biosweet
Biomass for Swiss Energy Future
Swiss Competence Center for Energy Research

Unterstützt von

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Innosuisse – Schweizerische Agentur
für Innovationsförderung

WHITE PAPER

Energieholz in der Schweiz: Potenziale, Technologieentwicklung, Ressourcenmobilisierung und seine Rolle bei der Energiewende

Oliver Thees, Matthias Erni, Vanessa Burg, Gillianne Bowman, Serge Biollaz, Theodoros Damartzis, Timothy Griffin, Jeremy Luterbacher, François Maréchal, Thomas Nussbaumer, Tilman Schildhauer, Janine Schweier, Michael Studer, Oliver Kröcher

Impressum
Oliver Thees[1], Matthias Erni[1], Vanessa Burg[1], Gillianne Bowman[1], Serge Biollaz[2], Theodoros Damartzis[3], Timothy Griffin[4], Jeremy Luterbacher[3], François Maréchal[3], Thomas Nussbaumer[5], Tilman Schildhauer[2], Janine Schweier[1], Michael Studer[6], Oliver Kröcher[2,3]
[1] Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
[2] Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen
[3] Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne (EPFL), Sion und Lausanne
[4] Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Windisch
[5] Hochschule Luzern (HSLU), Luzern
[6] Berner Fachhochschule (BFH), Zollikofen

Empfohlene Zitierung
Thees, O.; Erni, M.; Burg, V.; Bowman, G.; Biollaz, S.; Damartzis, T.; Griffin, T.; Luterbacher, J.; Marechal, F.; Nussbaumer, T.; Schildhauer, T.; Schweier, J.; Studer, M.; Kröcher, O., 2023: White Paper – Energieholz in der Schweiz: Potenziale, Technologieentwicklung, Ressourcenmobilisierung und seine Rolle bei der Energiewende. SCCER-BIOSWEET; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 34 S. https://doi.org/10.55419/wsl:32789

Dieses White Paper ist in Englisch (Original), Deutsch und Französisch verfügbar.

Fotos auf der Titelseite: Oliver Thees (WSL), Thomas Fillbrandt (Universität Freiburg, Deutschland)

Herausgeber
Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, 2023

Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.

Ziel des White Papers
Ziel dieses White Papers ist es, Entscheidungsträgern die **aktuellen Forschungsergebnisse** zur Verfügung zu stellen, um die optimale Nutzung der Bioenergie aus Holz sowie einiger anderer fester Biomassearten in der Schweizer Energiewende zu fördern. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse des Schweizerischen Kompetenzzentrums für Bioenergieforschung – **SCCER BIOSWEET** – zusammengefasst und in einen breiteren Kontext zum Stand der Forschung und deren Umsetzung in der Praxis gestellt. Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich die Ergebnisse auf die Schweiz und auf das inländische Biomassepotenzial.

Der **Fokus liegt auf Holz** und insbesondere im Zusammenhang mit der Verbrennungstechnik auch auf fester, nicht-verholzter Biomasse. Die analysierten Rohstoffe werden nur dann als potenziell für eine energetische Nutzung zur Verfügung stehend angesehen, **wenn sie für konkurrierende Material- oder Nahrungsressourcen weniger bzw. nicht benötigt werden**. Zum Energieholz zählen direkt geerntetes Holz aus Wäldern und von Bäumen ausserhalb des Waldes, Restholz aus der Industrie und Altholz, also Holzabfälle, die nach der Nutzung von Holzprodukten übrigbleiben. Beispiele für zusätzlich betrachtete, nicht-verholzte feste Biomasse sind pflanzliche Rückstände aus der Landwirtschaft und der Lebensmittelverarbeitung.

Partner und Danksagungen
Dieses White Paper wurde von Innosuisse - Schweizerische Agentur für Innovationsförderung finanziell unterstützt und ist ein Produkt des Schweizer Kompetenzzentrums für Energieforschung SCCER BIOSWEET.
Wir danken weiteren Organisationen für ihre Unterstützung, zum Beispiel durch Mitarbeit, Beratung, Datenlieferung und Finanzierung:
- Ammann Schweiz AG, Langenthal; arv Baustoffrecycling Schweiz, Schlieren; Axpo Biomasse AG, Baden; Bundesamt für Energie, Bern; COOP, Basel
- Europäische Kommission (Projekte REnseng und Pulp & Fuel), Gaznat SA, Vevey; GEO Partner AG, Zürich
- Heitzmann AG, Schachen; Holzenergie Schweiz, Zürich; Kaskad-E GmbH, Basel; KlimaGRischa Klimastiftung Graubünden, Chur; Liebi LNC AG, Oey-Diemtigen; Oekosolve AG, Plons; SCHMID AG Energy Solutions, Eschlikon

Wir danken Dr. Sandra Hermle (BFE), Andreas Keel (Holzenergie Schweiz), Prof. Dr. Karl Keilen (keilenANALYTICS) und Prof. Dr. Frédéric Vogel (FHNW, PSI) für die Begutachtung des Manuskripts. Schliesslich danken wir Dr. Kurt Bollmann (WSL) für die Durchsicht von Abschnitt 4.3.2 (Biodiversität).

Für Lektorat, Layout und Übersetzungen danken wir: Jacqueline Annen, Sandra Gurzeler, Martin Moritzi (alle WSL) sowie Dr. Gillianne Bowman (WSL), Melissa Dawes und TTN Translation Network.

Definitionen und Abkürzungen

- Die **Bioökonomie** «... umfasst die Produktion erneuerbarer biologischer Ressourcen und die Umwandlung dieser Ressourcen und Abfallströme in Produkte mit Mehrwert, wie Lebensmittel, Futtermittel, biobasierte Produkte und Bioenergie» (European Commission 2012).
- **Biogener Kohlenstoff** bedeutet ausschliesslich erneuerbarer Kohlenstoff (im Gegensatz zu fossilem Kohlenstoff wie Kohle und Petroleum), wie von der IEA Bioenergy (2022) definiert.
- **Endenergie** ist die Energie, die an die Verbraucher für den Endverbrauch geliefert wird, z. B. Strom für Beleuchtung oder Benzin für Fahrzeuge.
- **Energieholz** ist für die energetische Nutzung vorgesehen und umfasst Holz aus Wäldern, Holz von Bäumen ausserhalb von Wäldern (z. B. aus der Landschaftspflege), Holzreste aus der stofflichen Verarbeitung von Holz und schliesslich Abfallholz, das zuvor als Holzprodukt verwendet wurde.
- **Petajoule (PJ)** ist die für Primärenergie verwendete Einheit, für die Endenergie wird die Einheit **Gigawattstunden (GWh)** verwendet (1 PJ ≈ 278 GWh).
- **Primärenergieträger** (z. B. Holz, Kohle, Erdöl, Erdgas und Wasser) kommen in der Natur vor und sind noch nicht umgewandelt worden, unabhängig davon, ob sie in ihrer Rohform direkt nutzbar sind.
- **SNG** steht für synthetisches Erdgas. Es besteht hauptsächlich aus Methan.
- «Das **Treibhauspotenzial (GWP, Global Warming Potential)** wurde entwickelt, um einen Vergleich der Auswirkungen verschiedener Gase auf die globale Erwärmung zu ermöglichen. Es ist ein Mass dafür, wie viel Energie die Emissionen einer Tonne eines Gases in einem bestimmten Zeitraum im Vergleich zu den Emissionen einer Tonne Kohlendioxid (CO_2) absorbieren werden. Je grösser der GWP-Wert ist, desto mehr erwärmt ein bestimmtes Gas die Erde im Vergleich zu CO_2 in diesem Zeitraum. Der übliche Zeitraum für GWPs ist 100 Jahre» (EPA 2021).
- **TRL** (Technology Readiness Level) bedeutet Technologie-Reifegrad und gibt auf einer Skala von 1–9 an, wie weit eine Technologie entwickelt ist, wobei 1 sehr gering und 9 sehr weit entwickelt ist.

Zusammenfassung

Um die Energiewende in der Schweiz zu ermöglichen, hat SCCER BIOSWEET (i) die aktuellen und zukünftigen Potenziale an Primärenergie aus den verschiedenen verholzten Biomassearten in der Schweiz ermittelt; (ii) innovative Technologien für deren Nutzung in den Bereichen Wärme, Strom und Treibstoffe entwickelt und umgesetzt; sowie (iii) die zukünftige Rolle der verholzten Biomasse im Energiesystem untersucht.

SCCER BIOSWEET startete mit der Vision von 100 Petajoule (PJ) Primärenergieverbrauch pro Jahr aus Bioenergie bis 2050, was einer Verdoppelung des heutigen Energieverbrauchs aus Biomasse entspricht. Nach den Ergebnissen der im Rahmen von SCCER BIOSWEET durchgeführten Analysen ist dieses Ziel erreichbar und die verholzte Biomasse könnte 50 % dazu beitragen. Im Hinblick auf die Ressourceneffizienz und die Dekarbonisierung von Industrie und Gesellschaft sollte jedoch die stoffliche Nutzung von Holz, zum Beispiel als Dämmstoffe oder als Chemikalien in Bioraffinerien, im Vordergrund stehen und der energetischen vorangehen (Kaskadennutzung). Die energetische Nutzung von Holz umfasst in der Schweiz idealerweise die Produktion von Hochtemperaturwärme für industrielle Prozesse sowie Treibstoffe in gasförmiger und flüssiger Form für den boden- und fluggebundenen Verkehr. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Ausgleich von Schwankungen in der Produktion anderer Energieträger, insbesondere der Solarenergie.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 4
1.1 Ein Kompetenzzentrum für Bioenergie Forschung 4
1.2 Aktuelle Nutzung von Energieholz 4
1.3 Herausforderungen und Probleme 4

2 Heimische Potenziale 5
2.1 Energieholzpotenziale 5
2.2 Waldholz 7
2.3 Zukünftige Verfügbarkeit von Energieholz 11

3 Technologien zur Nutzung von Energieholz 12
3.1 Überblick 12
3.2 Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung 13
3.3 Erzeugung von gasförmigen Treibstoffen 17
3.4 Herstellung von flüssigen Treibstoffen 20
3.5 Bioraffinerie: integrierte Ansätze für die Holzumwandlung 23

4 Die Rolle der verholzten Biomasse im Energiesystem 23
4.1 Stoffliche oder energetische Nutzung? 23
4.2 Möglichkeiten der energetischen Nutzung 24
4.3 Optimale energetische Nutzung 25

5 Folgerungen und Empfehlungen 28

6 Referenzen 30

1 Einleitung

1.1 Ein Kompetenzzentrum für Bioenergie Forschung

Die Schweiz steht vor einem schrittweisen und tiefgreifenden Umbau ihres Energiesystems. Um Lösungen für die technischen, gesellschaftlichen und politischen Herausforderungen der Energiewende zu finden, haben Bundesrat und Parlament den Aktionsplan «Koordinierte Energieforschung Schweiz» lanciert. In dessen Rahmen wurden die KTI (heute Innosuisse), der Schweizerische Nationalfonds (SNF) und das Bundesamt für Energie (BFE) beauftragt, interdisziplinäre Forschungsnetzwerke zwischen Hochschulen zu entwickeln und zu leiten. Zur Unterstützung der Energiestrategie 2050 der Schweizer Regierung (KTI 2013) wurden acht Schweizer Kompetenzzentren für Energieforschung (SCCER) eingerichtet, die von 2014 bis 2020 in sieben Handlungsfeldern aktiv waren.

SCCER BIOSWEET (BIOmass for SWiss EnErgy fuTure) war ein Konsortium aus akademischen, privaten und öffentlichen Partnern. Seine Forschung im Bereich Biomasse konzentrierte sich darauf, Umwandlungsprozesse auf einen höheren technologischen Reifegrad (TRL) zu bringen, mit dem Ziel, zu den Lösungen für die Energiewende beizutragen. Für das Jahr 2050 wurde ein jährlicher Beitrag von 100 Petajoule (PJ) Primärenergie aus verholzter und nicht verholzter Biomasse angestrebt. Um dieses Ziel zu erreichen, müsste die derzeitige Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung verdoppelt werden, wobei Holz die Hälfte des angestrebten Wertes beitragen würde. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des SCCER BIOSWEET waren auf dieses ehrgeizige Ziel ausgerichtet, das heimische Potenzial von Biomasse als Energiequelle nachhaltig zu nutzen. BIOSWEET hat zu neuen Erkenntnissen geführt, und die vorliegende Synthese basiert weitgehend auf den durch das Konsortium gewonnenen Forschungsergebnissen.

1.2 Aktuelle Nutzung von Energieholz

Holz ist eine biogene Kohlenstoffquelle, die über die Photosynthese atmosphärisches CO_2 aufgenommen hat. Lebende Bäume im Schweizer Wald enthalten rund 121 t C/ha (Rigling *et al.* 2015). Das heutige Energieholz stammt aus Holz aus dem Wald, aus Bäumen ausserhalb des Waldes, aus Holzresten, die bei der stofflichen Verarbeitung von Holz anfallen, und schliesslich aus Altholz, das am Ende des Lebenszyklus eines Holzprodukts anfällt. Gemäss der Energiestatistik (BFE 2021a) hatte **die Holzenergie im Jahr 2019 einen Anteil von 4,9 % (41 PJ) am gesamten Endenergieverbrauch** in der Schweiz (836 PJ). Im ersten Pandemiejahr 2020 sank dieser Wert auf 747 PJ und der Anteil der Holzbrennstoffe stieg auf 5,3 %. Gemäss der schweizerischen Forststatistik (BAFU 2022) wurden im Jahr 2019 1,9 Mm^3 (19 PJ) **Energieholz aus heimischen Wäldern** geerntet (und 1,6 % mehr im ersten Pandemiejahr 2020). Rund 60 % dieser Menge waren Hackschnitzel und 40 % Stückholz. Der Anteil von Holzhackschnitzeln an der Gesamtmenge des Energieholzes aus dem Wald steigt seit Jahren an. Der **Gesamtenergieholzverbrauch** nimmt seit mehr als 20 Jahren stetig zu und erreichte Werte von 5,5 Mm^3 im Jahr 2019 und 5,6 Mm^3 im Jahr 2020. Der grösste Anteil (etwa 70 %) wurde in automatisierten Feuerungsanlagen verwendet. Die verholzte Biomasse wird hauptsächlich zur Erzeugung von Wärme (95 %) und zu einem kleinen Teil von Strom (5 %) in Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK-Anlagen) verbrannt (500 GWh/a im Jahr 2019 und 590 GWh/a im Jahr 2020; BAFU 2021, BAFU 2022).

1.3 Herausforderungen und Probleme

Das vorliegende White Paper bietet Informationen aus der aktuellen technologischen und sozialwissenschaftlichen Forschung und thematisiert wichtige Chancen und Risiken, die mit der energetischen Nutzung von Holz und ausgewählter fester, nicht verholzter Biomasse verbunden sind. Aufgrund der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, aber auch der potenziell weitreichenden ökologischen Auswirkungen dieser Nutzungen, sind die damit verbundenen Probleme sehr komplex. Je nach Situation sehen sich die verantwortlichen Akteure in Politik, Verwaltung und Wirtschaft mit folgenden Herausforderungen konfrontiert:

- **Begrenzter Rohstoff und marktabhängige Potenziale**, verbunden mit dem Risiko einer mangelnden Verfügbarkeit der Ressourcen bzw. von Versorgungsunsicherheiten, oft verursacht durch Konkurrenz, Umweltauflagen und Waldbesitzverhältnisse.
- **Hohe Produktions- und Logistikkosten in der gesamten Prozesskette**, verbunden mit dem Risiko einer verminderten Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit und mit der Schwierigkeit, zusätzliche Potenziale im Wald zu mobilisieren (dies aufgrund hoher Bereitstellungskosten, Abhängigkeiten von den Holzmärkten bei Kuppelprodukten sowie Unsicherheiten, die sich aus dem Klimawandel und politischen Vorgaben ergeben). Ähnliche Probleme treten in der Landwirtschaft und der Lebensmittelindustrie auf. Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Optionen, die von Skaleneffekten profitieren, ist es unwahrscheinlich, dass die Bereitstellungskosten im Zuge der Energiewende sinken werden.
- **Negative Umweltauswirkungen bei einzelnen Prozessen**. Möglich sind insbesondere ein nicht nachhaltiger Nährstoffentzug bei der Ernte des Waldholzes und Luftverschmutzungen, vor allem in Form von Feinstaub und organischen Verbin-

dungen aus Kleinfeuerungsanlagen, sowie Probleme bei der Ascheentsorgung.
- **Suboptimale Ressourcenallokation im Hinblick auf die Energie- und Ressourceneffizienz sowie den Kohlenstoff-Fussabdruck:**
  - Energetische Nutzung zu früh in der Prozesskette (Nichtbeachtung der stofflichen Nutzungskaskade vor der energetischen oder der Kreislaufnutzung).
  - Anwendungen, bei denen es nur um die Erzeugung von Niedertemperaturwärme geht, statt um die kombinierte Erzeugung von Strom (oder Treibstoff) und Wärme, die einen höheren Energiewert erzielt und eine grössere Wirkung im Hinblick auf die Substitution fossiler Brennstoffe hat.

  Diese Aktivitäten verringern den maximalen Beitrag zum Klimaschutz, zur Ressourcenschonung und zur nachhaltigen Entwicklung.
- **Hohe technische Anforderungen bei der Nutzung minderwertiger fester Biomasse.** Im Vergleich zu Holz ist feste Biomasse aus nicht-verholzten Quellen wie Getreiderückstände und Kaffeesatz aufgrund des hohen Gehalts an Asche, Stickstoff und anderen Verbindungen, die eine thermische Behandlung behindern, ein minderwertiger Brennstoff. Um das Energiepotenzial solcher Brennstoffe, aber auch von Holz in Form von Staub und ähnlichen Resten zu nutzen, werden neue Verbrennungstechnologien benötigt.

2 Heimische Potenziale

2.1 Energieholzpotenziale

Energieholz umfasst alle energetisch nutzbaren Quellen verholzter Biomasse (Waldholz, Holz von Bäumen ausserhalb des Waldes, Restholz aus Sägewerken und Schreinereien sowie bereits stofflich genutztes Altholz). In die untenstehende Potenzialanalyse, die auf einer früheren umfassenden Studie basiert (Thees *et al.* 2017; Burg *et al.* 2018), wurde grundsätzlich nur Holz aus der Schweiz einbezogen. Restholz (aus Schreinereien) und Altholz enthalten jedoch einen Anteil an ausländischem Holz, der als verfügbares inländisches Potenzial berücksichtigt wurde. Pellets werden hauptsächlich aus Sägerestholz gewonnen und wurden nicht in die Energieholzpotenziale einbezogen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Zu beachten ist, dass die hier dargestellten Energieholzpotenziale Teil der oben erwähnten Studie sind, die alle relevanten Biomassearten abdeckt und auf Schweizer Daten aus den Jahren 2014 bis 2016 basiert. Es gibt keine vergleichbaren Studien aus der Schweiz, die auf aktuelleren Daten basieren. Die Potenziale sind markt- und klimaabhängig und daher nicht konstant, aber dennoch in ihrer Grössenordnung verlässlich.

Die Obergrenze – **das theoretische Potenzial** – aller inländischen Biomasseressourcen liegt bei 209 PJ/a Primärenergie (Burg *et al.* 2018) (Abb. 1). Der Anteil des theoretisch verfügbaren Energieholzes beträgt 56 %, was 117 PJ/a entspricht. Die Verfügbarkeit von nachhaltig erzeugter Biomasse für die energetische Nutzung wird vor allem durch ökologische und ökonomische Restriktionen eingeschränkt. Unter Berücksichtigung dieser Restriktionen halbiert sich das theoretische Potenzial für die jährliche Bioenergiebereitstellung in etwa, d. h. **das nachhaltige Potenzial** sämtlicher Biomasse beträgt 97 PJ/a und 50 PJ/a, wenn nur verholzte Biomasse betrachtet wird (50 PJ/a ~ 14 TWh/a, was 5,43 Mio. t/a biogenes CO_2 bedeutet). Zieht man die bereits genutzte Biomasse ab, ergibt sich **das zusätzlich nutzbare nachhaltige Potenzial**: Rund 44 PJ/a der Schweizer Biomasse (4 % des Bruttoenergieverbrauchs) bzw. **14 PJ/a im Falle der verholzten Biomasse stehen zusätzlich für die Energiegewinnung zur Verfügung** (Abb. 1). Diese Potenziale werden jedoch derzeit vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht genutzt.

Waldholz hat von allen verholzten Biomassen die grössten Potenziale (Abb. 1). Sein nachhaltiges Potenzial (26 PJ/a) ist grösser als die Summe der anderen drei verholzten Biomassearten (24 PJ/a). Die räumliche Verteilung zeigt erhebliche Unterschiede zwischen dem Flachland und den Gebirgsregionen (Einzelheiten siehe Abschnitt 2.2.4). Das nachhaltige Potenzial an **Restholz** (8 PJ/a) liegt vor allem im Mittelland, insbesondere im Nordosten der Schweiz, wo die Holzindustrie konzentriert ist. Die Hälfte des Potenzials entfällt auf die Sägewerke, die andere Hälfte verteilt sich auf zahlreiche Holzverarbeitungsbetriebe. Bei diesem Restholz, das je nach Marktlage energetisch oder als Material für Spanplatten genutzt wird, gibt es kein zusätzliches Potenzial. Das nachhaltige Potenzial von **Altholz** beträgt 12 PJ/a, wobei es zwischen den Regionen grosse Unterschiede gibt; diese reichen von wenigen kg bis zu mehr als 200 kg pro Einwohner und Jahr. Ein Drittel des theoretischen Altholzpotenzials wird exportiert und im Ausland genutzt, je zur Hälfte für die stoffliche und energetische Nutzung (Erni *et al.* 2017; Thees *et al.* 2017). Das nachhaltige Potenzial an **Bäumen ausserhalb des Waldes** (5 PJ/a) befindet sich vor allem in den besiedelten Regionen des Mittellandes und des Rhein- und Rhonetals. Auch in alpinen Regionen sind Potenziale vorhanden, vor allem in Form von Hecken und entlang von Wasserläufen, die aber kaum zugänglich sind.

Um die Energieholzpotenziale für die Energiewende zu nutzen, ist es wichtig, ihre Verteilung auf kommunaler Ebene zu verstehen (Abb. 2). Ausgedrückt **pro km² Landfläche sind die grössten Potenziale im**

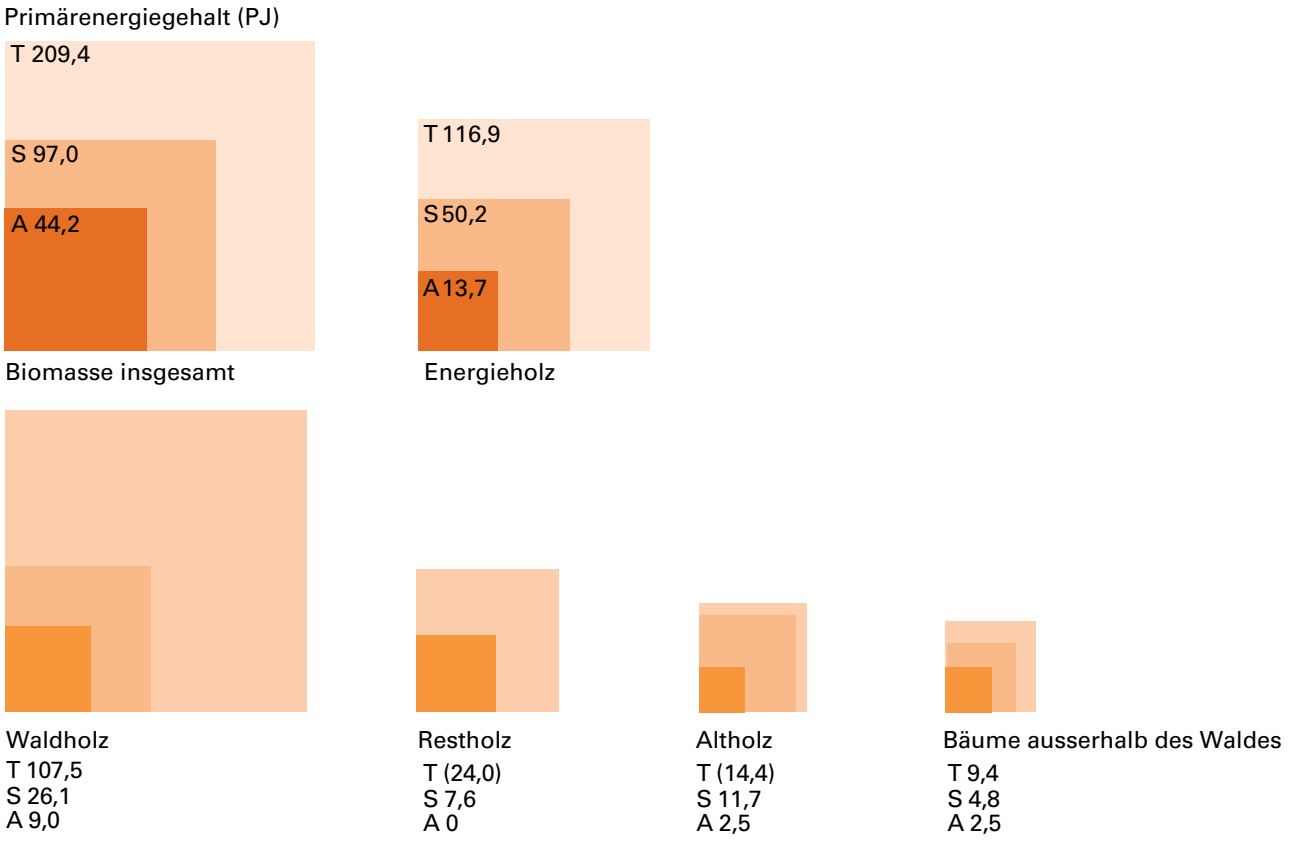

Abbildung 1: Gesamte, jährlich energetisch nutzbare Holzpotenziale in der Schweiz. Die Fläche jedes Quadrats ist proportional zu der Primärenergiemenge, die es repräsentiert. Für das Waldenergieholz bezieht sich die Abbildung auf Wälder mit mittlerer Bewirtschaftungsintensität, was einem moderaten Vorratsabbau und einem weniger energieholzfreundlichen Markt entspricht (d. h. die stoffliche Bewertung dominiert den Holzmarkt; Thees *et al.* 2020). Anmerkung: Waldholz und Bäume ausserhalb des Waldes sind die Quellen der gesamten inländischen verholzten Biomasse und ihrer nachfolgenden Verwendungen. Die Addition der theoretischen Potenziale des Waldholzes, des industriellen Restholzes und des Altholzes führt daher zu einer Doppelzählung, da das Potenzial von verarbeitetem Holz (Restholz, Altholz) teilweise auf im Inland gewachsenen Bäumen beruht. Es ist auch zu beachten, dass die Potenziale mit Unsicherheiten behaftet sein können, die sich nur schwer quantifizieren lassen (siehe Abschnitt 1.3).

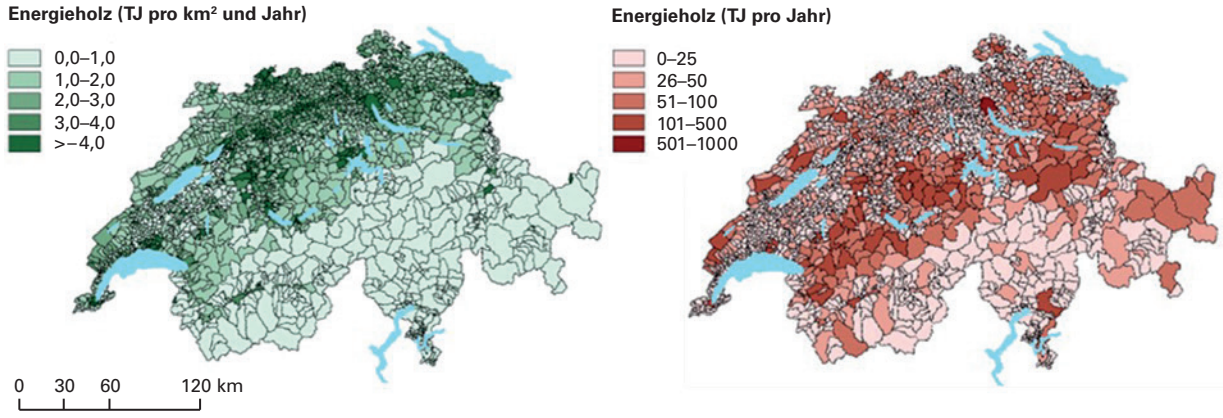

Abbildung 2: Ökologisch und ökonomisch nachhaltige Energieholzpotenziale pro Gemeinde im Jahr 2014: relative Werte in Terajoule (1 TJ = 0,001 PJ) pro km² und Jahr (links) und absolute Werte in TJ pro Jahr (rechts). Weitere Informationen sind auf map.geo.admin.ch (unter «verholzte Biomasse») verfügbar.

Jura und im Mittelland zu finden (Abb. 2 links). Betrachtet man die Gesamtpotenziale der einzelnen Gemeinden, so finden sich die grössten Potenziale in den Voralpen und in den Alpen (Abb. 2 rechts).

Um die Situation im Schweizer Mittelland besser zu verstehen, wurde die Machbarkeit der Energiewende im Kanton Aargau im Hinblick auf alle Formen der erneuerbaren Energien umfassend untersucht (Lemm *et al.* 2020). Verschiedene Strategien zur Deckung des lokalen Bedarfs an Strom, Wärme und Treibstoff bis 2035 wurden unter besonderer Berücksichtigung des Beitrages der Biomasse verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die nachhaltig verfügbaren erneuerbaren Energiequellen im Aargau wahrscheinlich nicht ausreichen werden, um den prognostizierten Energiebedarf im Jahr 2035 zu decken, weder mit den derzeit verfügbaren noch mit den zukünftigen Technologien zur Umwandlung von Biomasse. Gemäss den Szenarien können 74 % des Energiebedarfs im Aargau durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden. **Energie aus Biomasse kann den Autarkiegrad um bis zu 13 % erhöhen, wobei Energieholz etwa die Hälfte beiträgt.** Je nach Szenario werden 26–43 % (2500–5700 GWh) des gesamten Energiebedarfs nicht gedeckt, insbesondere jener für Mobilitätszwecke. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Energiewende nicht nur auf lokaler Ebene betrachtet werden kann, sondern das Gesamtsystem auf nationaler und internationaler Ebene berücksichtigt werden muss, um nachhaltige und zuverlässige Lösungen zu entwickeln.

2.2 Waldholz

Waldholz ist die wichtigste Quelle für Energieholz, doch dessen Potenzial ist keine stabile Grösse. Sein Potenzial hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z. B. von den Strategien der Waldbewirtschaftung in Verbindung mit ökologischen Beschränkungen, der Nachfrage auf den Holz- und Energiemärkten sowie den Bereitstellungskosten und den Subventionen in der Forstwirtschaft. Diese Faktoren werden wiederum von Bedingungen wie der Ressourcen- und Energiepolitik sowie den Veränderungen von Klima und Umwelt beeinflusst.

2.2.1 Waldbewirtschaftungsstrategien und Holzmarktsituationen

Waldbewirtschaftungsstrategien und Marktsituationen haben einen grossen Einfluss auf die Energieholzpotenziale im Wald. Zu deren Analyse (Thees *et al.* 2020) wurden folgende Waldbewirtschaftungsstrategien simuliert:

a. **Kontinuierlicher Vorratsanstieg** (CSI): Diese Art der Bewirtschaftung wie bisher hat eine kontinuierliche Zunahme des Holzvorrats zur Folge. Sie widerspiegelt die aktuellen Ernte- und Bewirtschaftungspraktiken in der Schweiz und kann daher als Referenzszenario betrachtet werden. In allen Regionen, mit Ausnahme des Mittellandes,

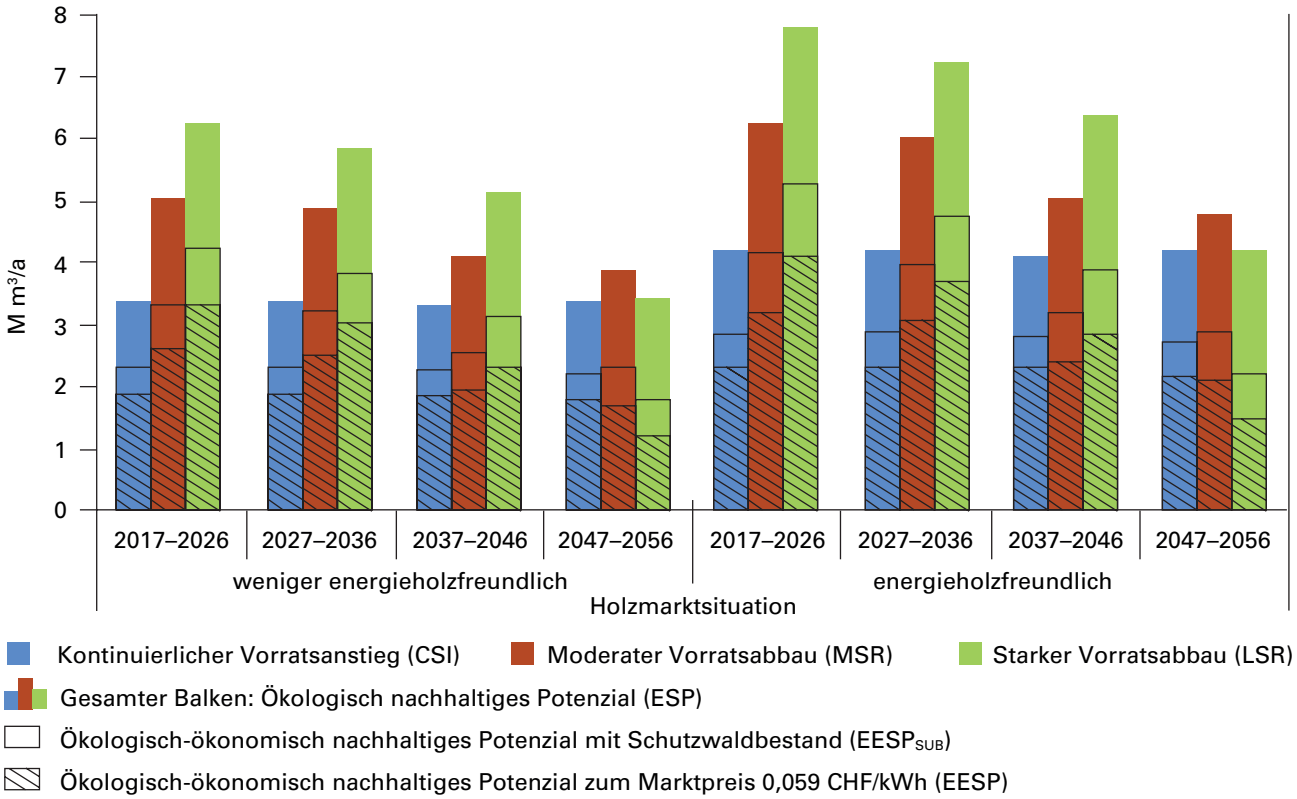

Abbildung 3: Nachhaltige Waldenergieholzpotenziale (als Holzmengen [Mm³/a]), die in jeder der vier Dekaden unter Verwendung von drei Waldbewirtschaftungsszenarien (CSI, MSR, LSR) und zwei Holzmarktsituationen (weniger energieholzfreundlich und energieholzfreundlich) in der gesamten Schweiz jährlich produziert werden (Thees *et al.* 2020).

führt sie zu steigenden Vorräten; im Durchschnitt liegt der Vorrat derzeit bei 370 m³/ha.

b. **Moderater Vorratsabbau** (MSR): Diese Strategie mittlerer Intensität beinhaltet eine moderate Vorratsreduzierung. Sie zielt auf Wachstumsvorräte von 300–310 m³/ha bis 2046 ab und soll das Wachstum beschleunigen.
c. **Starker Vorratsabbau** (LSR): Diese Strategie hoher Intensität beinhaltet eine starke Vorratsreduzierung; der Zielvorrat beträgt 250 m³/ha. Ausgegangen wird von einer hohen Nachfrage nach Energieholz aus den Wäldern bis 2046, was zu häufigeren Durchforstungen und 40 % kürzeren Umtriebszeiten führt.

Im Durchschnitt der drei Waldbewirtschaftungsszenarien waren die Energieholzpotenziale aus den heimischen Wäldern bei einer energiefreundlicheren Holzmarktsituation um 22 % höher als bei einer weniger energiefreundlichen (Abb. 3). Letztere führte zu einer höheren stofflichen Nutzung. Während das Bewirtschaftungsszenario Kontinuierlicher Vorratsanstieg (CSI) die konstanteste Versorgung über mehrere Jahrzehnte ermöglichte, **ergaben beide Vorratsreduktionsszenarien grössere kumulierte Gesamtpotenziale.** Über den gesamten 40-jährigen Zeitraum führten die Vorratsabbauszenarien zu einem Anstieg der ökologisch nachhaltigen Potenziale (ESP) um 32 % (MSR) bzw. 52 % (LSR) im Vergleich zum Bewirtschaftungsszenario (CSI), was 8–16 PJ/a bzw. 1,1–2,2 Mm³/a entspricht. Werden auch ökonomische Restriktionen berücksichtigt, führen die intensiveren Bewirtschaftungen zu einer 25 %igen (MSR) bzw. 41 %igen (LSR) Erhöhung des ökologisch und ökonomisch nachhaltigen Potenzials mit Subventionen in Schutzwäldern (EESPSUB), was 4–9 PJ/a bzw. 0,6–1,2 Mm³ entspricht.

Die intensiveren Waldbewirtschaftungsstrategien zeigten kurz- und mittelfristig einen Potenzialüberschuss gegenüber der aktuellen Praxis (Abb. 3). **Die Verfolgung dieser Strategien könnte also in der Phase der Energiewende vorübergehend zusätzliche Potenziale bieten.** Im Gegensatz zur Waldbewirtschaftungsstrategie des starken Vorratsabbaus (LSR) führte die moderate Strategie (MSR) jedoch nicht zu einem erheblichen Rückgang der für 2050 erwarteten Waldenergieholzmenge. Eine interaktive Karte auf www.waldwissen.net ermöglicht individuelle Berechnungen des ökologisch nachhaltigen Potenzials unter verschiedenen waldbaulichen und erntebezogenen Bedingungen auf Kantonsebene (Erni *et al.* 2021).

2.2.2 Bereitstellungskosten und Erlöse

Die Bereitstellungskosten (Ernte, Transport und Hackschnitzelerzeugung) einerseits und die Erlöse für Waldenergieholz andererseits beeinflussen weitgehend die nachhaltigen Potenziale, die sich aus den verschiedenen Waldbewirtschaftungsszenarien ergeben. Bei den aktuellen Marktpreisen zum Untersuchungszeitpunkt von 0,059 CHF/kWh könnten pro Jahr 1,9 Mio. m³ Laubenergieholz und 0,6 Mm³ Nadelenergieholz mobilisiert werden (Abb. 4). Wegen des höheren Energiegehalts pro Volumeneinheit könnte das meiste Laubenergieholz zu geringeren Kosten als das Nadelholz produziert werden; die Bereitstellung von Nadelenergieholz ist teurer und gleichmässiger über alle Kostenklassen verteilt. Bei Marktpreisen unter 0,059 CHF/kWh dominieren die Laubhölzer zunehmend die Versorgung mit Energieholz, während der Nadelholzanteil bei Marktpreisen über 0,08 CHF/kWh zunimmt. **Ein Preisanstieg von 0,01 CHF/kWh ausgehend von einem Referenzpreis von 0,059 CHF/kWh würde die verfügbare Waldenergieholzmenge um ~1 Mm³/a erhöhen** (Thees *et al.* 2020).

Der **Transport von Biomasse** macht einen grossen Teil der Endkosten und des Preises der energetischen Biomassenutzung aus und verursacht

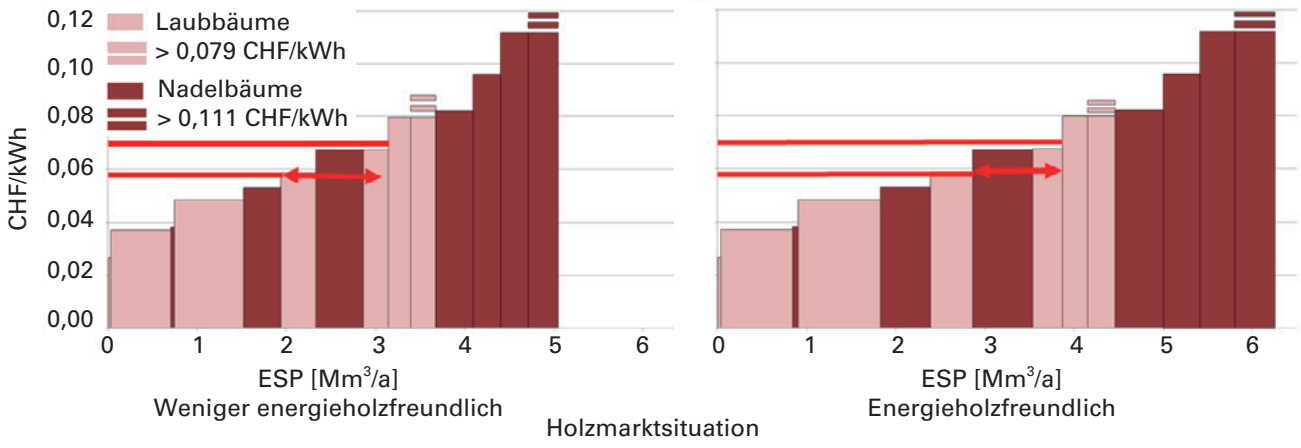

Abbildung 4: Auswirkung der Energiepreise auf die jährlichen Waldenergieholzpotenziale. Das ökologisch nachhaltige Potenzial (ESP) zwischen 2017 und 2026 ist für das Waldbewirtschaftungsszenario mit moderatem Vorratsabbau unter einer weniger energieholzfreundlichen (links) und einer energieholzfreundlichen (rechts) Holzmarktsituation dargestellt. Die Breite der Balken spiegelt die zusätzliche Menge pro Kostenklasse wider, die bei einem bestimmten Marktpreis verfügbar wäre. Die roten Linien zeigen das zusätzliche Potenzial bei einer Preiserhöhung von 0.01 CHF/kWh.

Treibhausgasemissionen. In einer technisch-ökonomischen Analyse des Biomassetransports (Schnorf *et al.* 2021) wurden die häufigsten Transportketten vom Lieferanten zum Endverbraucher ermittelt. Die Transportentfernungen zum Endverbraucher liegen zwischen 1 und 15 km für Stückholz und zwischen 5 und 30 km für Hackschnitzel. Der Transport von Hackschnitzeln ist in Bezug auf Kosten, Energiebilanz und CO_2-Emissionen in der Regel effizienter als der Transport von Stückholz. **In der Schweiz sind die Kosten das Haupthindernis für den Biomassetransport** und nicht der Energieverbrauch der Fahrzeuge oder die CO_2-Emissionen.

2.2.3 Subventionen

Die Bewirtschaftung von Schutzwäldern (bis zu 90 % der Waldfläche in Bergregionen) wird in der Schweiz subventioniert, um eine minimale Bewirtschaftung nach nationalen Richtlinien zu gewährleisten (Losey 2013). **Die für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern zur Verfügung stehenden Subventionen erhöhen somit die Menge des verfügbaren Waldenergieholzes.** Thees *et al.* (2020) fanden für die drei in Abbildung 3 dargestellten Bewirtschaftungsszenarien heraus, dass die Energiemenge um durchschnittlich 25 % und die Holzmenge um durchschnittlich 28 % erhöht werden könnten. Der Unterschied zwischen den Energie- und den Holzmengen spiegelt die Dominanz von Nadelbäumen in den Berggebieten wider, da Nadelbäume einen geringeren Energiegehalt pro Volumeneinheit aufweisen. Wie erwartet sind die grössten relativen Zuwächse, die sich aus dieser Subventionierung ergeben, in der Alpenregion zu verzeichnen.

2.2.4 Regionale Unterschiede

Die **regionalen Analysen** ergaben unterschiedliche Ergebnisse in den alpinen und den nicht alpinen Regionen und **geben Hinweise darauf, welche Regionen besonders von Investitionen zur Förderung einer nachhaltigen Energieholznutzung profitieren würden.** Fehlende Wirtschaftlichkeit reduziert die absoluten Potenziale von Waldenergieholz in den Alpenregionen auf weniger als die Hälfte des ESP in den Vorratsabbauszenarien und auf etwas mehr als die Hälfte im CSI-Szenario. Allerdings können diese Potenziale in den Alpenregionen weitgehend nur mit Hilfe von Subventionen mobilisiert werden. Im Jura und im Mittelland, wo das Gelände besser zugänglich ist und es viel Laubholz gibt, war die Verringerung des Energieholzpotenzials aus wirtschaftlichen Gründen dagegen wesentlich kleiner. Daher sind es diese Regionen, in denen strategische Investitionen besonders vorteilhaft wären. Aber selbst im Jura und im Mittelland ist die Verfügbarkeit von zusätzlichem Energieholz aus dem Wald recht begrenzt (z. B. MSR-Szenario 2017–2026: Jura 2,7 PJ/a, Mittelland 4,4 PJ/a).

Darüber hinaus wurden **Bioenergie Hot- und Coldspots** identifiziert (Abb. 5) und mit sozioökonomischen Merkmalen verglichen (Mohr *et al.* 2019). Diese umfassende Beschreibung der Situation auf lokaler Ebene kann zu einer effektiven Umsetzung von Bioenergie beitragen. **Die Hotspots, die ein hohes Poten-**

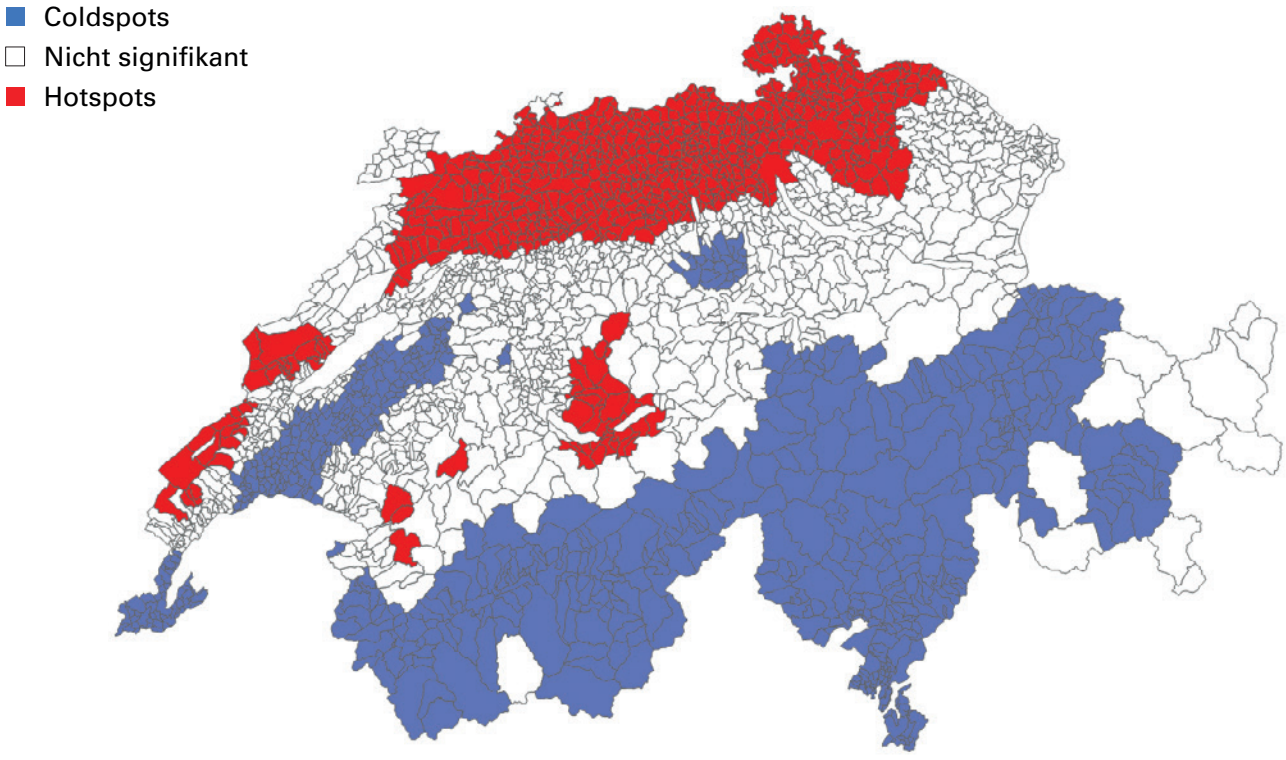

Abbildung 5: Hot- und Coldspots des nachhaltigen Potenzials an Waldenergieholz pro Fläche.

zial an Energieholz aus Wäldern pro Flächeneinheit darstellen, liegen im Norden des Landes, d. h. im Mittelland und im Jura, während die Coldspots in den Alpen zu finden sind. Geländebedingt ist die Ernte von Waldholz in den Alpen oft zu kostspielig, was zu einem geringeren nachhaltigen Ressourcenpotenzial führt. Es wurde festgestellt, dass sich sozioökonomische Eigenschaften, wie Haushaltseinkommen, politische Orientierung und Bevölkerungsdichte, stark zwischen Hotspots und Coldspots unterscheiden. Der Vergleich zeigt zwar eher eine Korrelation als eine Kausalität, weist aber dennoch auf mögliche Zusammenhänge hin und die lokal gewonnenen Erkenntnisse könnten auf Bioenergieprojekte in ähnlichen Gebieten angewendet werden. So ist beispielsweise die Einstellung der Bevölkerung zur Energiewende in Coldspots im Durchschnitt besser als in Hotspots. Eine stärkere Einbeziehung der Bevölkerung in die Energiediskussion könnte also dazu beitragen, dass die geeignetsten Standorte für den Ausbau der Bioenergie von der lokalen Bevölkerung unterstützt werden.

2.2.5 Chancen und Risiken

Was die **Chancen** betrifft, so ist Holz eine erneuerbare Ressource und eine **einzigartige biogene Kohlenstoffquelle, die auf vielfältige Weise sowohl stofflich als auch energetisch genutzt werden kann.** Mehrfachnutzungen, d. h. **Kaskadennutzungen,** sind möglich, wobei die energetische Nutzung am Ende der Kette steht. Die wiederholte stoffliche Nutzung desselben Holzes ist besonders effizient und ressourcenschonend. Sie bietet ökologische und ökonomische Vorteile, wie die Bindung von Treibhausgasen, die Speicherung und Nutzung von Kohlenstoff, die Schaffung von Mehrwert, die Unterstützung der Energiewende und die bessere Integration von Holz in die Kreislaufwirtschaft. Die **Lagerfähigkeit** von Holz – stehend im Wald oder liegend auf Lager – ist eine weitere wichtige Eigenschaft; dadurch sind Holzressourcen flexibel in ihrer Nutzung, eine besonders wertvolle Eigenschaft im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung. **Zudem speichert Holz – sowohl als Rohstoff als auch als verarbeitetes Produkt – Kohlenstoff** und unterstützt damit das Ziel, CO_2-Emissionen zu reduzieren (Thürig und Kaufmann 2008, 2010; Werner *et al.* 2010; Steubing 2013; Mehr *et al.* 2018). Sein **hoher Kohlenstoffgehalt** (etwa 50 % auf Trockenmassebasis, z. B. Diestel und Weimar 2014) ermöglicht die nachhaltige Produktion von Chemikalien und Treibstoffen (Brethauer *et al.* 2021). Die **dezentrale Produktion** des Holzes ermöglicht seine flächendeckende Verfügbarkeit. Dabei wird der grösste Teil im Wald als **wichtige Ökosystemleistung** einer nachhaltigen multifunktionalen Waldbewirtschaftung produziert, d. h. Waldholz wird umweltverträglich erzeugt und geerntet. Die Holzproduktion in Wäldern und Landschaften unterstützt die Biodiversität und andere Ökosystemleistungen. Sie schafft darüber hinaus Arbeitsplätze, was für die Beschäftigung im ländlichen Raum von Bedeutung ist.

Was die Energie betrifft, so kann Holz zur Erzeugung mehrerer Endnutzungsformen – Wärme, Strom und Kraftstoff – verwendet werden. So kann beispielsweise die Stromerzeugung im Winter durch die Verwendung von Holz erhöht oder der Strombedarf von Wärmepumpen durch die Erhöhung der Anzahl holzbefeuerter Heizanlagen verringert werden. Aufgrund der Lagerfähigkeit von Holz ist die zeitliche Flexibilität bei der energetischen Nutzung sehr gross und eignet sich für die Sektorkopplung. **Insofern kann Energieholz die schwankende Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien wie Wind oder Sonne ausgleichen.** Energieholz gilt als CO_2-neutral, da bei seiner Verbrennung nicht mehr CO_2 in die Atmosphäre abgegeben wird, als während des Pflanzenwachstums aus der Atmosphäre absorbiert wurde. Dies macht es zu einem vorteilhaften **Ersatz für fossile Brennstoffe,** deren Verwendung die Gesamtmenge an Kohlenstoff in der Biosphäre-Atmosphäre vergrössert. Aus diesem Grund sind die Anlagenbetreiber nicht verpflichtet, im Rahmen des EU-Emissionshandels Emissionszertifikate für Emissionen aus Biomasse zu erwerben. Darüber hinaus ist holzbasierte (und nicht holzbasierte) Bioenergie in Verbindung mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (BECCS; siehe Abschnitt 3.1, Abb. 7) eine der technischen Optionen, die zu negativen Emissionen führen können (IEA 2020).

In Mitteleuropa ist Waldenergieholz (dünne oder minderwertige Holzsortimente) in der Regel ein Kuppel- bzw. Nebenprodukt der Ernte des wertvolleren Stammholzes; dennoch ist Energieholz in vielen Schweizer Forstbetrieben zum Hauptprodukt geworden (>50 % der verarbeiteten Sortimente). Dies ist auch eine Folge ungeplanter Holznutzungen nach Extremereignissen im Zuge des Klimawandels (Stürme, Insektenkalamitäten) und der Abwanderung der Zellstoff- und Papierindustrie aus Mitteleuropa. Die forstliche Produktion und Nutzung von Energieholz generiert nicht nur Einkommen, sondern trägt auch zur Finanzierung der Pflege von Waldbeständen und zu deren Schutz vor Insekten- und Pilzkrankheiten bei.

Aktuell und global gesehen wird die Nutzung von Energieholz aus Wäldern auch kritisch beurteilt. So fordern Hunderte von Wissenschaftlern, die direkte Nutzung von Energieholz aus Wäldern aus Klimaschutzgründen komplett einzustellen (Raven *et al.* 2021). Diese Forderungen beruhen nach Ansicht der IEA (2020, 2021) jedoch auf Fehleinschätzungen. Die Missverständnisse bezüglich der energetischen Nutzung von Waldbiomasse als Klimaschutzstrategie hat die IEA in einer kompakten Zusammenfassung versucht auszuräumen (IEA 2020), aber die Debatte geht weiter (Norton *et al.* 2021; Sterman *et al.* 2022). In vielen Fällen mangelt es an Wissen über nachhaltige Waldbewirtschaftung in Europa. So stellen Schulze *et al.* (2021) aus deutscher Sicht fest, dass eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und die damit verbundene stoffliche und energetische Nutzung des geernteten Holzes langfristig einen grösseren Beitrag zum Klimaschutz leisten würde als eine natürliche Waldentwicklung ohne jegliche Holznutzung. Fehrenbach

et al. (2022) kommen bezogen auf Deutschland zu gegenteiligen Ergebnissen. Darüber hinaus zeigten Blair *et al.* (2021), dass die Lieferketten für verholzte Biomasse aus Wäldern den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen entsprechen, die auch andere Ziele als die CO_2-Speicherung verfolgen.

Die Ergebnisse solcher Analysen der Nutzung des Waldholzes sind stark abhängig von der Zeit sowie von den Systemgrenzen und der Differenziertheit der Betrachtung. Bezüglich der energetischen Nutzung ist es daher im Hinblick auf den Klimaeffekt zum Beispiel relevant

- ob neben der traditionellen Verbrennung zur Wärmegewinnung moderne Umwandlungstechnologien, die nicht nur Wärme, sondern auch Strom und Treibstoffe mit hoher Energie- und CO_2-Effizienz erzeugen (s. Kap. 3 und 4), berücksichtigt werden;
- inwieweit die in der Schweiz (und in Mitteleuropa) unterschiedlichen Standorte, Baumarten, Umtriebszeiten sowie Stärken und Häufigkeiten der Erntemassnahmen differenziert betrachtet werden;
- inwieweit der bei Nadel- und Laubholz unterschiedliche Anteil des geernteten Holzes, welcher der energetischen Nutzung zugeführt wird (und nicht der unter CO_2-Aspekten zu bevorzugenden stofflichen), Berücksichtigung findet.

Einem kurzfristigen Anstieg der Energieholzernte sind **institutionelle Grenzen** gesetzt. In der Schweiz gibt es rund 245 000 private Kleinwaldbesitzer, die 29 % des Waldes besitzen (Durchschnittsgrösse 1,5 ha). Die Bereitschaft dieser Waldbesitzer, kurzfristig (viel) mehr oder überhaupt einen Teil ihres Holzes zu ernten, wird oft überschätzt. Viele Waldbesitzer verhalten sich nicht rein wirtschaftlich. Bei den kleinsten Privatwäldern sehen die Eigentümer ihren Wald oft nicht als relevante Einnahmequelle an (sog. Geringfügigkeitsproblem). Auch die Gemeinden, die für 50 % der Waldfläche in der Schweiz verantwortlich sind, verhalten sich aus verschiedenen Gründen oft nicht gewinnorientiert. **Die Eigentumsverhältnisse können also den Umfang und die Geschwindigkeit der Holznutzung stark beeinflussen, und die Wirkung finanzieller Anreize ist begrenzt.** Zudem kann es sein, dass die Erntekapazitäten nicht ausreichen und insbesondere die Anzahl der für die Holzernte benötigten Arbeitskräfte kurzfristig stark erhöht werden müsste.

Auf betrieblicher Ebene liegen mögliche **Umweltrisiken** der Energieholznutzung im Wald vor allem in der Übernutzung der Waldbestände (aber auch in deren Unternutzung) sowie in der Nutzung von Reisig, Laub und Nadeln in einem Ausmass, das den Nährstoffhaushalt der Waldböden beeinträchtigt. Um diese Risiken zu minimieren, überwachen die kantonalen Forstdienste die Einhaltung der gesetzlichen Vorschriften und gewährleisten eine nachhaltige Waldbewirtschaftung. Forstliche Zertifizierungssysteme wie FSC (Forest Stewardship Council) und PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes) verfolgen das gleiche Ziel.

Auf übergeordneter Ebene besteht das **Risiko verminderter Ressourceneffizienz** durch den hohen Anteil der Energieholznutzung im Wald bzw. die direkte Nutzung von Rohholz für energetische Zwecke und die daraus resultierenden ungenutzten Möglichkeiten der Kaskadennutzung. Diese Allokation der Ressource verschärft den Wettbewerb mit den stofflich nutzenden Holzindustrien (zum Beispiel Spanplattenherstellung) auf den Beschaffungsmärkten und kann deren Abwanderung fördern.

Mögliche **Risiken einer mangelnden Wirtschaftlichkeit** der energetischen Holzverwendung ergeben sich aus dem begrenzten Angebot an Energieholz, seiner teuren Bereitstellung in Wald und Flur und den vergleichsweise kostspieligen Folgeprozessen der Umwandlung, Abgasreinigung, Verteilung und Entsorgung. Diesen Risiken kann durch eine hochwertige Energienutzung entgegengewirkt werden, zum Beispiel durch die Deckung von Bedarfsspitzen durch die Erzeugung von Prozesswärme für die Industrie und die Erzeugung hochwertiger Energieprodukte wie Flugbenzin. Auch mögliche **Risiken einer unsicheren Rohstoffversorgung** der Verwertungsanlagen sind von Bedeutung. Im Falle von Energieholz sind jedoch langfristige Lieferverträge mit Forstbetrieben möglich, die dazu beitragen, diese Risiken zu verringern.

2.3 Zukünftige Verfügbarkeit von Energieholz

Gemäss Modellrechnungen (Erni *et al.* 2020) **ist zu erwarten, dass das nachhaltige Holzenergiepotenzial bis 2035 leicht ansteigen und danach bis 2050 leicht abnehmen wird** (Abb. 6). Bei Anwendung der bisherigen Waldbewirtschaftungsstrategie «kontinuierlicher Vorratsanstieg» (d. h. Holznutzung < Zuwachs) ergibt sich ein eher konstantes zukünftiges nachhaltiges Energieholzpotenzial. Es kann davon ausgegangen werden, dass die alternativen, nutzungsintensiveren Waldbewirtschaftungsstrategien bis zum Jahr 2035 zu grösseren Anteilen (4–7 %) am jährlichen Bruttoenergieverbrauch (Primärenergie) führen werden. Der Anteil der verholzten Biomasse im Vergleich zur gesamten nachhaltigen Biomasse wird zwischen 42–64 % im Jahr 2035 und 37–57 % im Jahr 2050 liegen.

Eine weitere Überlegung in diesem Zusammenhang ist, dass die politisch gewollte Konvergenz hin zu einer **Kaskaden- und Kreislaufwirtschaft** in der Schweiz (BAFU, BFE und SECO 2018) und in Europa (z. B. EEA 2018; Husgafvel *et al.* 2018) die **Energieholzpotenziale aus Wäldern und aus Industrierestholz vorübergehend senken könnte.** Geringwertige Holzsortimente könnten im Bestreben, fossile Rohstoffe zu vermeiden, vermehrt zu Holzprodukten wie Dämm- und Verpackungsmaterial verarbeitet werden und damit in Konkurrenz zur energetischen Nutzung stehen. Die Energieholzpotenziale könnten auch sinken, wenn Rest- und Abfallholz aus der Produktverarbeitung besser in (innovative) Kaskaden und Recycling integriert werden. Später, wenn das Holz effizienter stofflich genutzt wird, ist eine Verlagerung vom Energieholz zum Altholz zu erwarten (Erni *et al.* 2020). Es

ist auch zu erwarten, dass Energieholz aufgrund mangelnder Wettbewerbsfähigkeit im Niedertemperaturwärmemarkt in grossem Umfang ersetzt wird, wenn die Wärmepumpen effizienter werden.

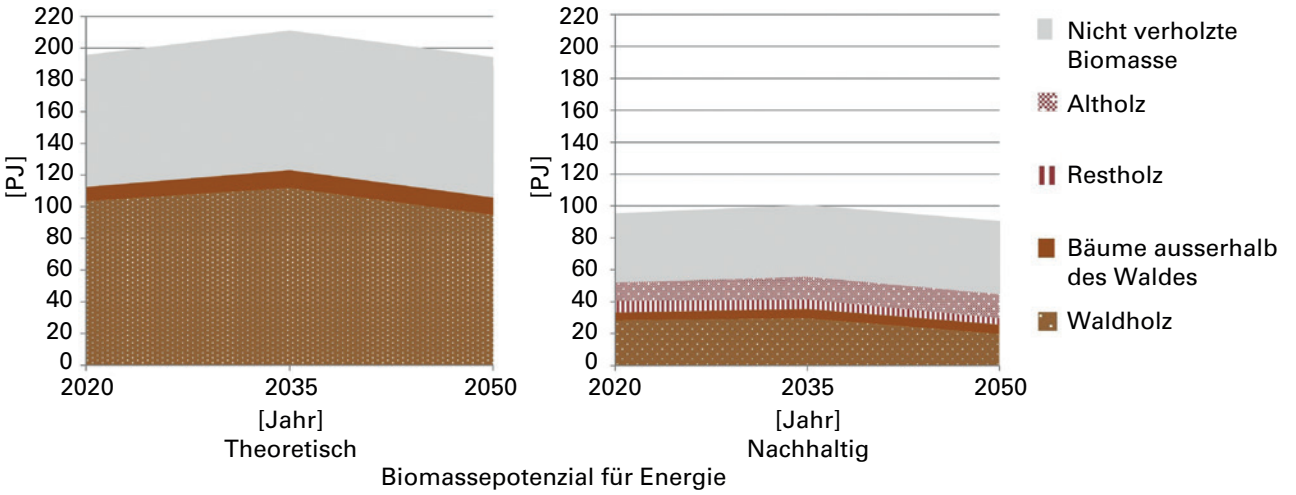

Abbildung 6: Jährliche theoretische (links) und nachhaltige (rechts) energetisch nutzbare Biomassepotenziale heute und in Zukunft. Für Energieholz aus Wäldern bezieht sich die Abbildung auf eine Waldbewirtschaftungsstrategie mittlerer Intensität, die einer moderaten Vorratsreduzierung bei einem weniger energieholzfreundlichem Markt entspricht. Im theoretischen Potenzial sind Altholz und Restholz in den ursprünglichen Holzquellen von Waldholz und Bäumen ausserhalb des Waldes enthalten. Angepasst aus Burg *et al.* (2019) und Erni *et al.* (2020, Supplementary Material).

3 Technologien zur Nutzung von Energieholz

3.1 Überblick

Im Gegensatz zu anderen erneuerbaren Energieträgern kann verholzte Biomasse zur Erzeugung einer Vielzahl von Energiedienstleistungen genutzt werden. Diese Vielfalt kann für die Energiewende entscheidend werden, da sie das Energiesystem flexibler macht. Diese Flexibilität geht jedoch einher mit komplexen Konversionsprozessketten und einem breiten, multidisziplinären Forschungs- und Entwicklungsfeld für Biomassekonversionsverfahren (Abb. 7). Die folgenden Abschnitte beschreiben die

Forschungsbeiträge von SCCER BIOSWEET zu den wichtigsten Konversions- und Nutzungspfaden für verholzte Biomasse.

Die Verbrennung von verholzter Biomasse oder Zwischenprodukten sowie der daraus gewonnenen Energieträger ermöglicht die direkte Strom- und Wärmeerzeugung (siehe Abschnitt 3.2). Die Verbrennung wird daher zur Wärme-Kraft-Kopplung oder zur reinen Wärmeerzeugung eingesetzt. Letztere wird in Zukunft vorzugsweise zur Deckung von Lastspitzen (z. B. während des Mangels an erneuerbarem Strom im Winter) und für Hochtemperatur-Prozesswärme

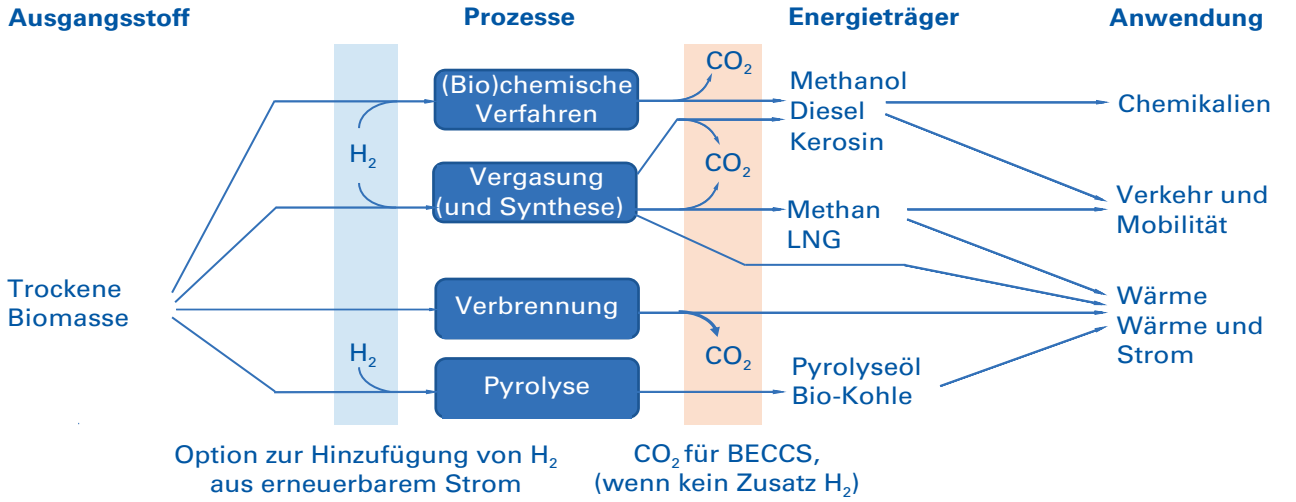

Abbildung 7: Überblick über wichtige Konversionspfade für trockene Biomasse (BECCS: Bioenergie mit Kohlenstoffabscheidung und -speicherung, LNG: Flüssigerdgas). Angepasst aus Schildhauer *et al.* (2021).

reserviert sein. Die Produktion von Energieträgern erhöht die Flexibilität in Bezug auf Ort und Zeit ihrer Nutzung (siehe Abschnitt 3.3 über die Produktion von gasförmigen und Abschnitt 3.4 über die Produktion von flüssigen Treibstoffen). Bei der Treibstoffsynthese handelt es sich um exotherme Prozesse; daher wird ein Teil des ursprünglichen Energiegehalts als Abwärme freigesetzt, die wiederum genutzt werden kann, um höhere Gesamtwirkungsgrade zu erzielen (siehe Abschnitt 3.3.4). Ausserdem ist der Sauerstoffgehalt der verholzten Biomasse höher als der der wichtigen fossilen Energieträger bzw. Treibstoffe (Benzin, Diesel und Kerosin), d.h. der Sauerstoff muss entweder als CO_2 oder H_2O entfernt werden. Dies eröffnet die Möglichkeit der Beimischung von erneuerbarem Wasserstoff (Power-to-X) zu den Syntheseschritten. Hierdurch kann die Menge des aus einer bestimmten Menge Biomasse erzeugten Energieträgers erhöht oder die nachgeschaltete Abtrennung von CO_2 zur Sequestrierung und damit zur Erzielung negativer Kohlenstoffemissionen genutzt werden. Die Herstellung flüssiger Kraftstoffe könnte auch eine weitere Umwandlung in Chemikalien für die stoffliche Nutzung erleichtern (siehe Abschnitt 3.5 über Bioraffinerie).

3.2 Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung

3.2.1 Ausgangssituation

Die Verbrennung von Holz, dem am häufigsten verwendeten trockenen Biomassebrennstoff, wird heute in grossem Umfang eingesetzt, hauptsächlich zur Wärmeversorgung von Gebäuden, zu einem geringen Teil für Hochtemperatur-Prozesswärme und zur Wärme-Kraft-Kopplung. In den letzten Jahrzehnten hat die Entwicklung hin zu hohen Wirkungsgraden und reduzierten Schadstoffemissionen zu einer Vielzahl von Technologien für verschiedene Holzbrennstoffe und Anlagengrössen geführt. Für die Beheizung von Wohngebäuden wird Stückholz in manuell

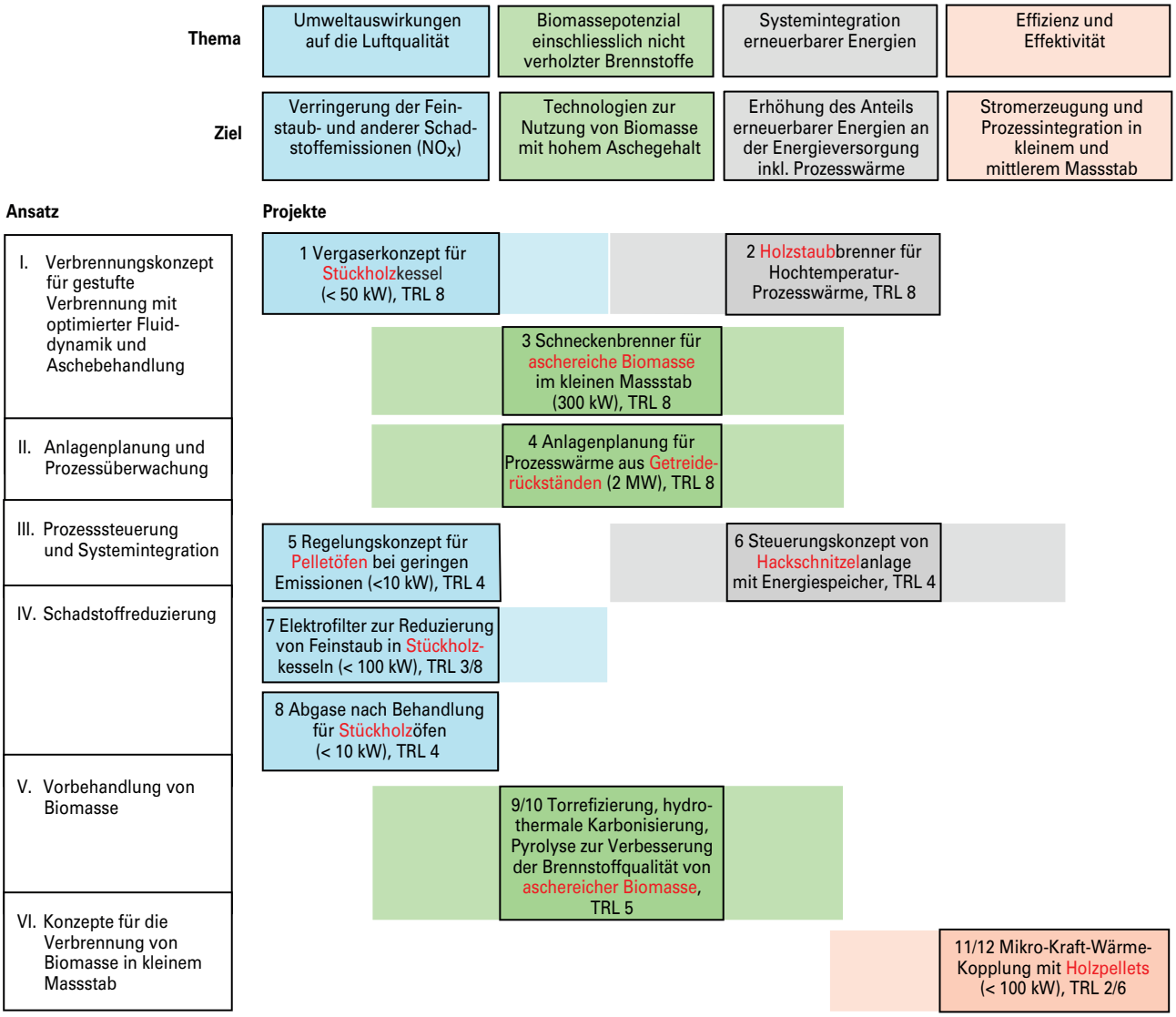

Abbildung 8: Innovationsansätze in SCCER BIOSWEET-Projekten im Bereich der Verbrennung und der Wärme-Kraft-Kopplung. Die farbigen Schatten stellen die sich überschneidenden Themen der Projekte dar. Zur Orientierung im Text sind die Projekte von 1–12 nummeriert. TRL: Technologischer Reifegrad.

betriebenen Holzöfen für die direkte Raumheizung (typischerweise 5–15 kW) und für die Zentralheizung mittels Holzkesseln (typischerweise 15–70 kW) verwendet. Letztere werden mit einem Wärmespeicher kombiniert, um eine ununterbrochene Verbrennung zu ermöglichen und hohe Emissionen aufgrund von Lastreduzierung zu vermeiden. Der Einsatz von Stückholz ist jedoch in den letzten drei Jahrzehnten von etwa 25 PJ/a auf 15 PJ/a zurückgegangen, während die automatisierte Holzverbrennung von weniger als 10 PJ/a auf über 30 PJ/a angestiegen ist. In der Grössenordnung von 200 kW bis 10 MW werden üblicherweise Unterschub- und Vorschubrostkessel mit Holzhackschnitzeln und geschredderten Holzresten für Zentralheizung und Fernwärme eingesetzt. Darüber hinaus wurden Holzpellets als Standardbrennstoff auf den Markt gebracht, was automatisierte Verbrennungssysteme in kleinem Massstab ermöglicht. Andererseits wird die Wirbelschichtfeuerung für industrielle Anwendungen in einer begrenzten Anzahl von Verbrennungsanlagen mit einer Leistung von mehr als 10 MW eingesetzt, die dank einer weiter verbesserten Verbrennung unter Bedingungen mit minimalem Luftüberschuss eine höhere Effizienz ermöglichen. Obwohl kommerzielle Systeme für ein breites Spektrum an Anlagengrössen verfügbar sind, bestehen nach wie vor grosse Herausforderungen für eine wirtschaftliche und umweltfreundliche Nutzung – und zwar nicht nur für Holz, die quantitativ wichtigste Biomasseressource, sondern auch für einige andere, nicht verholzte Biomassearten:

i. **Die Holzverbrennung ist nach wie vor eine Quelle für gesundheitsschädliche Aerosole** (Zotter *et al.* 2019), insbesondere wenn sie aus unsachgemäss betriebenen Kleinanlagen stammen (Nussbaumer 2017, 2020). Allerdings sind die Feinstaubemissionen aus Holzfeuerungen in den letzten 30 Jahren von 7000 t/a auf 2000 t/a zurückgegangen, obwohl die Menge des energetisch genutzten Holzes im gleichen Zeitraum von 3,2 auf 5,6 Mm^3 gestiegen ist.
ii. **Nicht verholzte, aschereiche Biomasseressourcen** (z. B. trockene landwirtschaftliche Rückstände) bleiben aufgrund technischer Probleme bei ihrer energetischen Nutzung immer **noch weitgehend ungenutzt.** Die Probleme sind hauptsächlich auf anorganische Brennstoffbestandteile wie Asche und Stickstoff zurückzuführen.
iii. **Die Integration erneuerbarer Energieträger in das Energiesystem erfordert Anpassungen an zeitliche Disparitäten**, z. B. kann die jahreszeitliche Diskrepanz zwischen Solarertrag und Energiebedarf teilweise durch die Nutzung von verholzter Biomasse als speicherbarem Energieträger ausgeglichen werden, während die Holz-Sonne-Kopplung im Sommer knappe Biomasse einsparen könnte.
iv. **Die Stromerzeugung aus Holz und anderer Biomasse**, z. B. zur Ergänzung des Solarstroms im Winter, **hat einen geringen Wirkungsgrad und hohe Kosten** für Anwendungen in der für die Schweiz interessanten Grössenordnung (d.h. <100 MWel; Bauer *et al.* 2017).

Im Rahmen von SCCER BIOSWEET zielten die Verbrennungsforschung und die technologischen Entwicklungen darauf ab, technische Innovationen zu schaffen, die diese vier Herausforderungen und die damit verbundenen Ziele adressieren; die einzelnen Projekte sind in Abbildung 8 zusammengefasst dargestellt. Das übergeordnete Ziel bestand darin, das Potenzial von Holz und anderer fester Biomasse für die Energieerzeugung im Schweizer Energiesystem so effektiv wie möglich zu nutzen und gleichzeitig die Auswirkungen auf die Umwelt gering zu halten.

3.2.2 Innovationsansätze

Der **erste Innovationsansatz** umfasst das Design des **Verbrennungsprozesses** und die Entwicklung fortschrittlicher Verbrennungstechnologien, insbesondere durch die Einführung von **Vergasungskonzepten** (Projekt 1: Vergaserkessel) und **gestufter Verbrennung** (Projekt 2: Holzstaubbrenner [Abb. 9], Projekt 3: Schneckenbrenner [Abb. 10]). Durch die Entwicklung in Projekt 2 kann Hochtemperatur-Prozesswärme erzeugt werden, um deren Verwertung im Vergleich zu heutigen Anwendungen in Gebäuden zu erhöhen, während in einem anderen Ansatz (Projekt 3) Massnahmen zur verbesserten Entaschung des Verbrennungsteils ergriffen werden, um das Spektrum der einsetzbaren Brennstoffe auf aschereiche Biomasse in kleinen und mittleren Anlagen zu erweitern. Als zusätzlicher Nutzen wurde eine Verbrennungsmodell entwickelt, welches Erkenntnisse der computergestützten Strömungsdynamik (CFD) und laserbasierter aerodynamischer Untersuchungen beinhaltet. Dieses Modell steht nun zur Verfügung, um das Brennerdesign als primäre Massnahme zur Reduzierung von Schadstoffemissionen voranzutreiben (Winkler *et al.* 2018; Barroso *et al.* 2019a).

Im **zweiten Ansatz** wurden **Anlagendesign und Prozessmonitoring** für die Bereitstellung von Prozesswärme in der Lebensmittelverarbeitung unter Verwendung von Weizenkornresten entwickelt (Projekt 4). Die Prozessüberwachung ermöglicht dabei die Vorhersage des Wartungsbedarfs und die Minimierung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen dank minimierter Abschaltungen der Biomasseanlage. Darüber hinaus wird der Betrieb des Systems optimiert, um die Schadstoffemissionen von NO_X und Nebenprodukten zu reduzieren (Nussbaumer *et al.* 2019).

Der **dritte Ansatz** umfasste Entwicklungen und Modellierungen zur fortschrittlichen **Prozesssteuerung und -integration von Biomasseanlagen**. Die untersuchten Anwendungen reichten von der Anwendung im Wohnbereich (Projekt 5: FHNW 2019) bis hin zu Fernwärmenetzen, bei denen die Wärme-Kraft-Kopplung optional zur zusätzlichen Stromerzeugung eingesetzt werden kann (Projekt 6: Schumacher *et al.* 2020).

Im **vierten Ansatz** wurden sekundäre Massnahmen zur **Schadstoffvermeidung für kleinräumige Anwendungen entwickelt**. Der Schwerpunkt lag dabei auf Stückholzfeuerungen, die erhöhte Feinstaubemissionen verursachen können. Für Zentralheizungs-

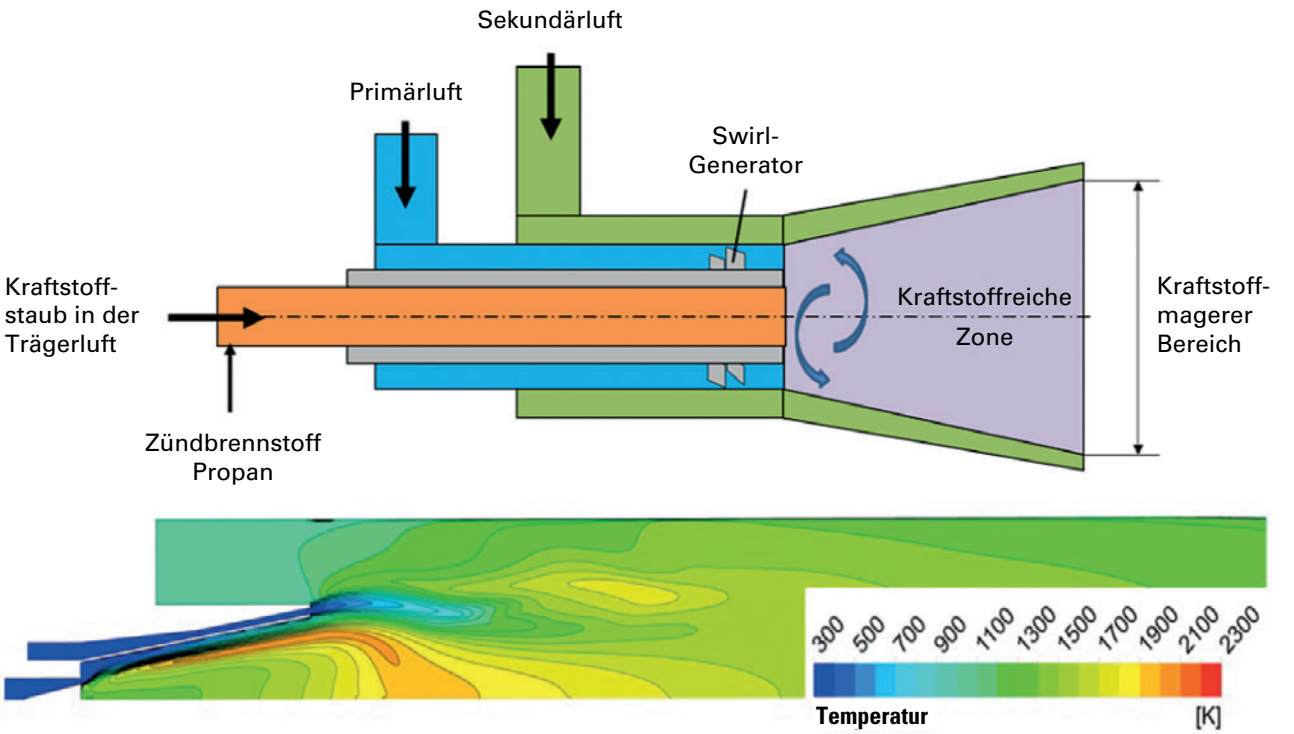

Abbildung 9: Drallstabilisierter Brenner für die gestufte Verbrennung von staubförmigen Brennstoffen wie Holzstaub (Winkler *et al.* 2018). Oben: Konstruktionsprinzip des Brenners. Unten: Temperaturprofile, berechnet aus der Verbrennungsmodellierung mittels Computational Fluid Dynamics (CFD). Dieses Modell basiert auf einem Euler-/Lagrangian-Ansatz und wurde aus einem Modell der Kohlenstaubverbrennung entwickelt. Eine zentrale Rezirkulationszone wurde brennstoffreich gestaltet, um die NO_X -Emissionen zu reduzieren; eine zunehmende Verwirbelung verbesserte die radiale Ausbreitung der Brennstoffpartikel, was die CO-Emissionen reduzierte.

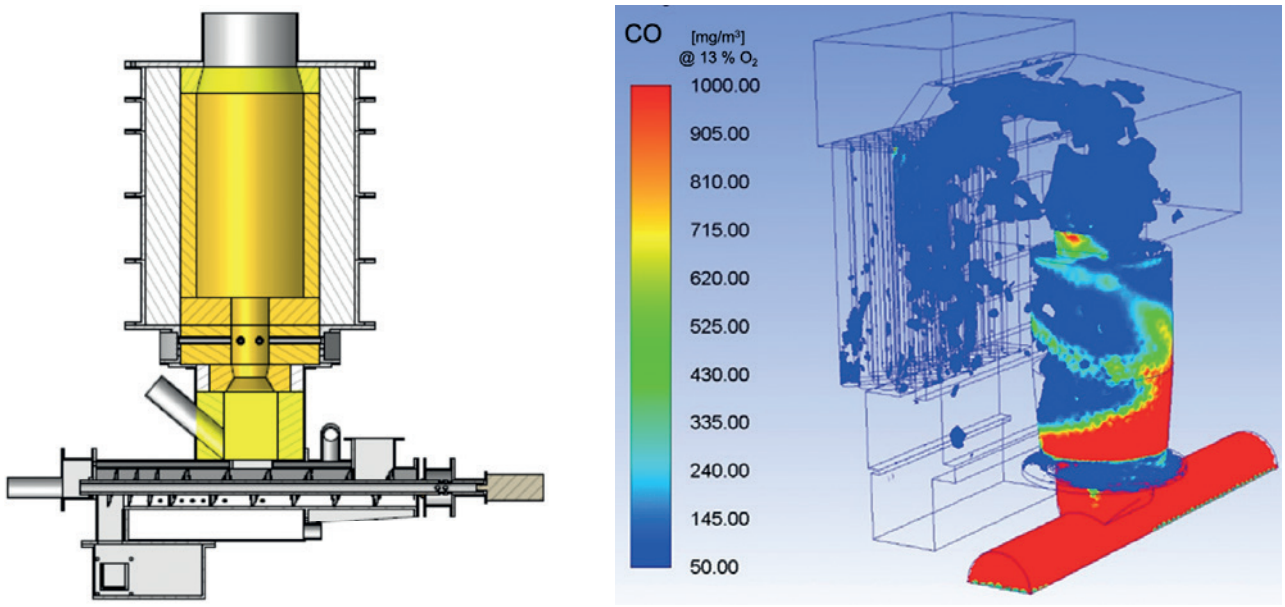

Abbildung 10: Schneckenbrenner für aschereiche Biomassebrennstoffe in Anwendungen von 100–300 kW (Barroso *et al.* 2019b). Links: Das Prinzip des Schneckenbrenners ermöglicht eine kontinuierliche Entfernung der Asche aus der Verbrennungszone, um das Schmelzen und die Ablagerung von Asche zu vermeiden, was die Verwendung von aschereichen Brennstoffen in konventionellen Kleinkesseln unmöglich macht. Rechts: CO-Konzentration als Beispiel für die Ergebnisse der numerischen Fluiddynamikmodellierung (Barroso *et al.* 2019c). Die Modellierung der Strömungsdynamik und Experimente werden zur Optimierung der Lufteinblasung und der Verbrennungsgeometrie eingesetzt, um eine Verbrennung mit minimalem Luftüberschuss und folglich höherem Wirkungsgrad zu ermöglichen und die Schadstoffemissionen, insbesondere unverbrannte kohlenstoffhaltige Verbindungen und Stickoxide (NO_X), zu verringern.

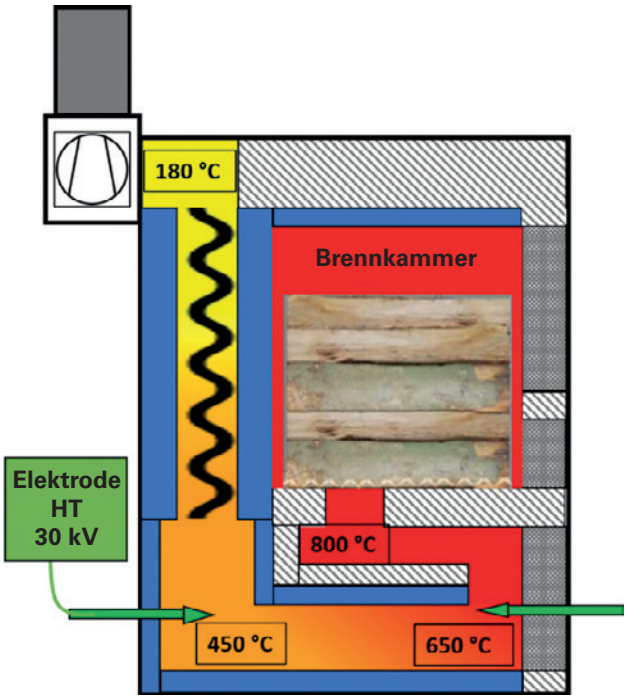

Abbildung 11: Stückholzkessel mit integriertem Elektrofilter zur Partikelabscheidung. Die Hochspannungselektrode (HV) zur elektrischen Aufladung der Partikel befindet sich im Kessel, entweder bei 450 °C oder bei 650 °C (grüner Pfeil rechts). Diese Integration verbessert die Gesamtleistung der Partikelabscheidung und senkt die Kosten.

anwendungen wurde ein Elektrofilter (Projekt 7) in einen Stückholzkessel integriert, der im Vergleich zu einem nachgeschalteten Abscheider im Abgassystem die Dauer der eingeschränkten Abscheideleistung beim Anfahren verkürzt und einen Betrieb mit begrenzter Rauchgastemperatur ermöglicht (Abb. 11; Wüest *et al.* 2019). Eine weitere Möglichkeit zur Partikelabscheidung aus Holzöfen sind Durchflussfilter, ähnlich denen, die zur Minderung von Dieselmotoremissionen eingesetzt werden. Im Rahmen von Projekt 8 (Ropp *et al.* 2019) wurden verschiedene Filter für den Einsatz in Stückholzöfen, entweder für Neuinstallationen oder für Nachrüstungen, bewertet. Obwohl solche Filter das Potenzial haben, eine hohe Partikelabscheideleistung zu erzielen, sind robuste Konstruktionen erforderlich, um mit der Regeneration und Verstopfung der Filter umzugehen.

Im **fünften Ansatz** wurden die **Vorbehandlungen** Torrefizierung, hydrothermale Karbonisierung und Pyrolyse als Optionen **zur Verbesserung der Brennstoffqualität von Biomasserückständen** mit unerwünschten Eigenschaften für Verbrennungsanwendungen, wie geringe Schüttdichte, hoher Aschegehalt und begrenzte Haltbarkeit, untersucht (Projekt 9, Michel 2017; Projekt 10, Mehli *et al.* 2021). Durch die Anwendung solcher thermischen Behandlungen bei moderater Temperatur und reduzierter Sauerstoffverfügbarkeit kann Biomasse mit geringer Schüttdichte in ein festes Produkt (z. B. Biokohle) umgewandelt werden. Ein festes Produkt hat einen erhöhten Kohlenstoffgehalt und vorteilhafte Eigenschaften als Brennstoff (z. B. durch Mahlen und Pelletieren), kann aber auch in der Landwirtschaft zur Bodenverbesserung und CO_2-Sequestrierung eingesetzt werden. Dabei sind jedoch die gesetzlichen Vorschriften zu beachten (BLW 2020).

Im **sechsten Ansatz** wurden thermische Auslegungskonzepte für die **Stromproduktion in Kleinanwendungen** entwickelt (Projekte 11 und 12). In diesem Zusammenhang wurde eine Heissluftturbine implementiert, welche die Wärme aus der Holzverbrennung in Strom umwandelt und so eine kombinierte Wärme- und Stromproduktion in Anlagen kleiner als 100 kW ermöglicht (Schmid *et al.* 2014).

3.2.3 Beitrag zur Schweizer Energiestrategie 2050

Holz ist ein flexibler erneuerbarer Energieträger, der aufgrund seiner Speicherfähigkeit, seiner vielfältigen energetischen Nutzungsmöglichkeiten und als biogene Kohlenstoffquelle eine wichtige Rolle in der Schweizer Energiewende spielen wird. Die Verbrennungsforschung trägt dazu bei, die Herausforderungen bei der vollständigen Nutzung des Biomassepotenzials für energetische Zwecke zu bewältigen und die energetische Verwertung von Biomasse zu erhöhen. Insbesondere **kann das Nutzungspotenzial erhöht werden** durch die Erweiterung der Brennstoffpalette auf aschereiche und nicht verholzte Biomasse. Dies dank spezifischer Entwicklungen zur Verringerung aschebedingter Effekte bei der Verbrennung. Darüber hinaus k**önnen die Umweltauswirkungen der Biomasseverbrennung erheblich reduziert werden** durch primäre Massnahmen wie ein fortschrittliches Verbrennungsdesign, eine gestufte Verbrennung und eine Verbrennungskontrolle. Darüber hinaus ermöglichen sekundäre Massnahmen wie die Partikelabscheidung eine Schadstoffreduzierung bei kleinen Anwendungen. Schliesslich **kann der Beitrag der Biomasse zur Energieversorgung qualitativ verbessert werden**, und zwar durch eine fortschrittliche Systemintegration, die das zeitliche Ungleichgewicht zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energien und der Energienachfrage in grossem Massstab verringert, sowie durch die Möglichkeit der Stromerzeugung aus Biomasse in kleinem Massstab.

3.2.4 Künftige Arbeiten

Obwohl beim Verbrennungsdesign Fortschritte erzielt wurden, besteht **bei Biomassefeuerungsanlagen noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial.** Dies sowohl **hinsichtlich des Wirkungsgrads** (einschliesslich der Wärmerückgewinnung aus der Kondensation) als auch **hinsichtlich der Schadstoffemissionen**, insbesondere in Bezug auf Feinstaub (PM) und Stickoxide (NO_x). Letztere werden bei einem breiteren Einsatz von Biomassebrennstoffen mit hohem Aschegehalt an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus **müssen sekundäre Massnahmen weiterentwickelt werden, um die Anlagenzuverlässigkeit zu verbessern, die Kosten zu senken und nachteilige Neben-**

produkte zu minimieren (z. B. aus der NO_X-Vermeidung). Für kleine und mittlere Anwendungen sollten Rauchgasreinigungsanlagen in das Verbrennungs- und Wärmeübertragungssystem integriert werden, um die Kosten zu senken und die Bedingungen für ihren Betrieb und ihre Wartung zu verbessern.

Die Prozessintegration muss weiter verbessert werden, um optimale Bedingungen bei wechselnden Lasten zu gewährleisten. Sie umfasst die Regelungskonzepte, den intelligenten Einsatz von Sensoren und die thermische Energiespeicherung für Heizungsanlagen und für Anwendungen der Wärme-Kraft-Kopplung. Für ein nachhaltiges Energiesystem ist die bedarfsgerechte Energieversorgung, also die Unabhängigkeit von saisonalen oder täglichen Schwankungen, eine wichtige Voraussetzung. Heute wird die bedarfsgerechte Energieversorgung durch fossile Brennstoffe sichergestellt, die jedoch potenziell durch Biomasse ersetzt werden könnten, wenn geeignete Massnahmen entwickelt werden und verfügbar sind. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, Energienetze zu realisieren, die verschiedene Energieträger bündeln können. In solchen Netzen **könnte die Biomasse als Backup-System die fluktuierende Solar- und Windenergie ergänzen.** Aufgrund der Notwendigkeit von schnellen Lastwechseln ergeben sich daraus erhöhte Anforderungen an Biomasse-Konversionsanlagen und deren Regelungskonzepte. Zu diesem Zweck **könnten Biomasse-Wärme-Kraft-Kopplungssysteme mit schnellen thermischen Energiespeichern (TES) kombiniert werden,** was zusammen mit weiteren Verbesserungen der Systemintegration und der Regelungskonzepte einen neuen Forschungszweig darstellen würde.

Um die Effektivität von Biomasse im Energiesystem zu erhöhen, sollte ein starker Fokus sowohl auf Technologien gelegt werden, welche die (Hochtemperatur-)Prozesswärme anstelle von Niedertemperaturwärme für Gebäude bereitstellen, als auch auf Systeme, die Strom in Kombination mit Wärme als Nebenprodukt zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien liefern. **Daher sollten neben Technologien zur Prozesswärmeerzeugung auch Verfahren zur Stromerzeugung mit höheren elektrischen Wirkungsgraden angestrebt und entwickelt werden.**

Mit der zunehmenden Nutzung von verholzter Biomasse als Energieträger gewinnt die sachgerechte Entsorgung der Asche immer mehr an Bedeutung. Daher werden in Zukunft spezifische Entsorgungswege für Aschen aus Biomasse benötigt, um die Verwertung der anorganischen Biomassebestandteile zu erhöhen und hohe Entsorgungskosten zu vermeiden.

3.3 Erzeugung von gasförmigen Treibstoffen

Holz kann insbesondere durch Verbrennung zur Gewinnung von Wärme oder Strom, unmittelbar zur Deckung des Energiebedarfs genutzt werden, aber auch mittelbar durch die Umwandlung von Holz(reststoffen) in Treibstoffe, was aus mehreren Gründen vorteilhaft ist. Für gasförmige Treibstoffe gibt es eine Infrastruktur, die deren Transport und Lagerung ermöglicht, und es können hocheffiziente Nutzungstechnologien eingesetzt werden. Für die Erzeugung gasförmiger Treibstoffe aus biogenen Rohstoffen gibt es mehrere Wege. In anaeroben Fermentern können feuchte Biomassen, wie landwirtschaftliche Rückstände, Grünabfälle und Klärschlamm, in Rohbiogas umgewandelt werden. Dieses stellt ein Gemisch aus 50–65 % Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) dar. **Aufgrund des hohen Ligningehalts von Holz kann verholzte Biomasse in anaeroben Fermentern nicht in Biogas umgewandelt werden. Stattdessen werden thermochemische Verfahren wie die Vergasung eingesetzt, um Holz in einen gasförmigen Treibstoff umzuwandeln.** Im Prinzip können alle Holzqualitäten vergast werden, d. h. Pellets, Produktionsrückstände aus der Holzbe- und verarbeitung und Waldhackschnitzel. Allerdings setzen die Vorschriften für die Abfallbehandlung Grenzen, z. B. für die Verwendung von lackiertem oder imprägniertem Holz.

3.3.1 Erzeugung von Wasserstoff aus Holz

Im Rohgas von **Hochtemperaturvergasern**, z. B. von Flugstromvergasern mit Sauerstoff bei 1200 °C, kommen nur Spuren von anderen Verbindungen als CO und Wasserstoff vor. Dies ist ein Vorteil, wenn Wasserstoff das Zielmolekül ist; er kann so effizient verteilt und gespeichert werden. In diesem Fall führt eine einfache Gasreinigung (hauptsächlich H_2S-Adsorption), gefolgt von einer Wasser-Gas-Shift-Reaktion, der CO_2-Abtrennung und Trocknung zur Produktion von reinem Wasserstoff (Tock *et al.* 2012; Antonini *et al.* 2021), wie Studien unter Beteiligung von SCCER BIOSWEET-Forschern zeigen. **Aufgrund der relativ hohen spezifischen Kosten sind grosse Hochtemperaturanlagen erforderlich (>250 MW, d. h. etwa 60 t/h luftgetrocknete Holzhackschnitzel),** um von Skaleneffekten zu profitieren. Bei der Biomasse werden grosse Anlagen durch erhöhte Logistikkosten benachteiligt, die durch den Transport grösserer Holzmengen entstehen. Dies und das bisherige Fehlen einer Infrastruktur (zum Beispiel eines Leitungsnetzes) zur Verteilung der grossen Mengen erzeugten Wasserstoffs haben die kommerziellen Versuche, Wasserstoff aus Holz zu erzeugen, behindert. **Da die Umwandlung von Holz in Wasserstoff jedoch von Natur aus mit der Erzeugung von biogenem CO_2 verbunden ist, trägt sie zum Ziel bei, Netto-Null-Emissionen zu erreichen;** bei entsprechender Vergütung könnte dies die wirtschaftliche Durchführbarkeit dieser Option in Zukunft ermöglichen.

3.3.2 Herstellung von Methan aus Holz

Anders als bei der Umwandlung in Wasserstoff stellt sich die Situation bei der Erzeugung von erneuerbarem CH_4 aus Holz dar (Gassner *et al.* 2012; Schildhauer 2018). **Die Niedertemperatur-Doppelwirbelschichtver-**

gasung (~850°C) ist in kleinen und mittleren Massstäben wirtschaftlich günstig und erzeugt ein Gas mit einem CH_4-Gehalt von bis zu 10 Vol. %, was für die Gesamteffizienz der Prozesskette zu erneuerbarem CH_4 von Vorteil ist (Heyne *et al.* 2016). Das am besten geeignete Beispiel für einen Niedertemperaturvergaser zur Erzeugung von erneuerbarem Gas ist der allotherme Doppelwirbelschichtvergaser, im Folgenden DFB-Vergaser genannt (Bajohr *et al.* 2014; Heyne *et al.* 2016). Durch den Einsatz von Wasserdampf als Vergasungsmittel liefert ein DFB-Vergaser ein wasserstoffreiches Produktgas. Die Wärme für die endotherme Vergasung wird in einem separaten Verbrennungsreaktor (bei etwa 900°C) erzeugt, dem das Bettmaterial und die unverbrannte Kohle zugeführt werden. Das erhitzte Bettmaterial (Olivin) wird in die Vergasungskammer (820–850°C) zurückgeführt. In diesem Vergasertyp werden parallel zur CH_4-Produktion höhere Kohlenwasserstoffe wie Ethan, Ethylen, Acetylen und Aromaten (insbesondere Benzol) gebildet (Heyne *et al.* 2016), begleitet von weiteren Spurenkomponenten wie Teeren und organischen Schwefelarten. Bevor das rohe Erzeugergas in einem Methanisierungsreaktor in ein biogasähnliches Gasgemisch umgewandelt werden kann, das hauptsächlich aus CH_4, CO_2 und einigen Prozent Wasserstoff besteht, ist eine entsprechende Gasreinigung und -konditionierung erforderlich, wie SCCER BIOSWEET-Forscher gezeigt haben. Eine abschliessende Gasaufbereitung durch Aminwäscher, Trocknung und Membranen ist erforderlich, um den nicht umgewandelten Wasserstoff zu recyceln und einspeisefähiges Biomethan zu erhalten. Die weitere Reinigung der CO_2-Abgase kann biogenen Kohlenstoff liefern, der sequestriert werden kann, um negative Emissionen zu erzeugen (Gassner *et al.* 2009). Bei Power-to-Gas-Anwendungen könnte erneuerbarer Wasserstoff hinzugefügt werden, um die CO_2-Fraktion in zusätzliches CH_4 umzuwandeln, indem ein Elektrolyseur in den Prozess integriert wird. In diesem Fall würde der Wasserstoff zusammen mit dem gereinigten Produktgas in einen etwas grösseren Methanisierungsreaktor eingespeist (Gassner *et al.* 2008; Bajohr *et al.* 2014; Teske 2014; Leimert *et al.* 2018). Arbeiten im Rahmen von SCCER BIOSWEET ergaben für Holzanwendungen, dass die Methanproduktion mit einem Grenzwirkungsgrad von fast 80 % bezogen auf die eingespeiste elektrische Energie verdoppelt werden kann. Darüber hinaus könnten Power-to-Gas-Anlagen, wenn sie in Zeiten niedriger Preise für Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden, auch mit einer CO_2-Abtrennung und -Sequestrierung ergänzt werden, wenn kein erneuerbarer Wasserstoff verfügbar ist (Moioli und Schildhauer 2022, 2021).

3.3.3 Reaktor- und Verfahrenskonzepte zur Methanerzeugung aus Holz

Verfahren zur Herstellung von CH_4 aus Holz wurden von mehreren Konsortien bis zum Pilot- und industriellen Demonstrationsmassstab entwickelt. All den verschiedenen Methanisierungsverfahren ist gemein, dass sie die Herausforderung der stark exothermen und gleichgewichtslimitierten Methanisierungsreaktion lösen müssen: die erzeugte Wärme muss abgeführt und innerhalb der Prozesskette effizient genutzt werden, um die Grenzen der Thermodynamik zu überwinden. Die beiden wichtigsten bisher entwickelten und getesteten Reaktorkonzepte für die Methanisierung von Holzgas sind: (i) adiabatische Festbettreaktoren in Serie mit intermittierender Kühlung als auch Kreislaufkühlung; und (ii) Wirbelschichtreaktoren, die im Rahmen von SCCER BIOSWEET intensiv untersucht wurden.

Das Konzept des **adiabatischen Festbettreaktors** ist Stand der Technik bei der Umwandlung von Kohle in synthetisches Erdgas (SNG) und wurde vom Göteborger Biogasprojekt in Schweden (GoBiGas, TRL 8-Demoanlage) (Held 2016; Schildhauer 2018) und dem Energieforschungszentrum in den Niederlanden (TNO-ECN, TRL 5-Pilotanlage) (Rabou und Bos 2012; Rabou *et al.* 2016) gewählt. Adiabatische Festbettreaktoren bestehen aus grossen Behältern, die mit Katalysatorpartikeln gefüllt sind. Die exotherme Reaktion lässt die Temperatur ansteigen, was wiederum die Reaktionsraten weiter erhöht, bis der Reaktor ein thermodynamisches Gleichgewicht erreicht. Bei diesem Reaktorkonzept wird die Bildung von Hotspots aufgrund des thermischen Verlusts in Kauf genommen und ihr Ausmass durch Rückführung von gekühltem Reaktorabgas und/oder Zugabe von Dampf begrenzt, bis ein für den spezifischen Katalysator akzeptables Niveau erreicht ist (Schildhauer und Biollaz 2015; Schildhauer 2016). Der erste Reaktor erreicht dabei nicht den vollen Umsatz. Daher muss das Abgas gekühlt und in eine Reihe weiterer adiabatischer Reaktoren geleitet werden, um den vollen Umsatz zu erreichen (Schildhauer 2016). Aufgrund des Hotspots im ersten Reaktor müssen aromatische Verbindungen wie Benzol und andere ungesättigte Spezies (Ethylen und Acetylen) entfernt oder stromaufwärts umgewandelt werden, um eine irreversible Katalysatordeaktivierung durch Kohlenstoffablagerung in den heissen Zonen des Reaktors zu vermeiden.

Um diese Beschränkungen zu überwinden und den Methanisierungsprozess zu vereinfachen, insbesondere um die Anzahl der Reaktoren zu minimieren, **wurden im Rahmen von SCCER BIOSWEET intern gekühlte Methanisierungsreaktoren weiterentwickelt.** Durch die Bewegung der Katalysatorteilchen in einem **Gas-Feststoff-Wirbelbett** wird die in exothermen Reaktionen erzeugte Wärme über einen grossen Teil des Reaktors verteilt, was die nutzbare Wärmeübertragungsfläche stark vergrössert. Ausserdem erhöht die Bewegung der Katalysatorteilchen durch Turbulenzeffekte den Wärmeübergang auf die Kühloberflächen. Dies ermöglicht einen nahezu isothermen Betrieb und hilft, die Deaktivierung des Katalysators durch Koksbildung zu vermeiden. Infolgedessen ist ein beträchtlicher Anteil ungesättigter Kohlenwasserstoffe im Vergasergas akzeptabel, was den Gasreinigungsprozess vereinfacht.

Während die Wirbelschichtmethanisierung für das Kohle-zu-SNG-Verfahren bereits in den spä-

Abbildung 12: SCCER BIOSWEET-Pilotanlage (TRL 6) zur Untersuchung der Auswirkungen von Druck (bis zu 10 bar), Gasgeschwindigkeit und Partikelgrösse auf die verfügbare Stoffaustauschfläche im Wirbelschicht-Methanisierungsreaktor (Foto: PSI). Diese Erkenntnisse können zur Verbesserung der Modelle für die Reaktoroptimierung und Prozesssimulationen verwendet werden. Die Reaktorsimulationen werden durch Experimente in dieser Anlage validiert.

ten 1970er Jahren bis zum Demonstrationsmassstab (20 MW) entwickelt wurde (Comflux-Verfahren; Schildhauer 2016), wird ihr Einsatz für die **Umwandlung von Holzgas zu Methan** seit etwa 20 Jahren vom Paul Scherrer Institut (PSI) untersucht und weiter verfolgt. Im Rahmen des EU-Projekts BIOSNG wurden Laborexperimente und Langzeittests bei TRL 5 durchgeführt, um eine 1-MW-Pilot- und Demonstrationsanlage (PDU, d. h. TRL 7) in Güssing (Österreich) zu entwickeln. Die PDU demonstrierte die komplette Prozesskette von Holz zu SNG, einschliesslich DFB-Vergasung, Gasreinigung, Wirbelschichtmethanisierung und Gasreinigung, im halbkommerziellen Massstab. In der Zwischenzeit haben andere Forschungsgruppen die Wirbelschichtmethanisierung untersucht, z. B. im Rahmen des französischen GAYA-Projekts (GAYA 2021). Im Rahmen von SCCER BIOSWEET wurde die Anwendung dieses Reaktortyps in Power-to-Gas-Anwendungen in Modellierungs-/Simulationsstudien und in Experimenten bis TRL 5 untersucht. Für sichere Anwendungen in grösserem Massstab ist es erforderlich, die Wissensbasis zu erweitern und den Einfluss von Gasgeschwindigkeiten, Katalysatorpartikelgrösse und Druck zu verstehen. Daher wurden die Fluiddynamik im Reaktor, insbesondere der Wärmeübergang, der Mischprozess und die verfügbaren Stoffübergangsflächen in einer TRL 6-Pilotanlage untersucht (Abb. 12).

Das GoBiGas-Projekt (Schweden) und die Entwicklungen bei TNO-ECN (Niederlande) zielten auf kommerzielle Anlagen in der Grössenordnung von 100 MW oder mehr ab, die eine gross angelegte Holzlogistik auf der Grundlage von Schiffstransporten erfordern, die teilweise auch Importe beinhalten. Es kann also eine relativ komplexe Technologie angewandt werden, wenn die spezifischen Kosten aufgrund von Skaleneffekten sinken. Biomethananlagen fernab von Küsten und Häfen, z. B. in der Schweiz und anderen kontinentalen Teilen Europas, können nicht auf eine grossräumige Holzlogistik zurückgreifen. In diesen Gebieten sind Grössenordnungen von 1–30 MW thermischer Leistung (etwa 0,25–8 t/h luftgetrocknetes Holz) realistischer und wurden daher im Rahmen von SCCER BIOSWEET angestrebt. Bei solchen Grössenordnungen könnten die spezifischen Kapitalkosten von Festbett-Methanisierungsprozessen, einschliesslich ihrer komplexen Gasreinigungsschritte, unerschwinglich sein. Eine Vorstudie (CTU 2014) hat gezeigt, **dass mit der robusteren Wirbelschichtmethanisierung erhebliche Prozessvereinfachungen und substanzielle Senkungen der Kapitalkosten möglich sind**.

Unter den derzeitigen Marktbedingungen ist die Wertschöpfung bei der Erzeugung von erneuerbarem Methan aus Holzabfällen etwas zu gering, als dass eine Bio-SNG-Anlage wirtschaftlich wäre. **Die Option, erneuerbaren Wasserstoff zu nutzen, um biogenes CO_2 aus dem Prozess flexibel in zusätzliches Biomethan umzuwandeln (vor allem im Sommer, wenn die Stromproduktion aus Photovoltaik hoch ist), oder ein Anreiz zur Sequestrierung des CO_2 für negative Emissionen (z. B. im Winter, wenn erneuerbarer Strom teuer ist), wird weitere Erlösmöglichkeiten eröffnen.** Darüber hinaus könnten die steigende Nachfrage nach erneuerbaren Brennstoffen (Ziel «Netto-Null» bis 2050) und die begrenzten Möglichkeiten für deren Import die Attraktivität der Verwendung von Holz als flexible Energiequelle und die Nutzung des biogenen CO_2 in biomassebasierten Prozessen als Ausgangsmaterial für Brennstoffe und Chemikalien erheblich steigern.

3.3.4 Kombinierte Wärme- und Treibstofferzeugung

Die Umwandlung von trockenem Holz in synthetisches Erdgas hat einen Wirkungsgrad von etwa 65 % (berechnet als unterer Heizwert) und die restlichen 35 % sind theoretisch als Wärme verfügbar. Bei einer geeigneten Prozessgestaltung sind 40 % dieser Wärme bei einer Temperatur verfügbar, die hoch genug

ist, um einen Industriekessel zu ersetzen, was eine kombinierte Wärme- und Treibstofferzeugung ermöglicht. Dieses Konzept kann auch die Power-to-Gas-Produktion durch Elektrolyse und alternativ die CO_2-Abscheidung und -Sequestrierung beinhalten. SCCER BIOSWEET hat gezeigt, dass die kombinierte Wärme- und Treibstofferzeugung auf diese Weise zu einer **Negative-Emissionen-Technologie** wird, die zum Management erneuerbarer Energien und zur Dekarbonisierung der Industrie beiträgt (Celebi *et al.* 2019). Im SCCER BIOSWEET-Programm wurde deutlich, dass **die Verwendung von Holz für eine kombinierte Wärme- und Treibtofferzeugung im Vergleich zur direkten Holzverbrennung besonders vorteilhaft** ist. Betrachtet man einen industriellen Ölkessel als Referenz, so substituiert die Verwendung von Holz in einem Industriekessel 0,3 kg fossiles CO_2/kg biogenes CO_2, während die kombinierte Wärme- und Treibstofferzeugung mit Power-to-Gas-Integration einen 2,5 bis 3 mal grösseren Substitutionseffekt für die gleiche Menge Holz hat (Celebi *et al.* 2019).

3.4 Herstellung von flüssigen Treibstoffen

3.4.1 Bedeutung von Flüssigtreibstoffen

Die wachsende Sorge über die Gewinnung und Nutzung fossiler Ressourcen hat die Gesellschaft veranlasst, nach erneuerbaren Alternativen zu flüssigen Treibstoffen zu suchen. Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen wird zunehmend als Ersatz für den Einsatz von fossilen Treibstoffen ins Auge gefasst. Eine Reihe von Energieanwendungen, insbesondere in den Bereichen Mobilität und Verkehr, müssen jedoch von den Hauptenergienetzen (Strom oder Gas) abgekoppelt werden und benötigen daher eine effiziente Energiespeicherung mit hoher Energiedichte, die bisher nur durch flüssige Treibstoffe erreicht werden kann. Dies gilt auch für den Antrieb von Flugzeugen und bestimmten Langstreckenschiffen, wo Batterien noch nicht die erforderliche Energiedichte erreicht haben und daher mittel- bis langfristig wahrscheinlich flüssige Treibstoffe vermutlich auf Kohlenstoffbasis, erforderlich sein werden. Da lignozellulosehaltige Biomasse die grösste biogene Kohlenstoffquelle der Erde ist, stellt sie ein attraktives Ausgangsmaterial für Treibstoffe im Verkehrssektor dar.

Obwohl lignozellulosehaltige Biomasse für die Verwendung als Flüssigtreibstoff vielversprechend ist, bestehen weiterhin grosse Herausforderungen bei der Integration von Biotreibstoffen in den Verkehrssektor, insbesondere in die Luftfahrt. Für eine schnelle und nahtlose Integration in die derzeitige Versorgungskette sind Drop-in-Biotreibstoffe am besten geeignet (van Dyk *et al.* 2019), da es sich dabei um «flüssige Biokohlenwasserstoffe handelt, die funktional gleichwertig mit Erdöltreibstoffen und vollständig kompatibel mit der bestehenden Erdölraffinerie- und Vertriebsinfrastruktur sind» (IEA Bioenergy Task 39, 2019). Die vorherrschenden Ausgangsstoffe für solche Drop-in-Biotreibstoffe sind heute Lipide, wie Pflanzenöle oder Altöle aus der Küche; ihre Produktion hat mittlerweile den kommerziellen Massstab erreicht. Die Kosten, die begrenzte Verfügbarkeit und die oft nicht nachhaltige Produktion dieser Rohstoffe stellen jedoch eine grosse Herausforderung dar, die wahrscheinlich keine grosse Ausweitung der Technologie ermöglichen wird. Daher werden derzeit verschiedene Verfahren auf der Grundlage von Lignozellulose entwickelt. Diese können unterteilt werden in: (i) ungezielte Ansätze, die sich weitgehend auf zahlreiche parallele und sequenzielle chemische Reaktionen stützen, wozu mehrere thermochemische Ansätze gehören, und (ii) gezielte Ansätze, die auf spezifischen Reaktionspfaden für jeden Bestandteil der Biomasse beruhen, welche biochemische und hybride Ansätze einschliessen.

3.4.2 Thermochemische Umwandlung von Biomasse in Flüssigkeit

Die beiden vorherrschenden thermochemischen Verfahren zur Herstellung flüssiger Treibstoffe aus Biomasse sind die Vergasung und die Verflüssigung. Bei beiden handelt es sich um nicht zielgerichtete Verfahren, bei denen die Biomasse durch zahlreiche Reaktionen schnell umgewandelt wird, ausgehend von den Hauptbestandteilen der lignozellulosehaltigen Biomasse: Zellulose, Hemizellulose und Lignin. **Bei der Vergasung** wird die Biomasse in Synthesegas umgewandelt (siehe Abschnitt 3.3), das ein relativ einheitliches Produkt ist, da die zahlreichen Reaktionen fast immer zu den thermodynamisch bevorzugten gasförmigen Produkten führen. Diesem anfänglichen Prozess folgt eine gründliche Reinigung des Synthesegases, an die sich eine katalytische Umwandlung in flüssige Kohlenwasserstoffe anschliessen kann, entweder durch das Fischer-Tropsch-Verfahren (das dann in der Regel eine zusätzliche Hydro-Behandlung erfordert, um Kohlenwasserstoffe im Treibstoffbereich herzustellen; Peduzzi *et al.* 2018) oder durch die katalytische Synthese von Methanol oder Dimethylether (Peduzzi *et al.* 2013). Die Reinigung des Synthesegases wird durchgeführt, um eine Vergiftung der Fischer-Tropsch-Katalysatoren zu vermeiden, was im Vergleich zu ähnlichen thermochemischen Umwandlungsprozessen fossiler Ausgangsstoffe wesentlich anspruchsvoller und damit teurer ist. **Zu den Verflüssigungsverfahren** gehören die Schnellpyrolyse, die katalytische Pyrolyse und die hydrothermale Verflüssigung, die alle einen zweiten Veredelungsschritt des gewonnenen Bioöls erfordern, um das resultierende Gemisch aus oft teilweise sauerstoffhaltigen Molekülen zum Biotreibstoffprodukt aufzuwerten. Alle diese Verfahren sind unselektiv und anfällig für Probleme mit der Katalysatorstabilität. Im Rahmen von SCCER BIOSWEET wurde der erste Schritt der Umwandlung fester Biomasse durch hydrothermale Verflüssigung untersucht. Cellulose, Hemicellulose und Lignin werden in heissem, unter Druck stehendem Wasser durch Hydrolyse aufgespalten. Da dieser Schritt langsam ist und die Produktionsrate des

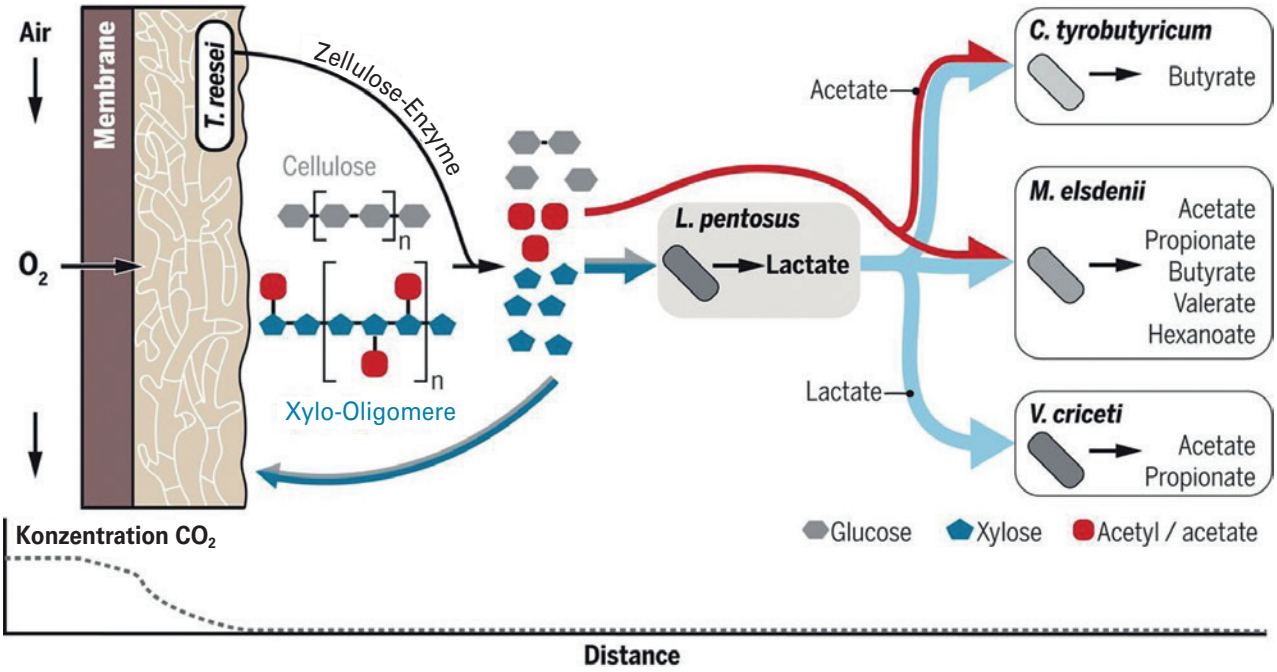

Abbildung 13: Die Laktatplattform ermöglicht die konsolidierte biologische Verarbeitung von lignozellulosehaltigen Polysacchariden und Azetat zu verschiedenen Produkten einschliesslich Carbonsäuren. Angepasst nach Shahab *et al.* (2020).

Bioöls bestimmt, wurde ein neuer Katalysator entwickelt. Er basiert auf sulfoniertem Kohlenstoff und einer Vorbehandlung des Holzes durch Kugelmahlen in Gegenwart des Katalysators (Scholz *et al.* 2018, 2019).

3.4.3 Biochemische Wege zu flüssigen Treibstoffen aus Biomasse

In biochemischen Prozessen unter Umgebungsbedingungen werden Kohlenhydratpolymere aus Biomasse durch Enzyme und Mikroorganismen in die gewünschten Produkte umgewandelt. Während Ethanol (das dem Benzin beigemischt oder als Biotreibstoff in angepassten Motoren verwendet werden kann) von Unternehmen wie Clariant bereits im Demonstrationsmassstab biochemisch hergestellt wurde, ist die direkte Produktion von Jet- oder Diesel-Drop-in-Treibstoffen aus aus Biomasse gewonnenen Zuckern eine weitaus grössere Herausforderung. Ihre mikrobielle Herstellung erfordert hochentwickelte gentechnisch veränderte Mikroorganismen und wird durch sehr niedrige Produktausbeuten und -konzentrationen behindert. Im Rahmen von SCCER BIOSWEET und mit zusätzlicher Finanzierung durch den Schweizerischen Nationalfonds im Rahmen des NFP 70 **wurde ein hybrider Weg entwickelt, der aus der biochemischen Umwandlung der Kohlenhydrate in Carbonsäuren und der katalytischen Umwandlung der Säuren in Kohlenwasserstoffe besteht.**

In der ersten Stufe dieses Prozesses wurde dampfbehandeltes Buchenholz durch ein anpassungsfähiges, künstliches mikrobielles Konsortium in verschiedene Carbonsäuren als Endprodukte umgewandelt, ein Prozess, der als «Laktatplattform» bezeichnet wird. Dank dieser Plattform ist es nun möglich, die verschiedenen in der Biomasse enthaltenen Zucker zunächst in Milchsäure als gemeinsames Zwischenprodukt und dann durch Auswahl einer entsprechenden milchsäureverbrauchenden Stammkultur in die Zielsäure zu überführen (Abb. 13; Shahab *et al.* 2020).

In der zweiten Stufe werden die holzbasierten Carbonsäuren durch katalytische Prozesse in Flugzeugtreibstoffe und α-Olefine umgewandelt, die zu den wichtigsten Grundstoffen für die chemische Produktion von Kunststoffen und chemischen Zwischenprodukten gehören (Rozmysłowicz *et al.* 2019). Kostenschätzungen auf der Grundlage dieser ersten Experimente im Labormassstab zeigen, dass die mit dieser Technologie hergestellten Flugzeugtreibstoffe doppelt so teuer wären wie die auf dem Markt befindlichen fossilen Treibstoffe. Die höheren Kosten im Vergleich zu fossilen Treibstoffen sind auch eine Hürde für andere ausgereiftere Hybridverfahren wie das Ethanolverfahren von LanzaTech oder das «Isobutanol-to-Jet»-Verfahren von Gevo. Diese werden aber dennoch aktiv verfolgt und die Produkte wurden von der ASTM zertifiziert (Geleynse *et al.* 2018). Bei diesen Hybridverfahren werden die Zwischenprodukte Ethanol und Isobutanol in einem biochemischen Prozess aus Lignozellulose hergestellt, während die sekundäre Umwandlung ein katalytischer Prozess ist. Da der biochemische Prozess in wässrigen Lösungen abläuft, ist das Vorhandensein von Wasser im lignozellulosehaltigen Ausgangsmaterial kein Problem. Ausserdem sind die Mikroorganismen in der Regel nur teilweise empfindlich und können sich an Stoffe aus minderwertigen Rohstoffen anpassen. Vor der katalytischen Umwandlung

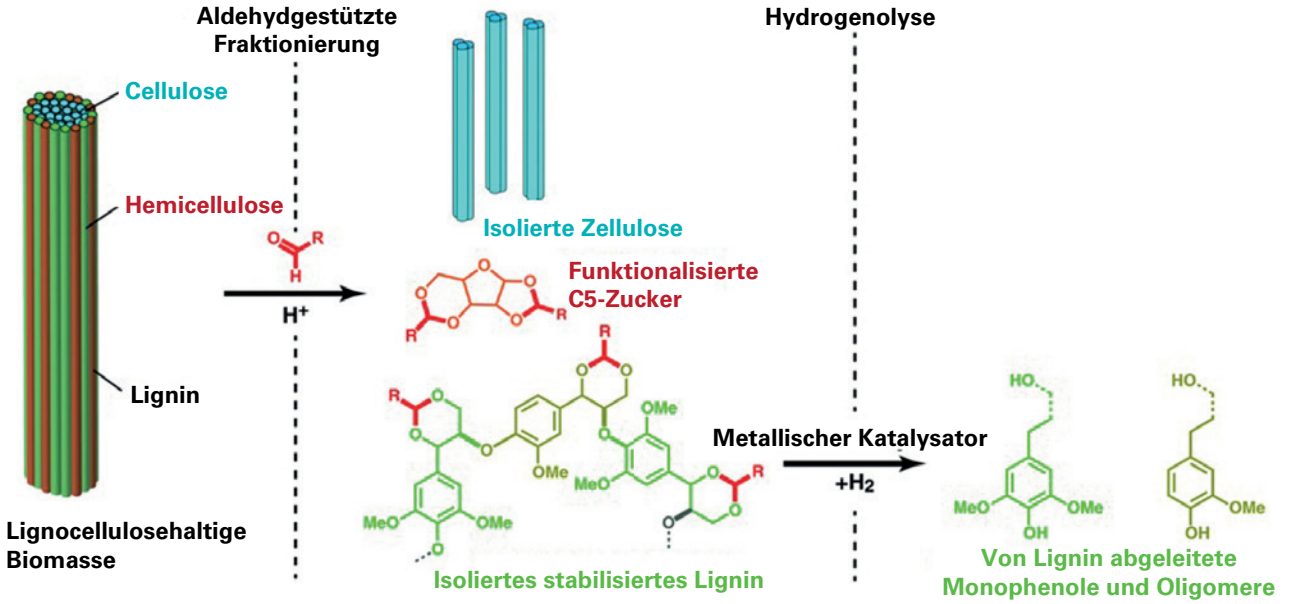

Abbildung 14: Überblick über das aldehydgestützte Fraktionierungsverfahren (AAF), das eine depolymerisierbare Ligninfraktion erzeugt, die zur Herstellung von Monoaromaten aus Lignin mit nahezu theoretischen Ausbeuten auf der Grundlage der Etherspaltung (etwa 40 Gew.-% des Lignins) verwendet werden kann. Angepasst nach Abu-Omar et al. (2021).

können die Zwischenprodukte teilweise durch gängige Verfahren wie die Destillation gereinigt werden, um eine Vergiftung des Katalysators zu vermeiden.

Parallel dazu werden Anstrengungen unternommen, um hybride Ansätze zur Nutzung von Lignin, der dritten grossen Fraktion der Biomasse, für die Herstellung flüssiger Kraftstoffe zu erweitern. Theoretisch ist diese Fraktion für die Herstellung flüssiger Treibstoffe sehr attraktiv, da ihre aromatische Struktur der Struktur von Rohöl sehr viel ähnlicher ist als die Struktur der Kohlenhydratanteile in der Biomasse. Diese Struktur macht Lignin auch zur energiedichtesten der drei wichtigsten Biomassefraktionen. In der Praxis stellt die Nutzung von Lignin jedoch eine enorme Herausforderung dar. Die Struktur und Reaktivität von Lignin sind die Haupthindernisse für seine Nutzung. Dieses Biopolymer neigt dazu, während der anfänglichen Biomassefraktionierung, die der erste Schritt bei den meisten gezielten Biomassetransformationen ist, einschliesslich der oben beschriebenen biochemischen und hybriden Ansätze, schnell zu kondensieren. Dies führt zu einer Ligninfraktion, die sehr schwer abbaubar ist und sich nur schwer in einen flüssigen Treibstoff umwandeln lässt. Im Rahmen von SCCER BIOSWEET wurde die Aldehyd-unterstützte Fraktionierung (AAF) entwickelt, die Ligninbausteine mit Aldehyden stabilisiert und die Kondensation weitgehend verhindert (Abb. 14; Shuai *et al.* 2016; Amiri *et al.* 2019). Dieses Verfahren liefert eine Ligninfraktion, die in monophenolische und oligomere Verbindungen umgewandelt werden kann, die leicht als energiereiches flüssiges aromatisches Gemisch verwendet werden kann, das Flugzeugtreibstofffraktionen ähnelt (Du *et al.* 2018). Dies ergänzt die von anderen entwickelten reduktiven katalytischen Fraktionierungsansätze, die in Bezug auf Lignin ähnliche Ergebnisse wie AAF liefern, bei denen der Katalysator jedoch in direkten Kontakt mit der Biomasse gebracht wird (Questell-Santiago *et al.* 2020). Dies führt zu herausfordernden Trennungsproblemen, die noch gelöst werden müssen. Die durch die AAF gebotene Möglichkeit, Lignin gezielt zu zerlegen, hat zur Gründung eines EPFL-Spin-offs (Bloom Biorenewables Ltd) geführt, das sich um die Kommerzialisierung von aus Lignin gewonnenen Molekülen bemüht, einschliesslich solcher, die für Treibstoffe relevant sind. Dieses Spin-off stützt sich fast vollständig auf die im Rahmen des SCCER BIOSWEET-Programms entwickelten Forschungsarbeiten. Die derzeitigen Bemühungen befinden sich in der Demonstrationsphase.

3.4.4 Ausblick

Insgesamt gibt es mehrere Wege, um aus lignozellulosehaltiger Biomasse mischbare Treibstofffraktionen herzustellen. Insbesondere Hybridlösungen bieten Wege zur gleichzeitigen Verwertung aller wichtigen Fraktionen der lignozellulosehaltigen Biomasse mit hoher Selektivität, wodurch der aus der Biomasse zurückgewonnene Energiegehalt maximiert werden könnte. Hierzu zählen auch die im Rahmen von SCCER BIOSWEET entwickelten Lösungen. Alle diese Technologien sind jedoch noch nicht ausgereift (TRL 5 bis 7) und konkurrieren mit etablierten petrochemischen Prozessen, die auf über 100 Jahre Entwicklung und Optimierung zurückblicken können. **Die fortgesetzte Unterstützung der Politik bei der Schaffung eines günstigen Entwicklungsrahmens sowie finanzielle Anreize sind entscheidend**, um diese Technologien auf den Markt zu bringen und einen

Weg zur Defossilisierung anspruchsvoller Transportsektoren, einschliesslich der Luftfahrtindustrie, zu eröffnen.

3.5 Bioraffinerie: integrierte Ansätze für die Holzumwandlung

Thermochemische Umwandlungsverfahren in flüssige Treibstoffe sind in der Regel bei höheren Temperaturen exotherm, während biochemische Verfahren bei viel niedrigeren Temperaturen endotherm sind. Die thermochemische Herstellung von Flüssigtreibstoff muss daher in kombinierten Wärme- und Treibstoffprozessen bewertet werden. Die Integration von thermochemischen, biochemischen und katalytischen Prozessen ist ein entscheidendes Merkmal von Bioraffinerien, die Holzressourcen in verschiedene biogene chemische Produkte sowie Kraftstoffprodukte umwandeln (Brethauer *et al.* 2021). **Das optimale Bioraffineriekonzept würde daher auf die Herstellung hochwertiger Produkte (Polymere, Feinchemikalien, Zellstoffe) abzielen und gleichzeitig die Umwandlung von biogenem Kohlenstoff in einen speicherbaren und leicht zu verteilenden Energievektor maximieren** (Celebi *et al.* 2017). Ähnlich wie bei der Herstellung gasförmiger Treibstoffe wird bei der Herstellung flüssiger Treibstoffe die Elektrolyse mit einem Grenzwirkungsgrad von mehr als 90 % des unteren Heizwerts, der für die Umwandlung von Treibstoff in Strom erforderlich ist, integriert (Peduzzi *et al.* 2018). Im Bioraffinerie-Ansatz würde der erzeugte Wasserstoff nicht nur als erneuerbarer Energieträger, sondern auch als Baustein für chemische Produkte genutzt werden. Darüber hinaus ist CO_2 ein Nebenprodukt der Flüssigtreibstoffproduktion, so dass der Prozess durch die Sequestrierung von biogenem Kohlenstoff potenziell negative Emissionen erzeugen kann.

4 Die Rolle der verholzten Biomasse im Energiesystem

Aufbauend auf den Beschreibungen der Energieholzpotenziale und ihrer Verfügbarkeit in der Schweiz (Kapitel 2) und den verschiedenen möglichen Technologien zu ihrer energetischen Nutzung (Kapitel 3) wird nun die optimale Verwendung dieser begrenzten Ressource aus energiesystemischer, ökologischer und ökonomischer Sicht diskutiert. Aus der Systemperspektive werden der Gesamtenergiebedarf in der Schweiz für verschiedene Dienstleistungen und die potenziell verfügbaren nicht-fossilen Ersatzstoffe analysiert, um daraus sinnvolle Verwendungen für das Holz abzuleiten.

4.1 Stoffliche oder energetische Nutzung?

Als vielseitig einsetzbare und begrenzte Ressource sollte Holz so genutzt werden, dass der ökologische und sozioökonomische Nutzen von der Produktion bis zum Verbrauch maximiert wird. Die Einsparung fossiler Ressourcen, die Steigerung der Ressourceneffizienz und die Reduzierung der CO_2-Emissionen spielen hierfür eine besonders wichtige Rolle. **Dabei ist es wichtig, dass das Holz möglichst weitgehend stofflich genutzt wird** (z. B. für Bauholz und Dämmstoffe) und möglichst in einer Kaskade, d. h. mehrfach hintereinander stofflich und erst am Ende energetisch. Dies gilt prinzipiell für alle Arten von verholzter Biomasse einschliesslich Altholz. Oft wird jedoch vergessen, dass entlang der gesamten Verarbeitungskette Restholz in erheblichen Mengen anfällt, z. B. in Sägewerken, Schreinereien und Möbelfabriken. Bei diesem Holz handelt es sich fast ausschliesslich um Energieholz mit geringen Beschaffungskosten und hoher Qualität (trocken und frei von mineralischen Verunreinigungen). Das bedeutet, dass Energieholz dank der Kaskadennutzung nicht immer erst «am Ende» der Prozesskette (als Altholz) anfällt.

In der Schweiz ist das mengenmässig wichtige Waldenergieholz in der Regel ein Neben- bzw. Kuppelprodukt bei der Ernte von Stamm- und Industrieholz, da es immer Teile eines Baumes gibt, die aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen nicht stofflich genutzt werden. Mehr *et al.* (2018) wiesen darauf hin, dass die Mehrfachkaskadierung von Holz in der Schweiz die Umweltauswirkungen verringern könnte: Über den modellierten 200-Jahres-Horizont lagen die gesamten systemischen Emissionsreduktionen im Vergleich zur einfachen Kaskadierung (d. h. das gesamte Altholz wird direkt verbrannt) zwischen 35-59 Mt CO_2-eq. und 43–63 kt PM_{10}-eq. Welche anderen Produkte während der Kaskade ersetzt werden und wie vollständig und effizient Holz am Ende energetisch genutzt werden kann, sind beides relevante Punkte. Zudem ist es wichtiger, bei der aktuellen Unternutzung der Ressource im Wald vermehrt Primärholz energetisch zu nutzen (Suter *et al.* 2017). Als treibende Faktoren für die Umweltauswirkungen zukünftiger Holznutzungsszenarien haben sich die Effizienz der Altholzverarbeitung, die Speichereffekte von Holz (im Falle der biogenen Kohlenstoffbilanzierung) und die verfügbaren Kaskadierungsoptionen erwiesen. **In den letzten Jahren hat die Kaskadennutzung von Holz jedoch kaum Fortschritte gemacht.** Einerseits fehlt es in der Schweiz an Produktionskapazitäten der Zellstoff-, Papier- und Spanplattenindustrie für die stoffliche Nutzung der heute energetisch genutzten Holzsortimente, so dass die energetische Nutzung als einzige Alternative verbleibt. Andererseits wird der Brennstoff Holz zunehmend als Ersatz für nicht erneuerbare Energieträger eingesetzt, was ebenfalls Vorteile mit sich bringt. Auf der Grundlage einer Lebenszyklusanalyse haben Vadenbo *et al.* (2018) gezeigt, dass ein verstärkter Einsatz von heimischem Energieholz - mit Ausnahme von Waldholz für stoffliche Anwendungen - ökologisch vorteilhaft wäre.

Minderwertiges Holz wird in der Regel energetisch genutzt, aber Bioraffinerien können es auch stofflich verwerten (Celebi *et al.* 2017). In einer von der EPFL durchgeführten Fallstudie (Studer und Poldervaart 2017) wurde eine Bioraffinerie analysiert, die Butanol, Aceton und Ethanol auf biochemischem Weg herstellt und gleichzeitig Reststoffe thermochemisch in Synthesegas umwandelt. Das synthetische Gas wird zur Erzeugung von Wärme und Strom für die Bioraffinerie verwendet, wobei eine Einheit biogenen Kohlenstoffs 0,85 Einheiten fossilen CO_2 ersetzt. Mit dem Ansatz der kombinierten Wärme- und Treibstofferzeugung kann das GWP der Emissionen pro Einheit biogenen Kohlenstoffs 2,5- bis 3-mal mehr reduziert werden als mit Holzverbrennung in einem Heizkessel (Celebi *et al.* 2019). Bioraffinerien gibt es in der Schweiz noch nicht, aber ihre Machbarkeit wird diskutiert, insbesondere im Hinblick auf Angebot, Produkte, Anlagengrösse, Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit (Poldervaart 2016; Riediker 2021).

Die Allokation von Holz wird durch den Markt und die Politik entschieden. Bisher wurden in der Praxis Entscheidungen zugunsten der stofflichen Nutzung vor allem aus wirtschaftlichen Gründen und nicht aufgrund von Umweltargumenten getroffen. So haben beispielsweise die strukturell sinkende Nachfrage nach Industrieholz und Laubholz (Deindustrialisierung) und die steigende Nachfrage nach Energieholz dazu geführt, dass die Wälder einen grossen Teil des Brennstoffs liefern. Diese Situation könnte sich in Zukunft ändern. Das politische Ziel der Dekarbonisierung der europäischen Wirtschaft könnte der stofflichen Nutzung von Holz neue Impulse geben, da viele fossile Rohstoffe bis 2050 ersetzt werden müssen. So können beispielsweise im Bereich der Dämmung minderwertige Holzsortimente in grossem Umfang eingesetzt werden, wodurch für diese höhere Preise erzielt werden und ihre energetische Nutzung konkurrenziert wird. Gleichzeitig zeichnet sich aber auch eine Verwendung von höherwertigem Holz für energetische Zwecke ab. Insbesondere aufgrund der zunehmenden Lückenfüllerfunktion von Holz (und anderer Biomasse) im Energiesektor können nun auch für Energieholz höhere Preise erzielt werden. In diesem Zusammenhang ist Holz im Wärme- und Mobilitätssektor eher rentabel als im Stromsektor, wo Photovoltaik (PV) und Wind bei der Energieerzeugung wettbewerbsfähiger sind. PV und Wind sind jedoch intermittierend und stochastisch, schwanken saisonal, während Holz gespeicherte Energie ist, die bei Bedarf genutzt werden kann. Insbesondere lässt sich Holz in einen anderen, ebenfalls lagerfähigen und leicht zu verteilenden Brennstoff umwandeln, der dann in Form mehrerer Endenergiedienstleistungen genutzt werden kann. **Daher ist eine steigende Nachfrage nach Holz sowohl für die stoffliche als auch für die energetische Nutzung zu erwarten,** die angesichts des politischen Ziels der Klimaneutralität nicht nur ein kurzfristiges Phänomen sein wird. Es sollte daher bedacht werden, dass die hier vorgestellten Möglichkeiten der energetischen Nutzung und ihre Verbreitung auch stark von Entscheidungen abhängen, die im weiteren Kontext der stofflichen Nutzung von Holz und der Nutzung der Wälder im Allgemeinen getroffen werden. Die nachgefragten Mengen an minderwertigen Holzsortimenten können jedoch für die stoffliche und die energetische Nutzung sehr unterschiedlich sein; im Falle der stofflichen Nutzung können aus diesen Sortimenten hochwertige Produkte hergestellt werden, allerdings in geringerer Menge als bei der energetischen Nutzung des Holzes.

4.2 Möglichkeiten der energetischen Nutzung

Der gesamte Endenergieverbrauch in der Schweiz belief sich im Jahr 2019 auf 834 PJ und im Jahr 2020, dem ersten Pandemiejahr, auf 747 PJ (BFE 2021a, Tabelle 14). Von diesen Gesamtmengen wurden 201 PJ im Jahr 2019 (24 %) und 203 PJ im Jahr 2020 (27 %) aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen (BFE 2021b). Auf Holz entfielen 4,7 % (2019) und 5,3 % (2020) des Verbrauchs an erneuerbarer Energie. Die wichtigsten Energieverbrauchssektoren sind Wärme, Mobilität und Strom (für andere Anwendungen als Wärme und Mobilität). Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endverbrauch lag im Jahr 2020 bei 24 % für die Wärmeerzeugung und 60 % für den Stromverbrauch, während der Anteil für die Mobilität sehr gering blieb. Holz spielt derzeit eine wesentliche Rolle bei der Wärme (ca. 11 %; Holzenergie Schweiz 2016), aber eine untergeordnete Rolle beim Strom und vor allem bei der Mobilität.

Das **Heizen** ist der Sektor, der jährlich am meisten Energie verbraucht (BFE 2021c). Die Gesamtenergiemenge, die für das Heizen verbraucht wird, ist von 2019 bis 2020 um 5 % gesunken, ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch ist jedoch gestiegen (von 43 % auf 48 %). Wärme wird zur Bereitstellung von Warmwasser und Wärme für Gebäude, aber auch als Prozessenergie für industrielle Anwendungen genutzt. Warmwasser und Raumwärme sind Niedertemperaturanwendungen, die auch mit Hilfe von elektrischen Wärmepumpen, Solarkollektoren und Erdwärme bereitgestellt werden können und die alle ein erhebliches Ausbaupotenzial haben. Für die Bereitstellung von Prozesswärme im Hochtemperaturbereich sind diese Alternativen jedoch kaum geeignet; die Verbrennung von Holz ist für diesen Zweck die geeignetere Lösung. Eine weitere Alternative für die Bereitstellung von Hochtemperatur-Prozesswärme ist die kombinierte Wärme- und Treibstofferzeugung, bei der gasförmige oder flüssige Biobrennstoffe zusammen mit der industriellen Wärmeversorgung erzeugt werden (z. B. die Verbrennung von Holzresten, nachdem bestimmte Fraktionen, wie Kohlenhydrate, zur Synthese flüssiger Brennstoffe oder Chemikalien verwendet wurden). Die Wirtschaftlichkeit der Bereitstellung von Prozesswärme in der Industrie ist jedoch – im Gegensatz zu Holzenergieanlagen mit Wärmenetzen – noch eine grosse Herausforderung

(BFE 2021d). Um fossile Brennstoffe zu ersetzen, ist der Ausbau von Wärmenetzen geplant, die mit Abwärme und erneuerbaren Energien gespeist werden und Wärme oder Kälte auf verschiedenen Temperaturniveaus verteilen (EnergieSchweiz 2021). Thermische Netze, die mit Holz oder anderen erneuerbaren Energieträgern betrieben werden, werden in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, insbesondere in den Agglomerationen, wie die Energieperspektiven 2050+ (BFE 2022) zeigen.

Der **Mobilitätssektor** hat den zweitgrössten jährlichen Energieverbrauch mit 38 % des Gesamtenergieverbrauchs im Jahr 2019 und 32 % im Jahr 2020 (BFE 2021c). Individual- und Güterverkehr sind mit einem Anteil von 95 % am stärksten von fossilen Energieträgern abhängig (BFE 2019a). Es besteht daher ein zunehmender Bedarf an der Elektrifizierung dieses Sektors, was jedoch unterschiedliche Massnahmen für die einzelnen Teilsektoren erfordert. Kurz- und mittelfristig ist eine Elektrifizierung des individuellen Personenverkehrs möglich, indem die Motorfahrzeuge mit Batterien betrieben werden. Auch bei der Elektrifizierung von Langstrecken-Lkw gibt es ermutigende Entwicklungen (Verkehr und Umwelt 2021). Der Luftverkehr wird jedoch wahrscheinlich noch viele Jahre auf flüssige Treibstoffe mit hoher Energiedichte angewiesen sein. Daher ist die Synthese dieser Treibstoffe aus erneuerbaren Ressourcen wie Holz oder anderen lignozellulosehaltigen Rohstoffen sehr zu empfehlen, selbst wenn der Gesamtbedarf nicht durch heimische Biomasse gedeckt werden kann.

Elektrizität ist bereits heute ein wichtiger Energieträger für verschiedene Anwendungen und vor allem aufgrund des hohen Anteils der Wasserkraft in der Schweiz sind nur etwa 40 % des heutigen Strommixes nicht erneuerbar (hauptsächlich Kernenergie; BFE 2021b). So müssen zur Deckung des heutigen Energiebedarfs rund 80 PJ/a Strom zusätzlich aus erneuerbaren Ressourcen produziert werden. Mit der prognostizierten Zunahme der Elektrifizierung, z. B. im Bereich der Mobilität, wird der Bedarf in Zukunft jedoch voraussichtlich steigen. Um diesen zu decken, ist der Ausbau von Wasserkraft, PV, Windkraft und Biomasse möglich. Es wird geschätzt, dass Wasser- und Windkraft in der Schweiz nur um rund 12 PJ/a bzw. 32 PJ/a ausgebaut werden können (BFE 2019b). Demgegenüber wird das Gesamtpotenzial der PV in der Schweiz auf 240 PJ/a geschätzt (BFE 2019c). Die fluktuierende Stromerzeugung mit Wind- und Solartechnologien stellt jedoch eine Herausforderung für das zukünftige Energiesystem dar. Um das Stromnetz zu stabilisieren, müssen neue Steuerungssysteme und Technologien zur Stromspeicherung entwickelt werden. Auch Biomasse kann verstromt werden, z. B. in WKK-Anlagen oder durch Umwandlung in Methan, das dann in einer WKK-Anlage entweder direkt oder nach Einspeisung in das Erdgasnetz bei Bedarf verstromt werden kann. Die Speicherung von Methan ist somit ein vielversprechender Weg, um die Schwankungen des Solarstroms auszugleichen.

Zusammengefasst sind die Umwandlung in Biokraftstoffe, die Erzeugung von Hochtemperaturwärme und der Ausgleich von Schwankungen der Sonnenenergie sinnvolle Beiträge des Holzes zum zukünftigen Energiesystem.

4.3 Optimale energetische Nutzung

Bei der Gestaltung des zukünftigen schweizerischen Energiesystems muss die Doppelnatur des Holzes als Energieträger, aber auch als Kohlenstoffquelle, berücksichtigt werden. Konkret trägt die Nutzung von Holz (d. h. von erneuerbarem Kohlenstoff) zur Deckung des Energiebedarfs des nationalen Systems nicht nur zur notwendigen Energieversorgung bei, sondern dient auch als Ersatz für fossilen Kohlenstoff. **Um die Kohlenstoffemissionen zu minimieren und einen maximalen Kohlenstoffkreislauf im Energiesystem zu erreichen, sollten die Kaskadennutzung von Holz, geeignete CO_2-Abscheidungstechnologien und Kohlenstoffwiederverwendungsstrategien verfolgt werden.** Durch die Abscheidung und Rückverwandlung des bei den primären Umwandlungstechnologien freigesetzten Kohlenstoffs in wertvolle Brennstoffe und Produkte werden die Netto-Kohlenstoffemissionen verringert und die Gesamteffizienz der Kohlenstoffumwandlung im nationalen Energiesystem verbessert.

4.3.1 Entscheidungsmodelle für die optimale energetische Nutzung in Bezug auf CO_2 und Energieeffizienz

Um die Rolle von Holz im zukünftigen Energiemix zu definieren, wurde ein mathematisches Optimierungsmodell entwickelt, welches das gesamte Energiesystem der Schweiz berücksichtigt und auf dem Energyscope-Konzept basiert (www.energyscope.ch) entwickelt (Gironès *et al.* 2017; Li *et al.* 2020). Die aktuelle Situation der Energieholznutzung wurde simuliert und validiert, wobei das gesamte Holznutzungspotenzial in Heizkesseln zur Wärmeerzeugung berücksichtigt wurde. Aus Gründen der Effizienzmaximierung, der variablen Prozesskosten und der Rohstoffverfügbarkeit sowie der Notwendigkeit, Emissionen zu minimieren, ist die Suche nach alternativen Lösungen für die zukünftige Strategie zwingend erforderlich. Zu diesem Zweck wurden fast eintausend verschiedene Szenarien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Biomasseverfügbarkeiten und variabler Kapitalkosten für die Umwandlungsprozesse verwendet, um die inhärente Unsicherheit dieser entscheidenden Parameter zu simulieren (Li *et al.* 2020). Alle verwendeten Szenarien berücksichtigen die vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems bis 2050 und verfolgen das Ziel, die effizienteste Deckung des Energiebedarfs des Systems zu erreichen und gleichzeitig die Kosten des gesamten Systems zu minimieren.

Eine eingehende Analyse der Optimierungsergebnisse zeigt, dass bei einem variablen Einsatz von 13–17 TWh/a (47–61 PJ/a) Holz im Energiesys-

tem immer die gesamte Menge zur Erzeugung von gasförmigen und flüssigen Biotreibstoffen genutzt wird beziehungswiese zu einem geringen Teil zur Deckung des Wärmebedarfs des Systems beiträgt (LI *et al.* 2020). In der Mehrzahl der optimierten Szenarien wird verholzte Biomasse durch Vergasung und anschliessende Reformierung direkt in synthetisches Erdgas (SNG) umgewandelt. Einerseits kann die Holzvergasung das System mit bis zu 9,5 TWh/a SNG versorgen und stellt die grösste SNG-Gasproduktionsressource dar. Andererseits wird ein Teil des Holzes verwendet, um durch die Kopplung von Biomassevergasung und Fischer-Tropsch-Synthese bis zu 3,7 TWh/a an synthetischen Flüssigtreibstoffen zu liefern. Nach der Analyse der verschiedenen Szenarien macht die direkte Umwandlung von verholzter Biomasse in **synthetische Flüssigtreibstoffe bis zu 40 %** ihrer Produktion im Energiesystem aus. Der verbleibende Anteil stammt aus alternativen Syntheseverfahren, die die Power-to-Gas-Option nutzen und abgeschiedenes CO_2 (einschliesslich biogenes CO_2) mit erneuerbarem Wasserstoff (H_2) umsetzen. Die H_2-Produktion ist ebenfalls in einer begrenzten, aber nicht zu vernachlässigenden Anzahl von Lösungen vertreten, die sich auf maximal 5,5 TWh/a durch Holzvergasung erzeugten H_2 belaufen.

Die Holzvergasung wird wegen der einfacheren Lagerung bevorzugt zur Herstellung gasförmiger und flüssiger Biotreibstoffe eingesetzt. Im Gegensatz dazu scheint die **Verwendung von Holz zur Wärme- und Stromerzeugung in WKK-Anlagen mit einem Anteil von maximal 18 % an der Gesamtenergie aus der Holzumwandlung eher begrenzt** zu sein. Die Wärme wird aktuell nämlich hauptsächlich durch die Verbrennung von Abfällen und durch die Wärme-Kraft-Kopplung mit Erdgas erzeugt. **Darüber hinaus kann die Abwärmenutzung aus Hochtemperaturvergasern 10–13 % der gesamten erzeugten Hochtemperaturwärme beitragen.** Dies ist ein wichtiger Aspekt, da er bedeutet, dass zusätzliche Wärme in das System eingespeist wird, aber auch, dass die Effizienz des Biomasseumwandlungsprozesses maximiert werden kann. Eine zusätzliche Menge an Hochtemperaturwärme (7–10 %) kann auch indirekt aus Holz erzeugt werden, indem das erzeugte SNG verwertet wird.

Nach der Szenarioanalyse wird **die direkte Stromerzeugung aus Holz nicht favorisiert**, da die benötigte Leistung durch andere erneuerbare Energiequellen, wie PV und Wasserkraft, bereitgestellt werden kann. Dies ist zu erwarten, wenn man die Potenziale der Biomasse und die Kapazität der anderen erneuerbaren Energiequellen vergleicht. Ein Schlüsselfaktor für die Steuerung der Stromversorgung im Schweizer Energiesystem ist neben der Stromeinsparung und der Effizienz die Nutzung der bestehenden Wasserkraftwerke und PV-Anlagen (für H_2-Speicher), die den grössten Anteil an saisonalen Speichertechnologien haben (70–85 % der gespeicherten Leistung; Li *et al.* 2021).

Die Nutzung von biogenem Kohlenstoff zur indirekten Speicherung von Strom in chemischer Form nach dem Power-to-Gas-Konzept ist eine weitere wichtige Möglichkeit. Bis zu 6 TWh/a an erneuerbarem H_2 können durch Elektrolyse erzeugt werden, wobei Strom verwendet wird, der nicht direkt im

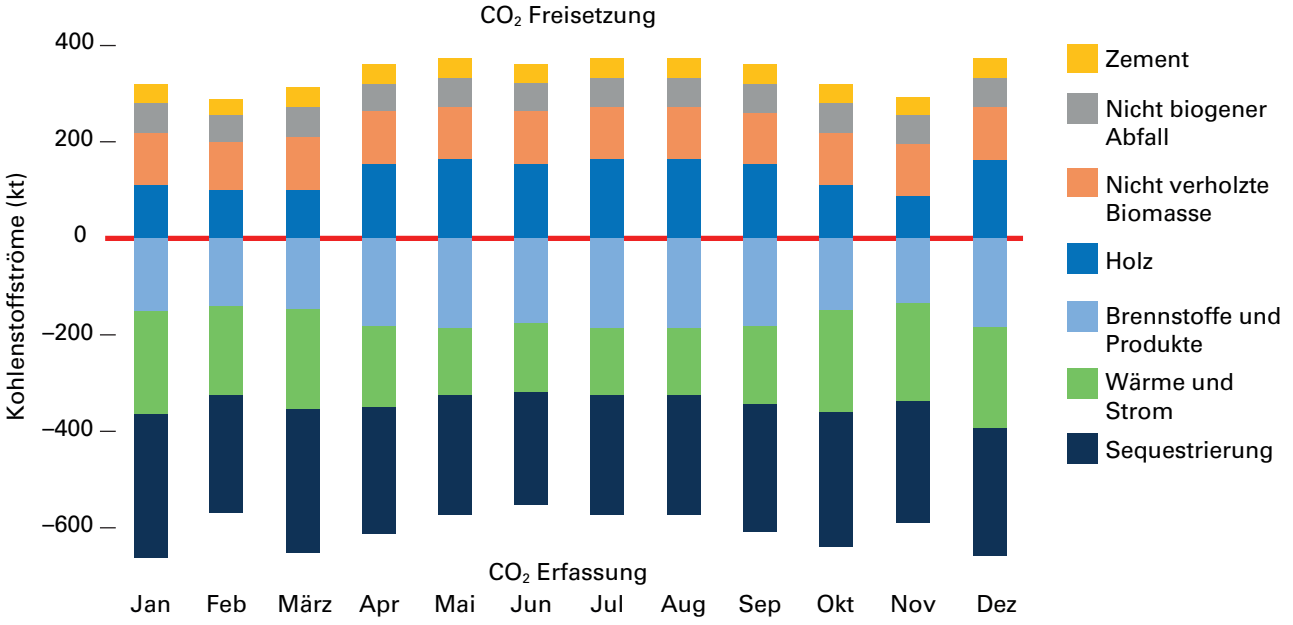

Abbildung 15: Monatliche Verteilung des Kohlenstoffflusses in einem Szenario des Schweizer Energiesystems im Jahr 2050. Positive Werte entsprechen der Freisetzung von CO_2 (Umwandlung von Biomasse und Abfällen sowie Zement), während negative Werte der Nutzung von abgeschiedenem CO_2 entsprechen, wie bei Power-to-X-Technologien (Brennstoffe und Produkte, Wärme und Strom, Sequestrierung). Selbst wenn ein Grossteil der Kohlenstoffflüsse im Schweizer Energiesystem geschlossen werden kann, muss ein erheblicher Teil des CO_2 sequestriert werden, um im Jahr 2050 Netto-Null-Kohlenstoffemissionen zu erreichen. Angepasst von Li *et al.* (2020).

Energiesystem genutzt werden kann und deshalb gespeichert werden muss. Bei den meisten Lösungen ist der Anteil von **Power-to-Gas an der gesamten SNG-Produktion jedoch aus wirtschaftlichen und Effizienzgründen auf 4–6 % begrenzt**, wobei der Grossteil des abgeschiedenen Kohlenstoffs zur Synthese von flüssigen Biotreibstoffen für die Luftfahrt verwendet wird.

Die obigen strategischen Überlegungen zur Nutzung verholzter Biomasse – in erster Linie für Biotreibstoffe und in zweiter Linie für die Wärme- und Stromerzeugung – gehen davon aus, dass **effiziente CO_2-Sequestrierungsstrategien** zur Verfügung stehen, um Kohlenstoff aus dem System zu entfernen. Das ist aber noch nicht der Fall. Abbildung 15 zeigt die simulierte monatliche Verteilung der Ströme von elementarem Kohlenstoff im Energiesystem im Jahr 2050. Diese Werte werden aus den äquivalenten CO_2-Emissionen der verschiedenen energiebereitstellenden und -verbrauchenden Prozesse und Sektoren abgeleitet. Positive Werte stehen für die Prozesse, die Kohlenstoff im Energiesystem freisetzen (d. h. beim Verbrauch von Biomasse und Abfall sowie bei der Zementherstellung). Negative Werte stehen dagegen für die Prozesse, die vorhandenen Kohlenstoff entfernen, indem sie ihn als Ressource in Power-to-X-Technologien (Treibstoffe und Produkte, Wärme und Strom) sowie für die Sequestrierung verwenden. Abbildung 15 bezieht sich auf ein beispielhaft optimiertes Szenario für 2050 und stellt die äquivalente Masse an Kohlenstoff dar, die im Energiesystem auf monatlicher Basis zirkuliert. Darüber hinaus ermöglicht die Kategorisierung, die wichtigsten «Akteure» in Form von kohlenstoffemittierenden oder -verbrauchenden Technologien zu identifizieren. Die Technologien zur Kohlenstoffbindung spielen eindeutig eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung des Kohlenstoffgleichgewichts im System. Dies gilt für alle Ergebnisse, bei denen die CO_2-Sequestrierung eingesetzt wird, um dem System weiter Kohlenstoff zu entziehen und die vollständige Dekarbonisierung zu erreichen. Insgesamt zeigt die Szenarioanalyse, **dass 10,5 bis 12,6 Mio. t CO_2 pro Jahr sequestriert werden müssen, um ein Netto-Null-Energiesystem im Jahr 2050 zu erreichen**. Dieser Wert beinhaltet auch einen durchschnittlichen Beitrag von 6 Mio. t/a CO_2 aus landwirtschaftlichen Aktivitäten.

Zusammengefasst: Im simulierten Netto-Null-Energiesystem für die Schweiz im Jahr 2050 wird Biomasse und insbesondere die verholzte für die Energiewirtschaft genutzt, entweder durch Wärme- und Stromproduktion in den Wintermonaten oder durch die Produktion von gespeichertem Brennstoff, der leicht in Treibstoffe für Transportanwendungen umgewandelt werden kann. Holzkonversionsverfahren werden auch zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Industrie durch die kombinierte Erzeugung von Wärme und Treibstoffen eingesetzt. Die Wahl zwischen flüssigen und gasförmigen Treibstoffen hängt hauptsächlich mit der Treibstoffauswahl für das Transportsystem zusammen. Wenn der Luftverkehr in das Energiesystem einbezogen wird, hat die Herstellung von Flugtreibstoff Vorrang vor der anderweitigen Nutzung der Biomasse. Darüber hinaus wird bei der Umwandlung von Biomasse biogenes CO_2 erzeugt, das wiederum sequestriert werden kann, um die unvermeidlichen Emissionen aus der Landwirtschaft zu kompensieren.

4.3.2 Weitere Überlegungen

Bei der Suche nach optimalen Lösungen für die Energieholznutzung sollten weitere wichtige Kriterien berücksichtigt werden: Flächenbedarf, soziale Akzeptanz, Einkommens- oder Beschäftigungseffekte und Auswirkungen auf die Biodiversität sowie Feinstaub und Holzascheentsorgung.

Hinsichtlich des **Flächenbedarfs** kann die energetische Nutzung von Waldholz effizient sein. In der Schweiz wird für die gesamte Lieferkette nur wenig Fläche (4,3 km^2) benötigt, um das volle nachhaltige Potenzial zu nutzen (Bowman *et al.* 2021). Der Wald wird nämlich für verschiedene Zwecke bewirtschaftet und die zusätzliche Fläche, die für die Nutzung von Energieholz benötigt wird, besteht nur aus Bauland (z. B. für den Bau von Konversionsanlagen) und nicht aus Wald- oder Landwirtschaftsflächen. Für die Nutzung der gesamten verholzten Biomasse in der Schweiz wäre schätzungsweise eine Fläche von 12,6 km^2 erforderlich.

Während die **gesellschaftliche Akzeptanz** von erneuerbaren Energien im Allgemeinen hoch ist, kann eine geringe lokale Akzeptanz die Entwicklung von Projekten für erneuerbare Energien behindern (Segreto *et al.* 2020). Dies gilt im Prinzip auch für die Bioenergie, allerdings in weitaus geringerem Masse für den Fall der energetischen Holznutzung. Dennoch können bei der Realisierung von grösseren Anlagen Beschwerden von Betroffenen ein relevantes Hindernis darstellen (BFE 2021d). Diese können Projekte erheblich verzögern, verteuern und letztlich verhindern. Die Schweizer Praxis zeigt jedoch, dass Beschwerden durch eine gute Planung (insbesondere Standortwahl) sowie eine frühzeitige und kontinuierliche Kommunikation mit den Betroffenen vermieden werden können. Die Bewilligungsverfahren sollten durch eine Optimierung der Abläufe auf kantonaler und kommunaler Ebene beschleunigt werden. Wichtig ist ein klares Verständnis der Faktoren, welche die Einstellung der Bevölkerung beeinflussen (Wüstenhagen *et al.* 2007; Stadelmann-Steffen 2017).

Die stoffliche Nutzung generiert auf allen Stufen der Wertschöpfungskette mehr **Beschäftigung** (und Wertschöpfung) als die energetische Nutzung, sowohl absolut als auch in Bezug auf einen Kubikmeter Holz (BAFU 2013). Die stoffliche Nutzung von Holz erfordert insgesamt mehr Verarbeitungsschritte und führt zu höherwertigen Produkten. In der Schweiz fehlen jedoch Verarbeitungskapazitäten für die Nutzung der geringwertigeren Holzsortimente. Die Vorteile der Kaskadennutzung sind daher derzeit eher theoretischer Natur, wobei die positiven Beschäftigungseffekte der energetischen Nutzung be-

reits heute gelten und – gerade im ländlichen Raum – nicht zu vernachlässigen sind.

Die Auswirkungen der Holzproduktion und Bioenergieerzeugung auf die **Biodiversität** sind sehr komplex. Sie sind in hohem Masse standortspezifisch und hängen von der Baumart, der Bewirtschaftung der Ressourcen und der Lieferkette sowie der Art der Energieumwandlung und -nutzung, einschliesslich der angewandten Recycling- und Entsorgungstechnologien, ab. Generell kann die Produktion von Holz in Wäldern als besonders risikoreich in Bezug auf Biodiversitätsverluste angesehen werden. In der Schweiz schreibt das Waldgesetz die nachhaltige Produktion aller Holzsortimente vor. Im Rahmen der nachhaltigen Waldbewirtschaftung werden die natürliche Verjüngung des Waldes und heterogene Bestandsstrukturen gefördert, während Kahlschläge verboten sind. Die geregelte Holznutzung führt zu periodischen Veränderungen der Lebensraumbedingungen, was die Biodiversität der Wirtschaftswälder sogar verbessern kann (Krumm *et al.* 2020).

Schweizer Energieholz wird nicht in speziellen Plantagen produziert, sondern ist ein Kuppel- bzw. Nebenprodukt von Stammholz aus einer nachhaltigen Forstwirtschaft mit langen Umtriebszeiten. Zudem wird Totholz gezielt erhalten und nicht energetisch genutzt. Auch die Nutzung von Reisig wird weitgehend vermieden. Die für die Bewirtschaftung von Schutzwäldern im Alpenraum wirtschaftlich notwendige Vollbaumnutzung könnte mittel- bis langfristig negative Folgen für die Totholznutzer (Fauna, Pilze und Flora) haben. Diese Folgen können durch eine entsprechende Verfahrensgestaltung, zum Beispiel durch die Rückführung der Äste in den Bestand, minimiert werden. Bisher sind keine negativen Auswirkungen der Nutzung von Energieholz aus Wäldern und Landschaften auf die Biodiversität im Allgemeinen nachgewiesen worden. In Zukunft sind die grössten Konflikte mit der Waldbiodiversität dort zu erwarten, wo die Umtriebszeiten reduziert werden, was aus Gründen der Klimaanpassung und der Energieholzproduktion derzeit propagiert wird (Bollmann und Braunisch 2013, 2016).

Bei der Verbrennung von Holz entstehen **Schadstoffe, insbesondere Feinstaub** (PM), mit unterschiedlichen Auswirkungen auf Gesundheit und Klima. Diese PM-Schadstoffe lassen sich in zwei Gruppen einteilen: (i) primäre Aerosole in Form von Salzen, Russ und kondensierbaren organischen Verbindungen (COC); und (ii) sekundäre Aerosole – neben Nitraten und Sulfaten – insbesondere sekundäre organische Aerosole (SOA), die durch photochemische Reaktionen aus flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Atmosphäre gebildet werden. Diese werden auch von schlecht betriebenen Holzöfen erzeugt. Der Anteil von Feinstaub aus der Holzverbrennung nimmt in den Wintermonaten stark zu. Holzfeuerungen sind in der Schweiz eine wichtige Quelle für Feinstaub (Baltensberger *et al.* 2013). Dies kann jedoch mit Filtern und anderen Technologien und – nicht zu vergessen – mit einem verbesserten Verhalten der Nutzer und einer besseren Aufklärung behoben werden, um die illegale Abfallverbrennung und damit die Entstehung und Freisetzung von Schwermetallen, Salzsäure und Dioxin zu verhindern.

In der Schweiz gelten **Holzaschen** (Rost-, Zyklon- und Filteraschen) als Abfall. Sie sind stark angereichert mit Schwermetallen, die teilweise in Form von leicht wasserlöslichen chemischen Verbindungen vorliegen. Holzaschen müssen deshalb deponiert werden (Tobler und Jutz 2020). Ihre Entsorgung ist in der Verordnung über die Vermeidung und Entsorgung von Abfällen VVEA (SR 814.600) geregelt. Die im Holz enthaltenen Nährstoffe werden somit (noch) nicht genutzt und gehen verloren. Solange die Asche nicht als Dünger verwendet werden kann, ist eine holzbasierte Wirtschaft nicht vollständig kreislauffähig. Erwähnenswert ist, dass Holzasche auch bei der Holzvergasung und nicht nur bei der Verbrennung anfällt.

5 Folgerungen und Empfehlungen

Verholzte Biomasse ist eine einzigartige biogene Kohlenstoffquelle, die stofflich und energetisch in Form von verschiedenen Produkten und Dienstleistungen genutzt werden kann. Ihre Potenziale sind jedoch begrenzt, und aus Gründen der ökologischen Effizienz sollte der stofflichen Nutzung von Holz der Vorzug gegeben werden. Aber auch als erneuerbare Energiequelle kann Holz aufgrund seiner Lagerfähigkeit, seiner Nutzungsflexibilität und seiner Rolle als biogener Kohlenstofflieferant einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Die **Vorteile seiner energetischen Nutzung** sind:

i. verholzte Biomasse kann zur Bereitstellung von Wärme und Strom sowie von gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen genutzt werden;
ii. alle Nutzungspfade sind aus Sicht des Klimawandels geeignet:
   - um fossile Brennstoffe und damit die Emissionen von fossilem CO_2 zu ersetzen,
   - um die Abscheidung von biogenem CO_2 zu ermöglichen, das für die Sequestrierung und damit für negative Kohlenstoffemissionen genutzt werden kann;
iii. Energieholz kann die Energieversorgung und das Stromnetz stabilisieren, da seine grosse Speicherkapazität zum Ausgleich des Netzes beiträgt und eine zentrale Rolle bei der Kopplung verschiedener erneuerbarer Energien spielt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Energieholz aus funktionaler Sicht von grösserer Bedeutung ist als sein vergleichsweise geringes Potenzial vermuten lässt. Mehr noch als andere Biomassen ist Energieholz aufgrund seiner aussergewöhnlich viel-

fältigen Nutzungsmöglichkeiten **ein «Joker» für die Gestaltung der Energiewende.**

Die energetische Nutzung von Holz ist **in technologischer Hinsicht heterogen**: Für die Umwandlung in feste, gasförmige oder flüssige Energieträger und für die Bereitstellung von Wärme, Strom oder Mobilität sind biochemische, thermochemische und physikalisch-chemische Prozesse notwendig. Die vielfältigen Umwandlungstechnologien haben mit Hilfe von SCCER BIOSWEET grosse Fortschritte gemacht; einige innovative Technologien sind jedoch noch nicht marktreif. Um Holz im Rahmen der Energiewende und des Klimawandels optimal zu nutzen und die vorhandenen Potenziale im Sinne der Energieperspektiven 2050+ (BFE 2020) auszuschöpfen, sind weitere Forschungs- und Politikmassnahmen erforderlich.

Eine **fortschrittliche Verbrennungstechnologie** ermöglicht die Erweiterung der Rohstoffbasis (Einsatz von aschereichen Biomassebrennstoffen, einschliesslich fester nicht verholzter Biomasse) und erleichtert so die Ausschöpfung des vollen Potenzials. Die Umweltauswirkungen der Verbrennung können durch primäre Massnahmen wie fortschrittliche Verbrennungskonzepte, gestufte Verbrennung, Prozessüberwachung und Verbrennungssteuerung erheblich reduziert werden. Darüber hinaus ermöglichen sekundäre Massnahmen wie die Partikelabscheidung die Reduzierung von Schadstoffen in den Luftemissionen auch bei kleinen Anwendungen. Nicht zuletzt können auch Kampagnen zum verantwortungsvollen Umgang mit Holzfeuerungen zur Emissionsminderung beitragen.

Aus Sicht des Klimaschutzes sollte Holz als Werkstoff eingesetzt werden, wann immer dies möglich ist. Das gilt vor allem für Waldholz, aber auch für Holz aus der Landschaftspflege, für industrielle Holzreste und für Altholz. Holz sollte möglichst kaskadisch genutzt werden, d. h. mehrmals hintereinander stofflich und erst dann energetisch. In der Schweiz sind der kaskadischen Nutzung von minderwertigem Holz Grenzen gesetzt, vor allem weil die klassischen Holzindustrien (Zellstoff, Papier und Spanplatten) aus wirtschaftlichen Gründen weitgehend aus der Schweiz verschwunden sind. In Zukunft könnten jedoch Bioraffinerien neue Möglichkeiten für die stoffliche Nutzung von minderwertigem Holz bieten, da es einen hohen biogenen Kohlenstoffgehalt aufweist. Zudem muss sichergestellt werden, dass das verwendete Holz aus nachhaltiger Produktion stammt, was in der Schweiz vorgeschrieben ist.

Aufgrund des **begrenzten Angebots** muss bei grösseren Investitionsprojekten die Verfügbarkeit von Holz geprüft und langfristig gesichert werden. Dabei müssen die Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung, aber auch mögliche Veränderungen im politischen Umfeld berücksichtigt werden. Hinsichtlich der Holzproduktion im Wald bieten Strategien der Vorratsreduzierung die Möglichkeit, das Angebot an Energieholz in einem Zeitfenster von mehreren Jahrzehnten zu erhöhen.

Das begrenzte Potenzial von Holz als wertvolle biogene Energiequelle **erfordert eine effiziente Nutzung.** Bei der derzeitigen Nutzung von Energieholz (95 % als Wärme) ist dies nicht der Fall. Im Winter ist die Wärme- und Stromerzeugung aus Holz vorteilhaft. **Im Hinblick auf die Energieeffizienz und die Substitution von fossilem durch biogenen Kohlenstoff wäre es jedoch am besten, Hochtemperatur-Prozesswärme sowie gasförmige und flüssige Treibstoffe zu erzeugen. Daran schliesst sich die Stromerzeugung in WKK-Anlagen an. Wenn immer möglich, sollte die Abwärme genutzt und das freigesetzte biogene CO_2 aufgefangen werden,** um unvermeidbare Emissionen, zum Beispiel aus der Landwirtschaft, auszugleichen. Wärme aus Holz sollte aus energie-, klima- und luftreinhaltungspolitischen Gründen vor allem in grösseren automatischen Feuerungsanlagen mit Wärmenetzen erzeugt werden.

Die Wahl zwischen der Erzeugung von gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen hängt vor allem von der erforderlichen Lagerung und dem vorgesehenen Transportsystem ab. Obwohl die Erzeugung von Flüssigtreibstoff weniger effizient ist als die von synthetischem Erdgas, wird sie für Transportlösungen bevorzugt, weil diese eine hohe Energiedichte und Umwandlungseffizienz erfordern, wie zum Beispiel Flugtreibstoff. Darüber hinaus ermöglichen Power-to-Gas-Systeme die saisonale Speicherung von erneuerbaren Energien in den bestehenden Gasverteilungsnetzen.

Letztlich ist die **konkrete Situation** von Energiebedarf und -angebot aller erneuerbaren Energieträger entscheidend für die Bestimmung des optimalen Nutzungspfades von Energieholz. Die Bewertung der Nutzung muss in Richtung einer ganzheitlichen Wirkungsabschätzung der gesamten Liefer- und Nutzungskette erweitert werden und mit praxisorientierten Grundlagen und politischen Rahmenbedingungen unterstützt werden, die eine zweckmässige Ausschöpfung des Schweizer Energieholzpotenzials ermöglichen (siehe auch BFE 2021d). Die **Forschung** zur zukünftigen Rolle von Holz als Energieträger soll solche ganzheitlichen Ansätze unterstützen, mit besonderem Fokus auf Klima- und Nachhaltigkeitseffekte sowie auf die Integration von Holz in die Systeme der Energie- und Ressourcennutzung. Dies erfordert erneut eine systemorientierte und transdisziplinäre Forschung unter Einbezug aller Akteure.

6 Referenzen

Abu-Omar, M.M.; Barta, K.; Beckham, G.T.; Luterbacher, J.S.; Ralph, J.; Rinaldi, R.; Roma´n-Leshkov, Y.; Samec, J.S.M.; Selsand, B.F.; Wang, F., 2021: Guidelines for performing lignin-first biorefining. Energy & Environmental Science 14: 262–292. https://doi.org/10.1039/d0ee02870c

Amiri, M.T.; Dick, G.R.; Questell-Santiago, Y.M.; Luterbacher, J.S., 2019: Fractionation of lignocellulosic biomass to produce uncondensed aldehyde-stabilized lignin. Nature Protocols 14, 3: 921–954. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0121-7

Antonini, C.; Treyer, K.; Moioli, E.; Bauer, C.; Schildhauer, T.J.; Mazzotti, M., 2021: Hydrogen from wood gasification with CCS-a techno-environmental analysis of production and use as transport fuel. Sustainable Energy and Fuels 5, 10: 2602–2621. https://doi.org/10.1039/d0se01637c

BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2013: Inländische Wertschöpfung bei der stofflichen und energetischen Verwendung von Holz. Schlussbericht.

BAFU, Bundesamt für Umwelt; BFE, Bundesamt für Energie; SECO, Staatssekretariat für Wirtschaft, (Eds.) 2018: Ressourcenpolitik Holz. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz.; Bern, Switzerland

BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2020: Jahrbuch Wald und Holz 2019

BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2021: Jahrbuch Wald und Holz 2020

BAFU, Bundesamt für Umwelt, 2022: Jahrbuch Wald und Holz 2021

Bajohr, S.; Schollenberger, D.; Buchholz, D.; Weinfurtner, T.; Götz, M.; 2014: Kopplung der PtG-Technologie mit thermochemischer Biomassevergasung: Das KIC Projekt «DemoSNG». gwf – Gas/Erdgas 155: 470–475.

Baltensperger, U.; Bruns, E.; Dommen, J.; El Haddad, I.; Heringa, M.F.; Prévôt, A.S.H.; Slowik, J.G.; Weingartner, E.; Hueglin C.; Herich, H.; Keller, A.; Burtscher, H.; Heck, T.; Meyer, N.K.; 2013: Holzfeuerungen: eine bedeutende Quelle von Feinstaub in der Schweiz. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 164, 12: 420–427. https://doi.org/10.3188/szf.2013.0420

Barroso, G.; Roth, S.; Nussbaumer, T., 2019a: Investigation of biomass conversion on a moving grate by pyrolysis gas analysis and fuel bed modelling. Energy 174: 897–910. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.002

Barroso, G.; Hediger, L.; Nussbaumer, T., 2019b: Modelling and validation of biomass combustion in a screw burner. Fuel 254: 115672. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115672

Barroso, G.; Nussbaumer, T.; Ulrich, M.; Reiterer, T.; Feldmeier, S., 2019c: Scale-up methodology for automatic biomass furnaces. Journal of the Energy Institute 93, 2: 591–604. https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.06.006

Bauer, C.; Hirschberg, S.; Bäuerle, Y.; Biollaz, S.; Calbry-Muzyka, A.; Cox, B.; Heck, T.; Lehnert, M.; Meier, A.; Prasser, H.-M.; Schenler, W.; Treyer, K.; Vogel, F.; Wieckert, H.C.; Zhang, X.; Zimmermann, M.; Burg, V.; Bowman, G.; Erni, M.; Saar, M.; Tran, M.Q, 2017: Potentials, costs and environmental assessment of electricity generation technologies. Final report in English with summaries in German and French. Paul Scherrer Institute. https://www.psi.ch/sites/default/files/import/lea/HomeEN/Final-Report-BFE-Project.pdf

BFE, Bundesamt für Energie, 2019a: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2018. https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/9774

BFE, Bundesamt für Energie, 2019b: Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Aus-baupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bundesamt Energie.

BFE, Bundesamt für Energie, 2019c: Schweizer Hausdächer und -fassaden könnten jährlich 67 TWh Solarstrom produzieren. Medienmitteilung des Bundesamts für Energie vom 15.4.2019.

BFE, Bundesamt für Energie, 2020: Energieperspektiven 2050+. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjA=.html

BFE, Bundesamt für Energie, 2021a: Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2020.

BFE, Bundesamt für Energie, 2021b: Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien. Ausgabe 2020.

BFE, Bundesamt für Energie, 2021c:, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000–2020 nach Verwendungszwecken.

BFE, Bundesamt für Energie, 2021d: Analyse von Hemmnissen und Massnahmen zur Ausschöpfung des Holzenergiepotenzials. Schlussbericht. Bundesamt für Energie BFE. https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10487

BFE, Bundesamt für Energie, 2022: Energiesperspektiven 2050+. Kurzbericht. https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjM=.html

Blair, M.J.; Gagnon, B.; Klain, A.; Kulišić B., 2021: Contribution of biomass supply chains for bioenergy to sustainable development goals. Land 10, 2: 181. https://doi.org/10.3390/land10020181

BLW, Bundesamt für Landwirtschaft, 2020: Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle. https://www.a-p-d.ch/wp-content/uploads/2021/11/Voraussetzungen_und_Vorschriften_fuer_die_Bewilligung_von_Biokohle__15.06.2020-BLW.pdf

Bollmann, K.; Braunisch, V., 2013: To integrate or to segregate: balancing commodity production and biodiversity conservation in European forests. In: Kraus D., Krumm F. (eds.), Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity, pp. 18–31. European Forest Institute (EFI).

Bollmann, K., Braunisch, V., 2016: Auswirkungen des Klimawandels auf Bergwaldvogelarten. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (eds.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien, pp. 287–309. Haupt. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10622

Bowman, G.; Burg, V.; Erni, M.; Thees, O.; Björnsen, A., 2021: Energy and land requirements for bioenergy, GCB Bioenergy, 13, 9: 1466–1480. https://doi.org/10.1111/gcbb.12869

Brethauer, S.; Riediker, M.; Thees, O.; Studer, M.H.P., 2021: Die Rolle von Biomasse im zukünftigen schweizerischen Energie- und Rohstoffsystem. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 172, 1: 7–15. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:28728

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. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.007

Burg, V.; Bowman, G.; Hellweg, S.; Thees, O., 2019: Long-term wet bioenergy resources in Switzerland: drivers and projections until 2050. Energies 12, 18: 3585. https://doi.org/10.3390/en12183585

Celebi, A.D.; Ensinas, A.; Sharma, S.; Maréchal, F., 2017: Early-stage decision making approach for the selection of optimally integrated biorefinery processes. Energy 137: 908–916. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.080

Celebi, A.D.; Sharma, S.; Ensinas, A.V.; Maréchal, F., 2019: Next generation cogeneration system for industry – combined heat and fuel plant using biomass resources. Chemical Engineering Science 204: 59–75. https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.04.018

CTU AG, 2014: Lignogaz – Methan aus Holz, Projektierung einer 2.67 MW für den Standort Mont-la-Ville (VD). Bundesamt für Energie. https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=61169&Load=true

Diestel, S.; Weimar, H., 2014: Der Kohlenstoffgehalt in Holz- und Papierprodukten – Herleitung und Umrechnungsfaktoren. Thünen Working Paper 38. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn054392.pdf

Du, Y.P.; Héroguel, F.; Luterbacher, J.S., 2018: Slowing the kinetics of alumina sol–gel chemistry for controlled catalyst overcoating and improved catalyst stability and selectivity. Small 14, 34: 1801733. https://doi.org/10.1002/smll.201801733

EEA, European Environment Agency, 2018: The circular economy and the bioeconomy, partners in sustainability. EEA Report, 8. https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/b2e1e5d081ab4ecf9503320c2bf9c4d1

EnergieSchweiz, 2021: Faktenblatt Thermische Netze. http://www.verenum.ch/Dokumente/Faktenblatt.pdf

EPA, United States Environmental Protection Agency, 2021: Understanding Global Warming Potentials. https:/epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials. (last updated on March 2022)

Erni, M.; Thees, O.; Lemm, R., 2017: Altholzpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse einer Vollerhebung. WSL Berichte 52. WSL. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:9107

Erni, M.; Burg, V.; Bont, L.; Thees, O.; Ferretti, M.; Stadelmann, G.; Schweier, J., 2020: Current (2020) and Long-Term (2035 and 2050) Sustainable potentials of wood fuel in Switzerland. Sustainability 12, 22: 9749. https://doi.org/10.3390/su12229749

Erni, M.; Holm, S.; Thees, O.; Schweier, J., 2021: Verfügbarkeit von Waldenergieholz in der Schweiz. Neue interaktive Karte. Wald und Holz 102, 6: 6–7. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:27094

European Commission, 2012: Directorate-General for Research and Innovation, Innovating for sustainable growth: a bioeconomy for Europe. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2777/6462

Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K.J., 2022: The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. Forests 13, 3: 365. https://doi.org/10.3390/f13030365

FHNW, University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, 2019: ERA-LEARN Project, Development of a new low-cost low-emission micro-scale pellet stove with advanced process control. https://www.era-learn.eu/network-information/networks/bioenergy/12th-joint-call-of-era-net-bioenergy-and-2nd-additional-call-of-bestf3/development-of-a-new-low-cost-low-emission-micro-scale-pellet-stove-with-advanced-process-control. (last updated March 2020)

Gassner, M.; Maréchal, F., 2008: Thermo-economic optimisation of the integration of electrolysis in synthetic natural gas production from wood. Energy 33, 2: 189–198. https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.09.010

Gassner, M.; Maréchal, F., 2012: Thermo-economic optimisation of the polygeneration of synthetic natural gas (SNG), power and heat from lignocellulosic biomass by gasification and methanation. Energy & Environmental Science 5, 2: 5768–5789. https://doi.org/10.1039/C1EE02867G

Gassner, M.; Baciocchi, R.; Maréchal, F.; Mazzotti, M., 2009: Integrated design of a gas separation system for the upgrade of crude SNG with membranes. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 48, 9: 1391–1404. https://doi.org/10.1016/j.cep.2009.07.002

GAYA, 2021: Project GAYA. http://www.projetgaya.com. (last updated March 2022)

Geleynse, S.; Brandt, K.; Garcia-Perez, M.; Wolcott, M.; Zhang, X., 2018: The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-in biofuels: Techno-Economic Evaluation. Chemestry-Sustainability-Energy-Materials 11, 21: 3728–3741. https://doi.org/10.1002/cssc.201801690

Gironès, V.C.; Moret, S.; Peduzzi, E.; Nasato, M.; Maréchal, F., 2017: Optimal use of biomass in large-scale energy systems: Insights for energy policy. Energy 137: 789–797. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.027

Held, J., 2016: SNG from Wood – the biogas project. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications, pp. 181–190. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch6

Heyne, S.; Seemann, M.; Schildhauer, T.J., 2016: Coal and biomass gasification for SNG production. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications, pp. 5–40. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch2

Holzenergie Schweiz, 2016: Warum Holzenergie für das Klima. https://www.holzenergie.ch/fachthemen/holzenergie/warum-holzenergie

Husgafvel, R.; Linkosalmi, L.; Hughes, M.; Kanerva, J.; Dahl, O., 2018: Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the potential for cascading recovered solid wood. Journal of Cleaner Production 181: 483–497. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.176

IEA Bioenergy, 2019: Task 39:. 'Drop-in' Biofuels. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/09/Task-39-Drop-in-Biofuels-Full-Report-January-2019.pdf

IEA Bioenergy, 2020: The use of forest biomass for climate change mitigation: dispelling some misconceptions. https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/the-use-of-forest-biomass-for-climate-change-mitigation-dispelling-some-misconceptions

IEA Bioenergy, 2021: Campaigns questioning the use of woody biomass for energy are missing key facts. https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/campaigns-questioning-the-use-of-woody-biomass-for-energy-are-missing-key-facts. (last updated March 2022)

IEA Bioenergy, 2022: Fossil vs biogenic CO_2 emissions. https://www.ieabioenergy.com/iea-publications/faq/woodybiomass/biogenic-co2. (last updated March 2022)

Krumm, F.; Rigling, A.; Bollmann, K.; Brang, P.; Dürr, C.; Gessler, A.; Schuck, A.; Schulz-Marty, T.; Winkel, G., 2020: Synthesis: improving biodiversity conservation in European managed forests needs pragmatic, courageous, and regionally-rooted management approaches. In: Krumm, F.; Schuck, A.; Rigling A. (eds.), How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe, pp. 609–633. European Forest Institute (EFI); Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL). https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:25784

KTI, Kommission für Technologie und Innovation (ab 2018 Innosuisse), 2013: Energie-Kompetenzzentren (SCCER): grünes Licht für zwei Gesuche. Medienmitteilung. https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/32249.pdf

Leimert, J.M.; Neubert, M.; Treiber, P.; Dillig, M.; Karl, J., 2018: Combining the Heatpipe Reformer technology with hydrogen-intensified methanation for production of synthetic natural gas. Applied Energy 217, 37–46. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.127

Lemm, R.; Haymoz, R.; Björnsen Gurung, A.; Burg, V.; Strebel, T.; Thees, O., 2020: Replacing fossil fuels and nuclear power with renewable energy: utopia or valid option? A Swiss case study of bioenergy. Energies 13, 8: 2051. https://doi.org/10.3390/en13082051

Li, X.; Damartzis, T.; Stadler, Z.; Moret, S.; Meier, B.; Friedl, M.; Maréchal, F., 2020: Decarbonization in complex energy systems: a study on the feasibility of carbon neutrality for Switzerland in 2050. Frontiers in Energy Research 8: 549615. https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.549615

Li, X.; Damartzis, T.; Maréchal, F., 2021: Decarbonization of Swiss Energy Systems in 2050: Integrated Scenario Analysis with the SES-EPFL Model. SCCER JASM Report. EPFL. https://sccer-jasm.ch/JASMpapers/JASM_results_ses_epfl.pdf

Losey, S.; Wehrli, A., 2013: Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt (BAFU). https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/29559.pdf

Mehli, A.; Winkler, D., Griffin, T., Kaiser, S., Garcia, A., Gerner, G., Kulli, B., Baier, U., Kühni, M., Treichler, A., 2021: HTC Innovationscampus Rheinmühle -Pilotanlage zur Hydrothermalen Karbonisierung: Prozessoptimierung & Verfahrenserkenntnisse. Schlussbericht. Bundesamt für Energie(BFE). https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40894

Mehr, J.; Vadenbo, C.; Steubing, B.; Hellweg, S., 2018: Environmentally optimal wood use in Switzerland—Investigating the relevance of material cascades. Resources, Conservation and Recycling 131: 181–191. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.026

Michel, J.B., 2017: TORPLANT – Pilote de polygénération de pelletsTorpalnt de biomasse torréfiée, de chaleur et d'électricité. DGE-DIREN. Canton de Vaud.

Mohr, L.; Burg, V.; Thees, O.; Trutnevyte, E., 2019: Spatial hot spots and clusters of bioenergy combined with socio-economic analysis in Switzerland. Renewable Energy 140: 840–851. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.093

Moioli, E.; Schildhauer, T., 2021: Negative CO_2 emissions from flexible biofuel synthesis: concepts, potentials, technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews 158: 112120. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112120

Nussbaumer, T., 2017: The role of aerosols from biomass combustion. 25th European Biomass Conference and Exhibition, 12–15. Juni 2017, Stockholm. https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2017/07/Nussbaumer_IEA_T32_Aerosol-Report_2017_07_14.pdf

Nussbaumer, T.; Lauber, A.; Hennemann, P.; Meierhans, T.; Guthoerl, D.; Jacquet, S., 2019: Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU). https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=50894&Load=true

Nussbaumer, T., 2020: Introduction to biomass combustion and pollutant reduction in wood stoves and boilers. 6th Central European Biomass Conference, 22–24. Januar 2020, Graz. https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/2/2020/07/01_2020-01-23_CEBC-Graz_Nussbaumer-Homepage.pdf

Norton, M.; Walloe, L.; Brack, D.; Booth, M.; Jones, M.B., 2021: Time is of the essence when it comes to forest bioenergy. GCB Bioenergy 14: 108–109. https://doi.org/10.1111/gcbb.12905

Peduzzi, E.; Boissonnet, G.; Haarlemmer, G.; Maréchal, F., 2018: Thermo-economic analysis and multi-objective optimisation of lignocellulosic biomass conversion to Fischer–Tropsch fuels. Sustainable Energy & Fuels 2, 5: 1069–1084. https://doi.org/10.1039/C7SE00468K

Peduzzi, E.; Tock, L.; Boissonnet, G.; Maréchal, F., 2013: Thermo-economic evaluation and optimization of the thermo-chemical conversion of biomass into methanol. Energy 58: 9–16. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.029

Poldervaart, P., 2016: 2. Workshop zum Thema «Antriebskräfte und wichtige Voraussetzungen für die Entwicklung einer holzbasierten Bioraffinerie in der Schweiz». Kurzbericht. Ressource Holz (NFP 66), Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen. http://www.nfp66.ch/

SiteCollectionDocuments/nfp66_kurzbericht_wsii_schlussversion.pdf
Questell-Santiago, Y.M.; Galkin, M.V.; Barta, K.; Luterbacher, J.S., 2020: Stabilization strategies in biomass depolymerization using chemical functionalization. Nature Reviews Chemistry 4, 6: 311–330. https://doi.org/10.1038/s41570-020-0187-y
Rabou, L.P.; Bos, L., 2012: High efficiency production of substitute natural gas from biomass. Applied Catalysis B: Environmental 111–112: 456–460. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.10.034
Rabou, L.P.; Van der Drift, A.; Van Dijk, H.A.; Van der Meijden, C.M.; Vreugdenhil, B.J., 2016: MILENA indirect gasification, OLGA tar removal, and ECN process for methanation. In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M. (eds.), Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications, pp. 231–248. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch9
Raven, P. *et al.*, 2021: Letter regarding the use of forest bioenergy. Hundreds of scientists affirm that trees are more valuable alive than dead — both for climate and for biodiversity. Woodwell Climate Research Center. https://www.woodwellclimate.org/letter-regarding-use-of-forests-for-bioenergy
Riediker, M., 2021: Holz in einer zukünftigen Schweizer Bioökonomie. Holz – zentrale Ressource in einer zukünftigen Bioökonomie. Montagskolloquium, 1. Februar 2021, ETH Zürich. https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/usys/ites/ites-dam/MoKo/2021/01FEB_01_Riediker_Holz.pdf
Rigling, A.; Schaffer, H.P. (Eds.), 2015: Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt (BAFU). https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/uz-umwelt-zustand/waldbericht_2015.pdf.download.pdf/waldbericht_2015.pdf
Ropp, J.; Stäger, T.; Röthlisberger, R.; Roth, S.; Bourgeois J.-P., 2019: XyloClean (Post-traitement de fumées de générateurs de chaleur domestiques à bois). Rapport final. Federal Office for the Environment (FOEN). https://heig-vd.ch/docs/default-source/doc-institut-igt/ofev-ref-1011-07300_rapportfinal_xyloclean_ii_v2.pdf?sfvrsn=b6be48e5_0
Rozmysłowicz, B.; Yeap, J.H.; Elkhaiary, A.M.I.; Talebi A.M.; Shahab, R.L.; Questell-Santiago, Y.M.; Xiros, C.; Le Monnier, B.P.; Studer, M.H.; Luterbach, J.S., 2019: Catalytic valorization of the acetate fraction of biomass to aromatics and its integration into the carboxylate platform. Green Chemistry 21, 10: 2801–2809. https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/GC/C9GC00513G
Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A., 2015: Reactors for catalytic methanation in the conversion of biomass to Synthetic Natural Gas (SNG). Chimia 69, 10: 603–607. https://doi.org/10.2533/chimia.2015.603
Schildhauer, T.J., 2018: Biosynthetic natural gas (Bio--SNG), In: Meyers, R.A. (Eds), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, pp. 1065–1080. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_256
Schildhauer, T.J., 2016: Methanation for SNG production – Chemical reaction engineering aspects, In: Schildhauer, T.J.; Biollaz, S.M.A. (Eds.), Synthetic natural gas from coal, dry biomass, and Power-to-Gas applications, pp. 77–159. Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119191339.ch4
Schildhauer, T.J.; Kroon, P.; Höftberger, E.; Moioli, E.; Reichert, G.; Kupelwieser, F., 2021: Technologies for Flexible Bioenergy, IEA Bioenergy: Task 44. https://task44.ieabioenergy.com/publications/technologies-for-flexible-bioenergy-2021
Schmid, M.; Stucki, R.; Griffin, T., 2014: Biomasse-WKK mit 60 kW Heisslufturbine. In: Tagungsband 18. Status-Seminar, Forschen für den Bau im Kontext von Energie und Umwelt, ETH Zürich. https://dd7557c7-8e89-4a2f-99df-c2aae0023398.filesusr.com/ugd/4e60ac_8ca0b9896f8a4551a97b449a728451f4.pdf
Schnorf, V.; Trutnevyte, E.; Bowman, G.; Burg, V., 2021: Analysing costs, energy and CO_2 emissions of the main forest wood and manure transport chains in Switzerland. Journal of Cleaner Production 293: 125971. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125971
Scholz, D.; Xie, J.; Kröcher, O.; Vogel, F., 2019: Mechanochemistry-assisted hydrolysis of softwood over stable sulfonated carbon catalysts in a semi-batch process. RSC Advances 9, 57: 33525–33538.
Scholz, D.; Kröcher, O.; Vogel, F., 2018: Deactivation and regeneration of sulfonated carbon catalysts in hydrothermal reaction environments, ChemSusChem 11, 2189–2201.
Schulze, E.D.; Rock, J.; Kroiher, F.; Egenolf, V.; Wellbrock, N.; Irslinger, R.; Bolte, A.; Spellmann, H., 2021: Speicherung von Kohlenstoff im Ökosystem und Substitution fossiler Brennstoffe Klimaschutz mit Wald. Biologie in unserer Zeit 51, 1: 46–54. https://www.biuz.de/index.php/biuz/article/view/4103
Schumacher, F.; Nussbaumer, T.; Good, J., 2020: System integration and dimensioning of heat storage tanks in heating plants with automated wood furnaces. 6th Central European Biomass Conference, 22–24. Januar 2020, Graz.
Segreto, M.; Principe, L.; Desormeaux, A.; Torre, M.; Tomassetti, L.; Tratzi, P.; Paolini, V.; Petracchini, F., 2020: Trends in social acceptance of renewable energy across Europe—A literature review. International Journal of Environmental Research and Public Health 17: 9161. https://doi.org/10.3390/ijerph17249161
Shahab, R.L.; Brethauer, S.; Davey, M.P.; Smith, A.G.; Vignolini, S.; Luterbacher, J.S.; Studer, M.H., 2020: A heterogeneous microbial consortium producing short-chain fatty acids from lignocellulose. Science 369, 6507: eabb1214. https://doi.org/10.1126/science.abb1214
Shuai, L.; Amiri, M.T.; Questell-Santiago, Y.M.; Héroguel, F.; Li, Y.; Kim, H.; Meilan, R.; Chapple, C.; Ralph, J.; Luterbacher, J.S., 2016: Formaldehyde stabilization facilitates lignin monomer production during biomass depolymerization. Science 354, 6310: 329–333. https://doi.org/10.1126/science.aaf7810
Stadelmann-Steffen, I., 2017: Social acceptance of energy investments. SCCER School 17–20. Oktober 2017, Engelberg. http://www.sccer-soe.ethz.ch/export/sites/sccersoe/news/.galleries/dwn_sccerschool2017/T-13_SCCER-School_Stadelmann.pdf_2063069299.pdf
Sterman, J.; Moomaw, W.; Rooney-Varga, J.-N.; Siegel, L., 2022: Does wood bioenergy help or harm the climate? Bulletin of the Atomic Scientists 78, 3: 128–138. https://doi.org/10.1080/00963402.2022.2062933

Steubing, B., 2013: Die Ökobilanz der energetischen Holzverwertung: Faktoren für einen hohen ökologischen Nutzen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 164, 12: 408–419. https://doi.org/10.3188/szf.2013.0408

Studer, M.; Poldervaart, P., 2017: Neue Wege zur holzbasierten Bioraffinerie, Thematische Synthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP66 «Ressource Holz», Schweizerischer Nationalfonds. http://www.nfp66.ch/SiteCollectionDocuments/NFP66_Teilsynthese_2_Bioraffinierie_DE.pdf

Suter, F.; Steubing, B.; Hellweg, S., 2017: Life cycle impacts and benefits of wood along the value chain: The Case of Switzerland. Journal of Industrial Ecology 21: 874–886. https://doi.org/10.1111/jiec.12486

Teske, S.L., 2014: Integrating rate-based models into a multi-objective process design & optimisation framework using surrogate models. Dissertation EPF Lausanne, Thesis 6302. https://infoscience.epfl.ch/record/201637

Thees, O.; Burg, V.; Erni, M.; Bowman, G.; Lemm, R., 2017: Biomassepotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Berichte 57. WSL. https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:13277

Thees, O.; Erni, M.; Lemm, R.; Stadelmann, G.; Zenner, E.K., 2020: Future potentials of sustainable wood fuel from forests in Switzerland. Biomass and Bioenergy 141: 105647. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105647

Thürig, E.; Kaufmann, E., 2008: Waldbewirtschaftung zur Senkenerhöhung? Mögliche Konfliktfelder und Synergien. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 159, 9: 281–287. https://doi.org/10.3188/szf.2008.0281

Thürig, E.; Kaufmann, E., 2010: Increasing carbon sinks through forest management: a model-based comparison for Switzerland with its Eastern Plateau and Eastern Alps. European Journal of Forest Research 129, 4: 563–572. https://doi.org/10.1007/s10342-010-0354-7

Tobler, M.; Jutz, M., 2020: Projekt HARVE, Holzaschen in der Schweiz, Aufkommen, Verwertung und Entsorgung von Holzaschen aus Anlagen grösser als 50 kW. Schlussbericht. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wald-holz/fachinfo-daten/201210_HARVE_Schlussbericht_fachlich_def.pdf.download.pdf/201210_HARVE_Schlussbericht_fachlich_def.pdf

Tock, L.; Maréchal, F., 2012: H_2 processes with CO_2 mitigation: Thermo-economic modeling and process integration. International Journal of Hydrogen Energy 37, 16: 11785–11795. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.046

Transport & Environment, 2021: Unlocking electric trucking in the EU: recharging along highways – campaigning for cleaner transport in Europe. Transport & Environment (transportenvironment.org). https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/202102_pathways_report_final.pdf

Vadenbo, C.; Tonini, D.; Burg, V.; Fruergaard Astrup, T.; Thees, O.; Hellweg, S., 2018: Environmental optimization of biomass use for energy under alternative future energy scenarios for Switzerland. Biomass and Bioenergy 119: 462–472. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.001

van Dyk, S.; Su, J.; Mcmillan, J.D.; Saddler, J., 2019: Potential synergies of drop-in biofuel production with further co-processing at oil refineries. Biofuels, Bioproducts and Biorefining 13, 3: 760–775. https://doi.org/10.1002/bbb.1974

Werner, F.; Taverna, R.; Hofer, P.; Thürig, E.; Kaufmann, E., 2010: National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. Environmental Science and Policy 13, 1: 72–85. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004

Winkler, D.; Engelbrecht, G.; Griffin, T.; Haymoz, R.; Marella, A.; Weiss, D.A., 2018: Characterization, testing and modelling of a variety of pulverized biomass fuels burnt in an air staged, swirl stabilized burner, European Biomass Conference and Expo, Paper 2AO.2.3, Copenhagen. https://doi.org/10.5071/26thEUBCE2018-2AO.2.3

Wüest, J.; Lohberger, N.; Griffin, T.; Wildhaber, E., 2019: Field particle emission measurement on domestic wood firing systems retrofitted with electrostatic particle precipitators. 27th European Biomass Conference and Exhibition, 27–30 Mai 2019, Lissabon. https://doi.org/10.5071/27THEUBCE2019-2AO.2.4

Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M.J., 2007: Social acceptance of renewable energy innovation. An introduction to the concept. Energy Policy 35, 5: 2683–2691. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001

Zotter, P.; Richard, S.; Egli, M.; Rothen, B.; Nussbaumer, T., 2019: A simple method to determine cytotoxicity of water-soluble organic compounds and solid particles from biomass combustion in lung cells in vitro. Environmental Science & Technology 53, 7: 3959–3968. https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03101