eingesetzt werden kann, zum Beispiel zur Erzeugung von Wärme oder Strom oder auch als Rohstoff für die Herstellung von Chemikalien. Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit muss Biomasse wohlüberlegt dort eingesetzt werden, wo der grösste Nutzen daraus gezogen werden kann. Um diese Vorgabe aus gesamtsystemischer Perspektive zu diskutieren, werden im Folgenden die Substitutionspotenziale verschiedener erneuerbarer Technologien für die unterschiedlichen Verwendungszwecke von fossilen Energieträgern und für die Stromproduktion skizziert.

Nachhaltige Wärmebereitstellung

Die Erzeugung von Warmwasser, Raum- und Prozesswärme hat den höchsten Anteil am Energieverbrauch in der Schweiz (Abbildung 1), und die aktuell dominierenden Energieträger zu deren Bereitstellung sind mit einem Anteil von gut zwei Dritteln Heizöl und Erdgas. Holzfeuerungen (inkl. Altholz, Restholz, Rinde und Sägemehl verfeuernde Anlagen) tragen mit 38 PJ circa 10% zur Wärmebereitstellung bei. Würde man das noch zusätzlich verfügbare inländische Wald- und Flurholz zur Wärmebereitstellung nutzen, würde das mit 10 PJ (gerechnet mit einem Wirkungsgrad von 85%) lediglich zusätzlich

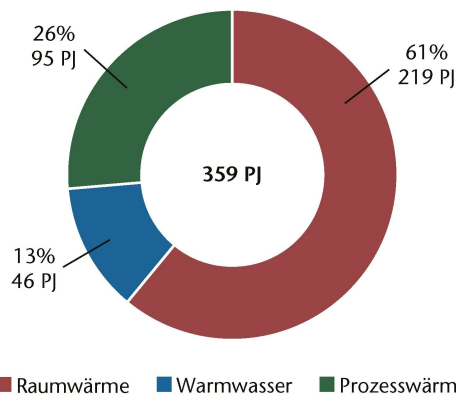


Abb 3 Jährlicher Energieverbrauch für die Wärmegewinnung nach Verwendungszwecken (BFE 2019b).

knapp 3% zum heutigen Wärmebedarf beitragen. Mit elektrischen Wärmepumpen, Solarkollektoren und Geothermie stehen für die erneuerbare Wärmebereitstellung aber weitere mögliche Technologien zur Verfügung, die bereits heute in geringem Umfang genutzt werden und ein hohes Ausbaupotenzial aufweisen. Diesen Anwendungen ist gemein, dass sie sich vor allem für die Niedrigtemperaturanwendungen Raumwärme und Warmwasser eignen, aber nur beschränkt für die Bereitstellung von industrieller Prozesswärme. Diese zwei Verwendungszwecke tragen insgesamt 74% zum Gesamtwärmeverbrauch bei (Abbildung 3) und könnten auch ohne die Verwendung von Biomasse erneuerbar und in vielen Fällen kostengünstiger erzeugt werden.

Prozesswärme, die vor allem von der Industrie, zum Beispiel zur Herstellung von Wasserdampf, benötigt wird, weist ein deutlich höheres Temperaturniveau als Warmwasser und Raumwärme auf. Der Endenergieverbrauch für Prozesswärme belief sich im Jahr 2018 auf 95 PJ (BFE 2019b; Abbildung 3) und wurde zu circa drei Vierteln von Brennstoffen und zu einem Viertel durch Elektrizität gedeckt. Die fossilen Brennstoffe lassen sich in diesem Anwendungsbereich durch Wärmepumpen und Solarthermie mit ihrem niedrigen Temperaturniveau nur schwer oder gar nicht ersetzen. Die Verbrennung von Holz oder anderer Biomasse (11 PJ) für solche Hochtemperaturanwendungen wäre also sinnvoll. Ebenfalls möglich wäre eine Verbrennung von nur schwer anderweitig verwertbaren Fraktionen der Biomasse, wie sie bei bestimmten industriellen Prozessen anfallen. Ein Beispiel dafür ist die Verbrennung von Lignin, nachdem die Kohlenhydratfraktion der Biomasse zu Bioethanol umgewandelt worden ist. Dabei wird neben der notwendigen Prozessenergie auch noch ein Überschuss an Strom generiert (Brethauer & Studer 2015).

Nachhaltiger Verkehr

Der Verkehr ist mit einem jährlichen Verbrauch von je nach Datenquelle 312 bis 316 PJ (BFE 2019a, BFE 2019b) nach der Wärmeerzeugung der nächstgrösste Treiber des schweizerischen Energiever-

brauchs. Hierin enthalten ist auch das gesamte in der Schweiz getankte Flugbenzin. Etwas weniger als die Hälfte des Treibstoffverbrauchs (148 PJ) wird durch den privaten Personenverkehr mit PKW verursacht, gefolgt vom internationalen Flugverkehr mit Start in der Schweiz (26%; Abbildung 4). Der Gütertransport auf der Strasse erfolgt mit Last- und Lieferwagen und trägt zusammengenommen 13% zum Energieverbrauch bei, während der gesamte Bahnverkehr nur 3% ausmacht. 95% des Verkehrssektors basieren auf fossilen Treibstoffen, d.h., auch in diesem Sektor ist ein tiefgreifender Wandel unumgänglich. Optionen, um eine zumindest annähernd CO₂-neutrale Mobilität zu erlauben, sind der Einsatz von Elektrofahrzeugen oder von Biotreibstoffen, wie es bereits heute, wenn auch nur in geringem Massstab, geschieht.

Heutzutage beträgt der Stromverbrauch der PKW-Flotte nur 0.2 PJ, aber es ist abzusehen, dass der Anteil an Elektroautos beträchtlich zunehmen wird. Dies würde den Energieverbrauch des Verkehrssektors erheblich senken, da Elektromotoren eine fast um den Faktor 4 höhere Umwandlungseffizienz als Verbrennungsmotoren aufweisen (Codina Gironès et al 2018). Zur Elektrifizierung eignet sich allerdings kurz- und mittelfristig nur der PKW-basierte Personenverkehr, nicht aber der Flug- und Schwerverkehr, da die maximal möglichen Reichweiten mit Batterien insbesondere bei Fahrzeugen mit gewichts- und leistungsbedingten hohen Energieverbräuchen zu klein sind. Für diesen Sektor sind flüssige Biotreibstoffe eine Alternative zu erdölbasierten Treibstoffen (Davis et al 2018). Für eine rasche und nahtlose Integration in das heutige Versorgungsnetz sind sogenannte Drop-in-Biotreibstoffe geeignet, mit denen herkömmliche Motoren ohne technische Anpassungen betrieben werden können. Dazu zählen zum Beispiel Biodiesel, der aus langkettigen mit Methanol veresterten Fettsäuren besteht, oder HEFA-Treibstoffe (HEFA für hydroprocessed esters and fatty acids), die durch die

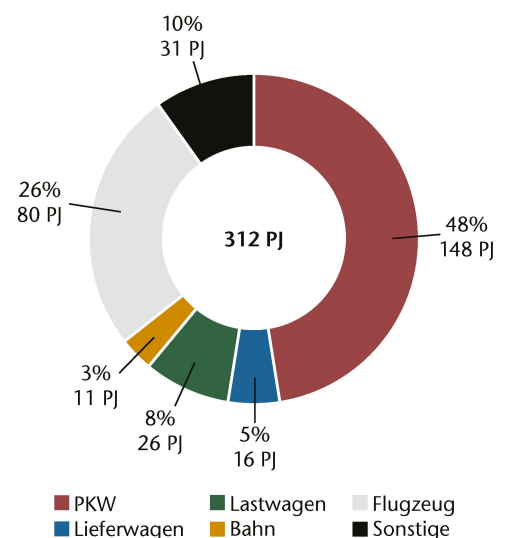


Abb 4 Energieverbrauch des Verkehrssektors nach Fahrzeugarten (BFE 2019b).

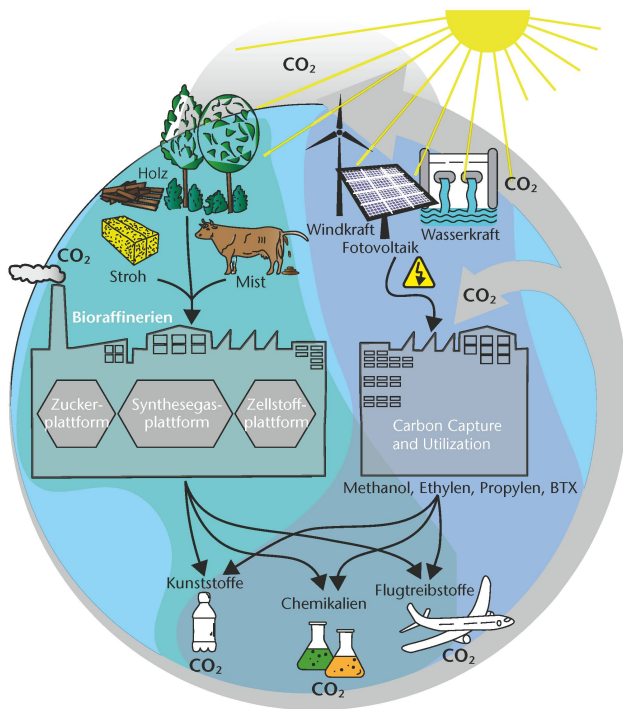


Abb 5 Erneuerbare Produktion von organischen Chemikalien, Kunststoffen und Treibstoffen aus Biomasse und CO₂. Sonnenenergie ist die einzige externe Energiequelle, die der Menschheit auf dem Planeten Erde unbegrenzt zur Verfügung steht. Mittels Photosynthese entsteht aus der Sonnenenergie zusammen mit CO₂ pflanzliche Biomasse, die in Bioraffinerien zu verschiedenen kohlenstoffhaltigen Produkten umgewandelt wird. Am Ende des Lebenszyklus dieser Produkte wird das CO₂ wieder freigesetzt, der CO₂-Kreislauf schliesst sich. Auch CO₂ selbst kann zusammen mit Wasserstoff, der über die Elektrolyse von Wasser erzeugt wird, für die Produktion von Chemikalien verwendet werden.

Hydrierung von Pflanzenölen oder tierischen Fetten hergestellt werden und sowohl als Biodiesel als auch als Biokerosin eingesetzt werden können. Neben diesen ölbasierten Produkten gibt es noch zahlreiche weitere Chemikalien, die als Treibstoff nutzbar sind und mit chemischen oder biotechnologischen Methoden aus Abfallbiomasse oder CO₂ hergestellt werden können, zum Beispiel Ethanol, Butanol, Methan oder verschiedene Kohlenwasserstoffe.

Nachhaltige Chemikalienproduktion

Alle organischen Chemikalien sind kohlenstoffhaltige Moleküle, was eine Kohlenstoffquelle für ihre Herstellung zwingend notwendig macht. Für die Chemieindustrie kann also keine Dekarbonisierung angestrebt werden, sondern es muss eine Defossilisierung stattfinden. Die fossilen Rohstoffe Erdöl – ein Gemisch aus Kohlenwasserstoffen mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 85% w/w (weight per weight) – und Erdgas sind heutzutage die wichtigsten Kohlenstoffquellen für die Chemieindustrie, die durch Raffination und verschiedene Crack- und Aufreinigungsprozesse in Grundchemikalien umgewandelt werden. Die organische Chemie mit ihrer enormen Produktvielfalt fusst zum grossen Teil auf nur sechs organischen Grundchemikalien (Methanol, Ethylen, Propylen, Benzol, Toluol und Xylol [BTX]), die langfristig aus erneuerbaren Rohstoffen produ-

ziert oder durch ein alternatives System von erneuerbaren Basischemikalien ersetzt werden müssen. Als erneuerbare Kohlenstoffquellen stehen dafür prinzipiell nur Biomasse und CO₂ zur Verfügung (Abbildung 5). Abfälle, die recycelt werden können, zum Beispiel Kunststoffe, ergänzen diese Rohstoffbasis.

Holz bzw. Lignozellulose, der nicht essbare strukturelle Teil der Biomasse, ist aus den Kohlenhydraten Zellulose (50%) und Hemizellulose (20%) sowie Lignin (30%) aufgebaut, und hat damit im Gegensatz zu Erdöl einen relativ hohen Sauerstoffanteil von ca. 40% w/w, was ungefähr einer stöchiometrischen Formel von CH₂O entspricht. In Bioraffinerien können daraus mit einer Vielzahl an biotechnologischen oder thermochemischen Methoden Chemikalien produziert werden.

Auch CO₂ kann als Kohlenstoffquelle genutzt werden, wobei es dafür zwingend auch noch eine Wasserstoffquelle braucht, um die organischen Moleküle aufzubauen. Ein solches Rohstoffsystem ist unter den Begriffen «Carbon Capture and Utilization (CCU)» und «Power to X (P2X)» bekannt. Für diese Prozesse wird der notwendige Wasserstoff für die chemische Aktivierung des CO₂ mehrheitlich mittels Elektrolyse von Wasser gewonnen (dann handelt es sich um sogenannten «grünen Wasserstoff»). Nachfolgend werden aus CO₂ und H₂ verschiedene Produkte wie synthetisches Erdgas CH₄ (Power to Gas) oder länger-kettige flüssige Kohlenwasserstoffe (Power to Fuels) mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt (Kober et al 2019). Ebenfalls könnten alle bereits genannten heutigen organischen Grundchemikalien aus CO₂ und H₂ hergestellt werden (Geres et al 2019). Das CO₂ kann aus der Atmosphäre isoliert werden, was aber wegen der geringen CO₂-Konzentration in der Luft von nur 0.04% sehr energieintensiv ist, oder energieeffizienter dort gewonnen werden, wo es in deutlich höheren Konzentrationen anfällt, zum Beispiel im Abgas von Verbrennungs- oder Fermentationsprozessen. Die P2X-Technologie kann auch temporär anfallenden Überschussstrom speichern und somit zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen. Berechnungen zeigen, dass CCU sogar das Potenzial hat, um die weltweite Chemikalienproduktion unabhängig von fossilen Kohlenstoffquellen zu machen (Kätelhön et al 2019). Allerdings steigt durch die vermehrte Nutzung von CO₂ der Energieverbrauch an. Gerechnet wird mit einem zusätzlichen Stromverbrauch von bis zu 55% der heutigen globalen Stromproduktion (Kätelhön et al 2019). Zudem müssten erheblich grössere Massenströme von Rohstoffen verarbeitet werden, weil CO₂ einen tiefen Kohlenstoffanteil von nur 27% w/w aufweist.

Nachhaltige Stromversorgung

Der heutige in der Schweiz produzierte Strom stammt bereits zu circa 60% aus erneuerbaren Quellen. Basierend auf den heutigen Zahlen müssen dem-

nach rund 80 PJ nicht erneuerbarer Strom ersetzt werden, sofern die Schweiz nicht auf zusätzliche Stromimporte angewiesen sein möchte. Durch die zunehmende Elektrifizierung des Verkehrssektors und langfristig auch des Chemiesektors wird der Strombedarf in Zukunft eher zunehmen. Für die Deckung dieses Bedarfs kommt der Ausbau der Wasserkraft, der Fotovoltaik, der Windkraft und der Stromproduktion aus Biomasse infrage. Wasser- und Windkraft haben in der Schweiz nur ein relativ geringes Ausbaupotenzial von 12 bzw. 32 PJ (BFE 2019d, Suisse Eole 2020). Ein weitaus höheres hat die Fotovoltaik mit 240 PJ.² Allerdings ist die fluktuierende Bereitstellung von Wind- und Solarstrom eine grosse Herausforderung für das Stromnetz. Zur Stabilisierung der Netze müssen daher neue Regelsysteme entwickelt werden, unterstützt durch Technologien zur Stromspeicherung. Auch Biomasse kann verstromt werden, zum Beispiel in Wärmekraftanlagen oder über eine Umwandlung zu Biogas, das dann in Wärmekraftanlagen entweder direkt oder nach einer Einspeisung in das Erdgasnetz bei Bedarf verstromt wird. Die Speicherung von Biogas ist somit auch eine mögliche Technologie, um die Fluktuationen des Solarstroms auszugleichen. Von den vorhandenen Biomassefraktionen ist besonders Hofdünger für eine Umwandlung zu Biogas prädestiniert, da dieser wegen des hohen Wassergehalts nicht verbrannt werden kann und durch die komplexe Zusammensetzung für die Chemikalienherstellung auch eher ungeeignet ist. Allerdings ist das Potenzial für die Herstellung von Biogas sehr gering im Verhältnis zum zu deckenden Strombedarf, insbesondere da die heutigen erzielbaren Ausbeuten maximal 50% betragen und zusätzlich noch Umwandlungsverluste bei der Verstromung entstehen.

Biobasierte Industrie: Technologien, Herausforderungen und Potenziale

Wie oben dargestellt ist Biomasse aus systemischer Sicht vorzugsweise zu Biotreibstoffen für den Flug- und Schwerverkehr, zu Kunststoffen oder anderen Chemikalien zu verarbeiten oder zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme zu verwenden, da es in diesen Bereichen keine oder nur sehr aufwendige Alternativen gibt. Beide Verwendungszwecke sind wichtige Pfeiler der «biobasierten Industrie» – des Teils einer Bioökonomie, der nicht die primäre Biomasseproduktion und die Herstellung von Nahrungsmitteln umfasst.

Umwandlung von Biomasse zu Chemikalien in Bioraffinerien

In einer Bioraffinerie wird Biomasse nachhaltig und unter möglichst vollständiger Verwertung aller Rohstoffkomponenten in eine Palette von bio-

basierten Produkten (Nahrungsmittel, Tierfutter, Chemikalien und Stoffe) sowie Bioenergie (Biotreibstoffe, Strom und/oder Wärme) umgewandelt. In diesem Sinne ist eine Zellstofffabrik, die die Ablage energetisch nutzt, zum Beispiel auch eine Bioraffinerie.

Die mehrstufigen Umwandlungen in einer Bioraffinerie verlaufen typischerweise über einige wenige Zwischenprodukte (z.B. Zucker oder Synthesegas), die als «Plattformen» bezeichnet werden, von denen aus die Produktpalette entwickelt wird. Die Zuckerplattform nutzt die Kohlenhydrate der Lignozellulose, und es werden mehrheitlich biochemische Methoden eingesetzt, d.h., es werden Enzyme oder Mikroorganismen verwendet. Da Lignozellulose eine hohe Widerstandsfähigkeit (Rekalzitranz) gegenüber Enzymen und Mikroorganismen aufweist, muss oft zunächst eine thermochemische Vorbehandlung durchgeführt werden, um die weitergehende biochemische Umwandlung in akzeptablen Raten und Ausbeuten zu ermöglichen. Aus der vorbehandelten Biomasse werden mittels spezieller Enzyme – den Zellulasen – fermentierbare, lösliche Zucker freigesetzt, die anschliessend von Mikroorganismen zu den gewünschten Produkten umgewandelt werden. Die Produktpalette, die mittels dieser Fermentationen erzeugt werden kann, ist sehr vielfältig und reicht von Massenprodukten wie Ethanol über Chemikalien wie Milchsäure bis hin zu Aminosäuren oder Antibiotika. Die Zuckerplattform ist allerdings eher ungeeignet, um die heutigen Basischemikalien herzustellen, da diese keine natürlich vorkommenden metabolischen Endprodukte der industriell gebräuchlichen Mikroorganismen sind. Eine Umstellung auf ein alternatives Set von Basischemikalien erscheint aber gut möglich und wurde bereits im Jahr 2004 vorgeschlagen (siehe Kamm et al 2016 für eine Übersicht). Zudem werden vermehrt auch chemisch-katalytische Umwandlungsmethoden basierend auf der Zuckerplattform entwickelt, die das Produktspektrum zusätzlich erweitern (Studer & Poldervaart 2017). Das Lignin, das als Reststoff der Zuckerplattform anfällt, kann energetisch genutzt werden, um die Prozessenergie zu liefern, oder wird in Zukunft nach einigen Entwicklungsarbeiten auch stofflich genutzt werden können.

Die Synthesegasplattform ist eine ebenfalls sehr gut erforschte Alternative zur Zuckerplattform. Bei der Vergasung von Biomasse bei Temperaturen von 750 bis 1250 °C findet eine partielle Oxidation aller Biomassekomponenten zu Synthesegas – einer Mischung hauptsächlich aus CO und H₂ – statt. Die Vergasung ermöglicht damit, beliebige organische Ausgangsstoffe zu einem einheitlichen Zwischenprodukt umzuwandeln, das dann weiterverarbeitet wird.

² Medienmitteilung des Bundesamts für Energie vom 15.4.2019: www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-74641.html (1.12.2020).

Vor der Weiterverarbeitung ist die Reinigung des Synthesegases zwingend notwendig, da es zahlreiche Verunreinigungen enthält, die für die im weiteren Prozessverlauf eingesetzten Katalysatoren oder für die technischen Komponenten der Anlage schädlich sind.

Herausforderungen für die Etablierung von Bioraffinerien

Moderne Bioraffinerien, die Lignozellulose in Chemikalien umwandeln, beginnen sich gerade erst langsam auf industriellem Massstab zu etablieren. Die Technologie ist bei Weitem noch nicht so ausgereift wie bei konventionellen, auf fossilen Rohstoffen basierenden Chemiewerken, die die gegenwärtigen Weltmarktpreise bestimmen. Die Erzeugung von Chemikalien in Bioraffinerien auf kommerziellem Massstab ist komplex und mit einigen Herausforderungen verbunden. Lignozellulosehaltige Biomasse ist ein nicht homogener Rohstoff, die Zusammensetzung variiert stark je nach Art und Herkunft, was sich in unterschiedlichen optimalen Prozessbedingungen für die Verarbeitung niederschlägt. Biomasse hat ausserdem einen im Vergleich mit Erdöl hohen Anteil an inerten Bestandteilen, die nicht in Produkte umgewandelt werden können, zum Beispiel Sand, Wasser und auch Sauerstoff. Lignozellulosehaltige Biomasse ist ein rekalzitranter Rohstoff, dessen Abbau mit biochemischen Methoden aufwendig ist. Eine Vorbehandlung ist daher notwendig, die aber besonders im industriellen Massstab schwierig ist. Hohe Sand- und Schmutzanteile bis zu 25% haben einen hohen Verschleiss der eingesetzten Reaktoren zur Folge. Für die Synthesegasplattform sind insbesondere die Gasreinigungskosten, die ungefähr doppelt so hoch sind wie bei Verwendung von Erdgas (Zhang 2010), eine der Hauptherausforderungen. Biomasse ist ein saisonales Produkt, d.h., es müssen Lager angelegt werden, um die konstante Verfügbarkeit zu garantieren, oder es müssten unterschiedliche Biomassen verarbeitet werden. Generell sind das Ernten und das Zusammenführen von Biomasse relativ aufwendig, weil dieselbe über grosse Flächen verteilt und die Energiedichte gering ist. Daher beschränkt die Logistik die Dimensionierung einer Bioraffinerie auf eine im Vergleich zu heutigen Erdölraffinerien bescheidene Grösse. Positive Skaleneffekte, also die Verringerung der Produktionskosten bei grossen Anlagen, können somit nur bedingt realisiert werden.

Optimierung von Bioraffineriekonzepten nach ökologischen Kriterien

Neben dem bislang eingenommenen systemischen Blickwinkel auf die sinnvolle Nutzung von Biomasse braucht es auch eine ökologische Perspektive, um zu beurteilen, ob eine nachhaltige Nutzung gewährleistet werden kann, oder um die Umwandlungspfade in dieser Hinsicht zu optimieren. Die ökologische Bewertung der Umwandlungspfade er-

folgt meist auf Basis von sogenannten Lebenszyklusanalysen, bei denen sämtliche stoffliche und energetische Ein- und Austräge über den gesamten Lebenszyklus, beginnend bei der Herstellung und der Bereitstellung der Rohstoffe über die Verarbeitung zu den Zielprodukten bis hin zur Verteilung und zur Nutzung der Produkte, aufsummiert werden. Um die Umweltwirkungen zu beurteilen, können verschiedene Indikatoren verwendet werden, beispielsweise die Emission von Treibhausgasen wie CO₂ oder der Einfluss auf die Biodiversität (Dunn 2019). Für die Schweiz wurde eine komplette energetische Nutzung der bisher unbenutzten Biomasseressourcen nach allen betrachteten Indikatoren als vorteilhaft für die Umwelt bewertet, wobei lediglich Biomasse, die sich auch als Tierfutter eignet, ausgenommen wurde (Vadenbo et al 2018).

Modellbasierte Lebenszyklusanalysen eignen sich auch gut, um besonders nachhaltige Umwandlungsprozesse mit einer hohen Ressourceneffizienz zu identifizieren. Die Ressourceneffizienz gibt an, wie hoch die vermiedenen fossilen CO₂-Emissionen pro Kohlenstoffeinheit der eingesetzten Biomasse sind. In einer Fallstudie der EPF Lausanne wurde eine Bioraffinerie betrachtet, die neben der biochemischen Produktion von Butanol, Aceton und Ethanol aus den Reststoffen thermochemisch Synthesegas herstellt. Das Synthesegas wird in einem Kombi-Kraftwerk (Gasturbine und Dampfkreislauf) genutzt und stellt Wärme und Strom für die Bioraffinerie bereit. Pro Einheit biogenen Kohlenstoffs werden in dieser Modellbioraffinerie 0.85 Einheiten fossilen Kohlenstoffs ersetzt. Diese Bilanz kann mit derjenigen beim Verbrennen von Holz zur Wärmeversorgung verglichen werden. Unter der Annahme, dass ein Holzessel einen mit Erdgas betriebenen Heizkessel ersetzt, werden pro Einheit biogenen Kohlenstoffs nur 0.65 Einheiten fossilen Kohlenstoffs ersetzt. Die betrachtete Modellbioraffinerie ersetzt also 30% mehr fossilen Kohlenstoff als die entsprechende Verbrennung. Wenn zusätzlich angenommen wird, dass mit dem in der Bioraffinerie hergestellten Strom über eine Wärmepumpe Wärme ersetzt wird, die sonst über einen mit Erdgas betriebenen Heizkessel bereitgestellt wurde, könnte sogar 2.4-mal mehr fossiles CO₂ ersetzt werden als mit dem Holz, das in einem Heizkessel benutzt wurde (Studer & Poldervaart 2017).

Beitrag der biobasierten Industrie zur Bruttowertschöpfung in der Schweiz

Ein Ausbau der biobasierten Industrie kann neben den dargestellten ökologischen Vorteilen auch Vorteile für die Wirtschaft haben. Bereits heute sind eine Reihe von Produkten biobasiert, wenn auch teilweise noch auf Rohstoffen der ersten Generation, die

auch als Nahrungs- oder Futtermittel verwendet werden. Als Mass für den Beitrag der biobasierten Industrie an der heutigen Wirtschaftsleistung wurden die Bruttowertschöpfung (BWS) und die Gesamtbeschäftigung der biobasierten Industrien in der Schweiz für das Bezugsjahr 2018 abgeschätzt (analog zu Porc et al 2020). Dafür wurden die Anteile der biobasierten Inputs für die jeweiligen Branchen (z.B. Pharmazeutika oder Holzverarbeitende Industrie) von einer aktuellen Schweizer Studie übernommen (Infraconsult 2020) bzw. für die Bioenergie aus den eigenen Daten berechnet, da es für die Schweiz dazu noch keine offiziellen Daten gibt (Tabelle 1). Diese Anteile ermöglichen zusammen mit der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung und der Beschäftigungsstatistik des Bundesamts für Statistik die Berechnung der oben genannten ökonomischen Indikatoren.

Die BWS der biobasierten Industrien in der Schweiz erreichte 2018 ca. 20 Milliarden Schweizer Franken, was rund 3% der BWS in der Schweiz entspricht. Den mit Abstand grössten Anteil – mit mehr als 50% der berechneten biobasierten BWS der Schweiz – weist die wertschöpfungsstarke Branche der Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen aus, gefolgt von der Holzverarbeitenden Indust-

rie mit 29% (Abbildung 6a). Würden alle heute noch fossilen Inputs der diskutierten Branchen durch erneuerbare Ressourcen ersetzt, würde der Beitrag auf etwa 68 Milliarden Schweizer Franken bzw. 10% der Gesamt-BWS in der Schweiz steigen. Die Gesamtbeschäftigung der biobasierten Industrien betrug in der Schweiz im Jahr 2018 rund 190 000 Vollzeitäquivalente (VZÄ). Die Holzverarbeitende Industrie ist mit rund 66% der «biobasierten VZÄ» die wichtigste Arbeitgeberin, gefolgt von der Papier- und der pharmazeutischen Industrie (Abbildung 6b).

Schlussfolgerungen

Biomasse ist ein vielseitig verwendbarer Rohstoff und kann für alle im Artikel diskutierten Verwendungszwecke genutzt werden. Aufgrund der sehr limitierten Verfügbarkeit sollte Biomasse vor allem für Anwendungen genutzt werden, für die keine anderen erneuerbaren Alternativen zur Verfügung stehen. Aus dieser Überlegung sind die Umwandlung von Biomasse in Bioraffinerien zu Biotreibstoffen für den Luft- und Schwerverkehr, zu Kunststoffen und anderen Chemikalien sowie die Erzeugung von Hochtemperaturwärme empfehlenswerte Optionen. Für eine optimale Allokation der Ressourcen sind aber auch die Umweltverträglichkeit der Systeme und die ökonomische Machbarkeit von hoher Wichtigkeit, und es sollten beide, die stofflichen und die energetischen Verwendungen der Biomasse, in Betracht gezogen werden. Dies führt zu einer erhöhten Komplexität der Problemstellungen und zu Herausforderungen, die von Forschung, Politik und Industrie gemeinsam und wegen der Dynamik des Klimawandels auch schnell angegangen werden sollten. Die angedachte Entwicklung einer Schweizer Bioökonomiestrategie (Infraconsult 2020; Tschannen et al 2021, dieses Heft) wäre somit eine wertvolle Ergänzung zu den schon länger etablierten Strategien, die ebenfalls den langfristigen Umbau zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Gesellschaft anstreben.

Eingereicht: 22. September 2020, akzeptiert (mit Review): 1. Dezember 2020

Branche	NOGA-Kategorien	Biobasierter Anteil (%)
Herstellung pharmazeutischer Erzeugnisse	C21	30
Chemikalien und Kunststoffe (inkl. Biotreibstoffe)	C20, C22	8.7
Energieversorgung	D35	10
Papier und Papierprodukte	C17	100
Holzverarbeitende Industrie	C16, C31	69
Textilien und textile Produkte	C13–C15	40

Tab 1 Biobasierte Anteile der Rohstoffe nach Branche (EC 2020, Iost et al 2019, Infraconsult 2020).

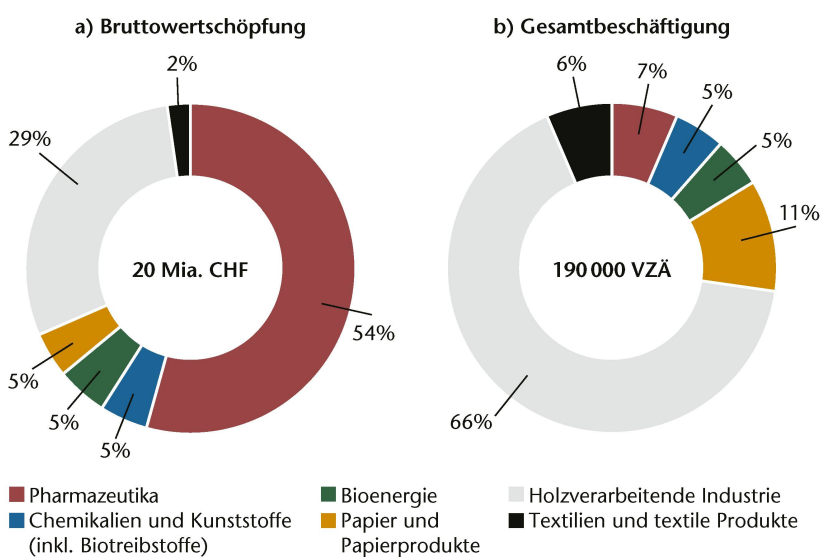


Abb 6 a) Bruttowertschöpfung und b) Gesamtbeschäftigung in Vollzeitäquivalenten der biobasierten Industrien im Jahr 2018.

Literatur

- BFE (2019A) Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018. Bern: Bundesamt Energie. 72 p.
- BFE (2019B) Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2018 nach Verwendungszwecken. Bern: Bundesamt Energie. 89 p.
- BFE (2019C) Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energie, Ausgabe 2018. Bern: Bundesamt Energie. 85 p.
- BFE (2019D) Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bern: Bundesamt Energie. 31 p.
- BRETHAUER S, STUDER MH (2015) Biochemical conversion processes of lignocellulosic biomass to fuels and chemicals – a review. *Chimia* 69: 572–581.

- BURG V, BOWMAN G, ERNI M, LEMM R, THEES O (2018)** Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass Bioenergy* 111: 60–69.
- CODINA GIRONÈS V, PEDUZZI E, VUILLE F, MARÉCHAL F (2018)** On the assessment of the CO₂ mitigation potential of woody biomass. *Front Energy Res* 5: 37.
- DAVIS SJ, LEWIS NS, SHANER M, AGGARWAL S, ARENT D ET AL (2018)** Net-zero emissions energy systems. *Science* 360: 6396.
- DUNN JB (2019)** Biofuel and bioproduct environmental sustainability analysis. *Curr Opin Biotechnol* 57: 88–93.
- EC (2020)** How big is the bioeconomy. Reflections from an economic perspective. Luxembourg: European Commission, EUR 30167 EN. 45 p.
- GERES R, KOHN A, LENZ SC, AUSFELDER F, BAZZANELLA A ET AL (2019)** Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Frankfurt a.M.: DECHEMA Gesellschaft für chemische Technik und Biotechnologie e.V. 96 p.
- IEA (2018)** The future of petrochemicals. Towards more sustainable plastics and fertilisers. Paris: International Energy Agency. 132 p.
- INFRACONSULT (2020)** Bioökonomie Schweiz heute. Politischer Kontext, biogene Ressourcen, Marktpotenzial, Akteure, Kompetenzen, Initiativen. Expertenbericht I im Auftrag von SNF und BAFU. Bern: Infraconsult. 72 p.
- IOST S, LABONTE N, BANSE M, GENG N, JOCHEM D ET AL (2019)** German bioeconomy: economic importance and concept of measurement. *Ger J Agric Econ* 68: 275–288.
- KAMM B, GRUBER PR, KAMM M (2016)** Biorefineries-industrial processes and products. In: Bohnet M, Ullmann F, editors. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley. pp. 1–38.
- KÄTELHÖN A, MEYS R, DEUTZ S, SUH S, BARDOW A (2019)** Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proc Natl Acad Sci USA* 116: 11187–11194.
- KOBER T, BAUER C, BACH C, BEUSE M, GEORGES G ET AL (2019)** Power-to-X: Perspektiven in der Schweiz: ein Weissbuch. Villigen: Paul Scherrer Institut. 40 p.
- PORC O, HARK N, CARUS M, DAMMER L, CARREZ D (2020)** European bioeconomy in figures 2008–2017. Luxembourg: Bio-based Industries Consortium. 28 p.
- SCIENCEINDUSTRIES (2019)** Jahresbericht 2018. Zürich: Science-industries Switzerland. 21 p.
- STUDER M, POLDERVAART P (2017)** Neue Wege zur holzbasiereten Bioraffinerie. Thematische Synthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 66 «Ressource Holz». Bern: Schweizerischer Nationalfonds. 54 p.
- SUISSE EOLE (2020)** Windenergiestrategie: Winterstrom & Klimaschutz. Analyse und Aktualisierung des Potenzials der Windenergie in der Schweiz. Yverdon: Suisse Eole. 43 p.
- THEES O, BURG V, ERNI M, BOWMAN G, LEMM R (2017)** Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Birmsdorf: Eidgenöss. Forsch.anstalt WSL, Ber 57. 299 p.
- TSCHANNEN A, WALKER D, KAMMERHOFER AW, RICHTER K, SINABELL F (2021)** Strategien zur Bioökonomie in Deutschland, Österreich und der Schweiz. *Schweiz Z Forstwes* 172: 25–31. doi: 10.3188/szf.2021.0025
- VADENBO C, TONINI D, BURG V, ASTRUP TF, THEES O ET AL (2018)** Environmental optimization of biomass use for energy under alternative future energy scenarios for Switzerland. *Biomass Bioenergy* 119: 462–472.
- ZHANG W (2010)** Automotive fuels from biomass via gasification. *Fuel Process Technol* 91: 866–876.

Le rôle de la biomasse dans le futur système suisse d'énergie et de matières premières

Le système actuel d'énergie et de matières premières repose principalement sur des ressources limitées et nuisibles pour le climat, comme le pétrole brut et le gaz naturel, ainsi que sur l'énergie nucléaire, à laquelle il faudrait à long terme renoncer pour des raisons de sécurité. La transition vers des énergies et des matières premières renouvelables et respectueuses de l'environnement est donc inévitable et représente une tâche globale très complexe. En principe, la biomasse est une matière première neutre en CO₂ qui peut être utilisée comme substitut des matières premières fossiles. Cet article examine le rôle que la biomasse pourrait jouer en Suisse dans la transition énergétique et dans la transformation du système des matières premières en Suisse. Etant donné que le potentiel annuel durable de biomasse de 97 PJ (énergie primaire) est nettement inférieur à la consommation énergétique finale annuelle de 831 PJ en 2018, la biomasse devrait être utilisée de manière ciblée avec un rendement global élevé et une forte valeur ajoutée pour des applications pour lesquelles aucune autre alternative renouvelable n'est disponible. De ce point de vue, la conversion de la biomasse dans des bioraffineries en produits chimiques, produits en plastique et biocarburants pour le transport aérien et lourd est recommandée. Des technologies de conversion thermo- et biochimique sont disponibles à cette fin dans les bioraffineries. Selon des modèles de calcul, les efforts pour surmonter les défis encore associés à ces technologies sont utiles car l'utilisation matérielle de la biomasse permet d'éviter beaucoup plus d'émissions de CO₂ fossile que la combustion directe pour le chauffage de bâtiments.

The role of biomass in the future Swiss energy and raw materials system

Today's energy and raw materials system is mainly based on climate-damaging and finite resources, such as crude oil and natural gas, as well as on nuclear fuels, which should be abandoned in the long term due to safety concerns. A change to a renewable and environmentally compatible raw material basis is therefore inevitable and represents a global, highly complex, task. In principle, biomass is a CO₂-neutral raw material that can be used as a substitute for fossil raw materials. This article examines the role biomass could play in the energy turnaround and in the transition of the raw materials system in Switzerland. Since the annual sustainable biomass potential of 97 PJ (primary energy) is significantly smaller than the annual final energy consumption of 831 PJ in 2018, biomass should be used in a targeted manner with high overall efficiency and high added value for applications for which no other renewable alternatives are available. From this point of view the conversion of biomass in biorefineries to chemicals, plastics and biofuels for aviation and heavy-duty transportation is recommended. Both thermo- and biochemical conversion technologies are available in biorefineries. According to model calculations, efforts to overcome the challenges still associated with these technologies are worthwhile, since the material use of biomass prevents significantly more fossil CO₂ emissions than direct combustion to generate space heat.