

Strategien für den optimalen Einsatz von Biomasse im österreichischen Energiesystem der Zukunft

Christa Dißbauer¹, Marilene Fuhrmann¹, Nadine Gürer², Reinhard Haas², Robert Jandl³, Andreas Schindlbacher³, Christoph Strasser¹

¹BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH, Inffeldgasse 21b, 8010 Graz, Austria, +43 5 02378-9455, christa.dissauer@best-research.eu, <https://best-research.eu>

²TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Energy Economics Group (TU Wien – EEG), wissenschaftlicher Partner, Gußhausstraße 25 -29 / E370-03, 1040 Wien, <https://eeg.tuwien.ac.at>

³Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald (BFW), wissenschaftlicher Partner, Seckendorff-Gudent Weg 8, 1131 Wien, <https://www.bfw.gv.at>

Kurzfassung:

Biomasse ist der wichtigste heimische erneuerbare Energieträger in Österreich und kann den Übergang zu einem kohlenstoffarmen Energie- und Wirtschaftssystem unterstützen. Die Fähigkeit von biogenen Energieträgern fossile Brennstoffe in der bestehenden Infrastruktur zu ersetzen sowie die Vielfalt der Endnutzungsmöglichkeiten (z.B. für Strom, Wärme und Kraftstoffe für den Verkehr) machen Biomasse zu einer attraktiven und national sowie regional verfügbaren Energieressource, die auf dem Weg der Dekarbonisierung vielseitig eingesetzt werden kann. Neben der Substitution fossiler Brennstoffe und der damit verbundenen Reduzierung der Treibhausgasemissionen können Bioenergie- und Biokraftstoffanlagen als punktuelle Quellen von biogenem CO₂ für die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung oder -nutzung dienen und bieten in bestimmten Fällen sogar die Möglichkeit netto-negative CO₂-Emissionen zu erzielen. Darüber hinaus können biogene Energieträger gut gespeichert werden und somit zur Resilienz von erneuerbaren Energiesystemen beitragen. Allerdings kann es bei der Nutzung von Bioenergie auch zu Zielkonflikten kommen, z. B. hinsichtlich der Nahrungsmittelproduktion und der Biodiversität. Diesen kann durch ein gutes Management auf ökologisch und sozial nachhaltige Weise entgegengewirkt werden. Aufgrund dessen muss die künftige Rolle der energetischen Nutzung von Biomasse als Maßnahme zum Klimaschutz und zur Dekarbonisierung des Energiesystems eingehend evaluiert werden, um die effizientesten und nachhaltigsten Nutzungspfade für Biomasse bzw. Bioenergie zu ermitteln.

Da Biomasse und deren Anbaufläche begrenzte Ressourcen sind, ist eine effiziente und nachhaltige Nutzung dieser Ressourcen somit unerlässlich. Leider bietet die europäische Politik hierfür nur wenig Orientierung. Von denselben Flächen werden Leistungen für die Gesellschaft erwartet, die nicht leicht miteinander in Einklang zu bringen sind. Gleichzeitig werden mögliche Synergien und Kompromisse nur unzureichend berücksichtigt. Forschungsvorhaben wie das BIOSTRAT Projekt sind erforderlich, um die inhärente Mehrdeutigkeit politischer Ziele zu beleuchten und zu einer Lösung beizutragen.

Keywords: Bioenergie, Dekarbonisierung, Holzbiomasse, Energiewende

1 Einleitung

Energieträger auf Basis von Biomasse können bis 2050 sowohl in Österreich als auch in Europa insgesamt eine vielversprechende zusätzliche Energiemenge liefern. Bioenergie kann dabei fossile Energieträger ersetzen und so energiebedingte Treibhausgasemissionen (THG) reduzieren. Dabei müssen die Beschränkungen der Ressourcenverfügbarkeit sorgfältig überwacht werden, um negative Auswirkungen auf die Integrität des Ökosystems einschließlich der Artenvielfalt zu vermeiden. Biomasse – eine begrenzte Ressource – sollte mit Bedacht genutzt werden. Es ist wichtig, die Mobilisierung von Biomasse sorgfältig zu verwalten, um die Umwelt zu schützen. Es gibt Möglichkeiten, Wälder und Agrarlandschaften nachhaltig zu bewirtschaften, sodass sie Biomasse für Bioenergie liefern, um Treibhausgasemissionen zu reduzieren und gleichzeitig die Artenvielfalt sowie Kohlenstoffsenken zu erhalten oder sogar zu verbessern.

In Österreich nimmt die Nutzung von Holzbiomasse eine bedeutende Rolle ein. Österreich ist weltweit der zweitgrößte Importeur von Rundholz. Holz aus dem Wald wird vorwiegend zur Produktion von Holzprodukten genutzt. In einem sekundären Strom wird es zur Erzeugung von Strom, Wärme, Kühlung, zur Herstellung von Biokraftstoffen und zukünftig als Zwischenspeicher für Bioenergie (z.B. erneuerbares Gas) verwendet. Im Rahmen der Kaskadennutzung von Holz und Holzprodukten fallen pro Jahr ca. 25,5 Mio. Festmeteräquivalente an, die zur Energieerzeugung genutzt werden (Abbildung 1).

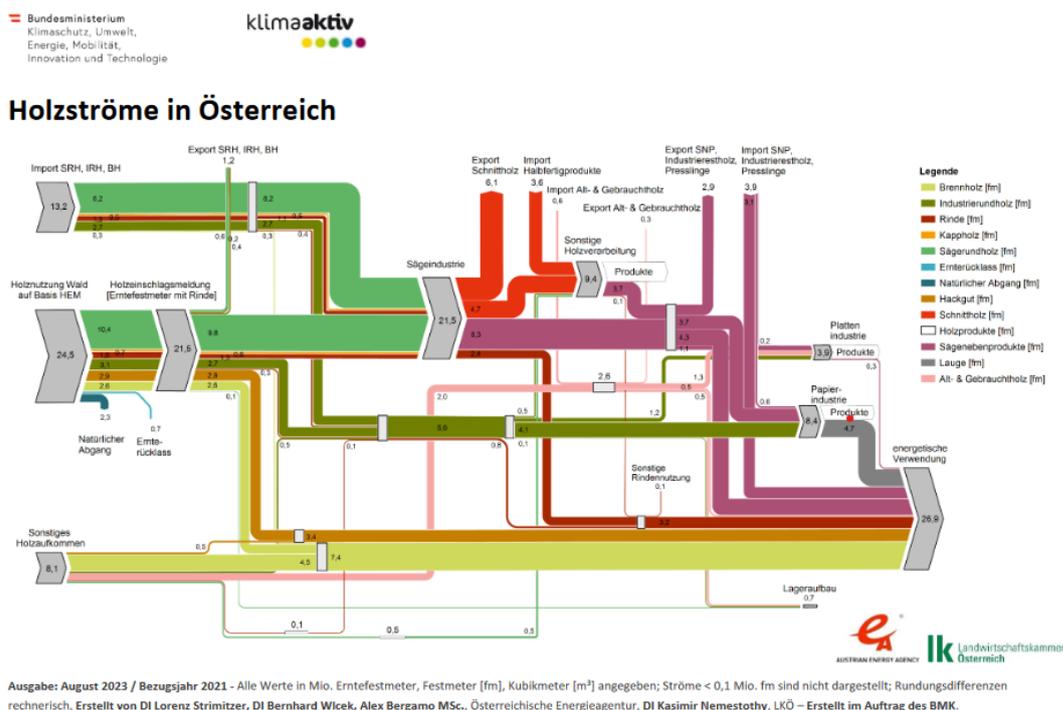


Abbildung 1: Holzströme in Österreich mit dem Referenzjahr 2021 (Strimitzer et al. 2023a)

Energie aus Holzbiomasse ist in Österreich aus mehreren Gründen gut verfügbar: (i) Der Holzvorrat in Wäldern nimmt seit mehr als 60 Jahren zu, da die jährliche Wachstumsrate die Ernterate übersteigt, (ii) Teile von Bäumen (z.B. Baumkronen, Äste etc.) sind aus Qualitätsgründen derzeit nicht für eine stoffliche Nutzung geeignet, (iii) einige Baumarten

werden aufgrund der Qualität hauptsächlich in Form von Brennholz genutzt (z. B. 70 % der geernteten Biomasse der Rotbuche ist Brennholz, und nur 30 % werden für Holzprodukte verwendet), und (iv) einige kleinbäuerliche Forstwirte produzieren hauptsächlich Brennholz, um ihren eigenen Energiebedarf (Lebensunterhalt) zu decken.

Um jedoch eine langfristige und nachhaltige Verfügbarkeit von Biomasse zu gewährleisten, muss die Nutzung des vorhandenen und des zusätzlich in Zukunft verfügbaren Biomassepotenzials im Hinblick auf die Minimierung der Kohlenstoffemissionen und der Kosten optimiert werden. Wie stark die Kohlenstoffemissionen dabei reduziert werden können, hängt jedoch von dem jeweiligen Nutzungspfad ab. Daher ist das Kernziel des BIOSTRAT Projektes, ausgehend von den historischen und aktuellen Potenzial- und Kosten-/Preisentwicklungen, solche optimalen Biomassenutzungspfade bis zum Jahr 2050 zu identifizieren. Dabei werden insbesondere die folgenden Intentionen verfolgt:

- Identifizierung bereits vorhandener und nachhaltig erschließbarer zusätzlicher Holzbiomassepotenziale, basierend auf Daten der Österreichischen Waldinventur, primärseitig bis 2050.
- Durchführung einer gesamtwirtschaftlichen Bewertung von ausgewählten Bioenergie-Umwandlungsketten auf nationaler Ebene, um optimierte Nutzungspfade im Hinblick auf die Kosten (intern/extern) zu ermitteln.
- Berechnung der Treibhausgasemissionen ausgewählter Bioenergieträger auf der Grundlage einer umfassenden Ökobilanz, die auch die eingebetteten Emissionen in der gesamten Kette berücksichtigt.
- Eine Kernfrage ist, welche Energieträger bevorzugt aus den verfügbaren primären Biomasseressourcen hergestellt werden sollten - z. B. Pellets, Hackschnitzel oder Biokraftstoff? - und in welchen Sektoren - Heizung vs. Verkehr vs. Strom- (und Fernwärme-) Erzeugung - sie eingesetzt werden sollten.

Das BIOSTRAT Projekt wird im Rahmen des 15. Call des ACRP gefördert und läuft von September 2023 bis August 2025. Im Folgenden wird zuerst der methodische Ansatz erläutert, um dann näher auf die ersten Projektergebnisse hinsichtlich dem Holzbiomasseaufkommen und -entwicklung in Österreich einzugehen. Zum Schluss wird ein Ausblick auf die weiteren Projektergebnisse gegeben.

2 Methode

Basierend auf einem Simulationsmodell werden dynamische Szenarien bis zum Jahr 2050 erstellt, um hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte optimale Biomassenutzungspfade zu identifizieren. Zur wirtschaftlichen Bewertung werden dabei die Gesamtkosten der einzelnen Bioenergieträger untereinander sowie mit konventionellen Energieträgern verglichen. Zur Analyse der Kohlenstoffbilanzen der betrachteten Bioenergieträger werden Ökobilanzen für die ausgewählten Pfade durchgeführt.

Das Simulationsmodell umfasst:

- Statistiken: Dokumentation der historischen Entwicklung aller für Österreich relevanten biomassebasierten Primärressourcen und abgeleiteten Energieträger auf jährlicher Basis

- Analyse bestehender und möglicher zukünftiger Biomassepotenziale
- Energie- und Primärrohstoffmengen sowie entsprechende CO₂-Emissionen
- Berechnung der CO₂-Emissionen und der Gesamtenergieflüsse der betrachteten Bioenergiepfade
- Technische Kennzahlen wie Erträge und Umwandlungswirkungsgrade
- Analyse der Wirtschaftlichkeit von biomassebasierten Energieträgern in Abhängigkeit von der Entwicklung fossiler Energieträger unter Berücksichtigung des technologischen Lernens
- Ökonomische Parameter: Investitionskosten der Konversionstechnologien, Kosten der Primärquellen, Preise der Energieträger (siehe Beispiel in Abbildung 7)

3 Holzbiomasse in Österreich

3.1 Holzbiomasseaufkommen

Seit 1961 werden im Rahmen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) der Zustand sowie Veränderungen im österreichischen Wald erhoben. Die ÖWI wird in regelmäßigen Abständen durchgeführt, wobei die letzte Erhebungsperiode den Zeitraum 2016/21 umfasst. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die Entwicklungen seit der Erhebungsperiode 1992/96. Demzufolge hat der Holzvorrat seit 1992/96 konstant zugenommen und ist von 990 Mio. Vfm (Vorratsfestmeter) auf ca. 1,2 Mrd. Vfm in 2016/21 gewachsen. Da die jährliche Nutzung allerdings von 19,5 Mio. Vfm auf 26 Mio. Vfm pro Jahr gestiegen ist, hat sich der ungenutzte Zuwachs von rund 8 Mio. Vfm auf rund 3 Mio. Vfm reduziert. Insgesamt wird nichtsdestotrotz jährlich weniger Holz geerntet als nachwächst, was laut Definition der Forstwirtschaft einer nachhaltigen Holznutzung entspricht. Die Holzvorräte der einzelnen Bezirke sind in Abbildung 3 gesamt sowie in Nadel- und Laubholz unterteilt dargestellt.

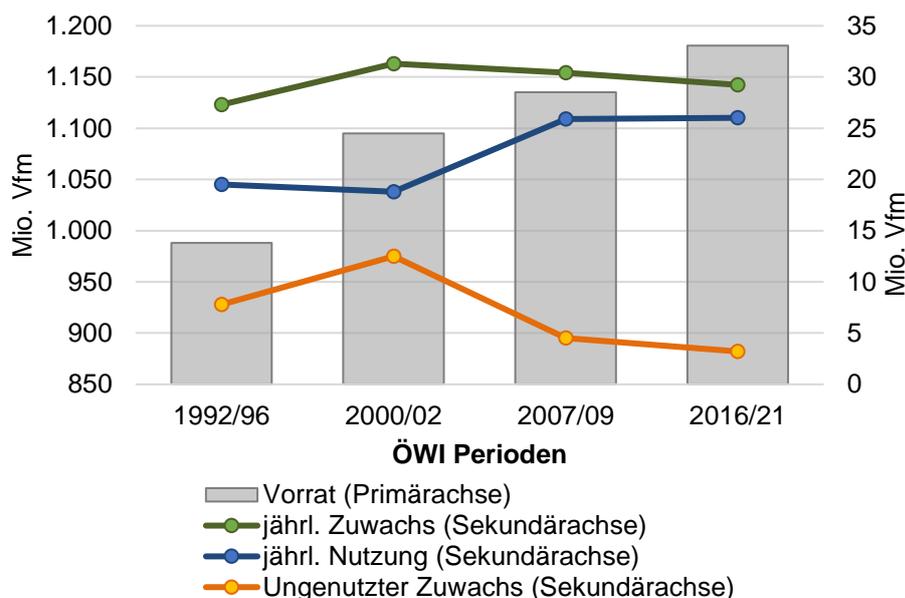
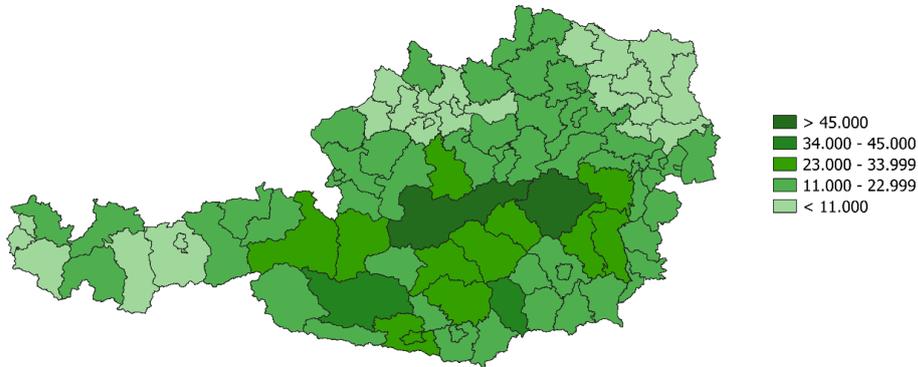
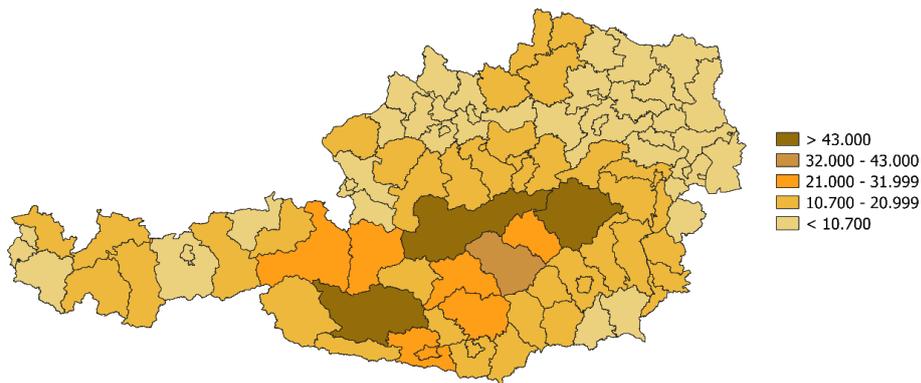


Abbildung 2: Entwicklung des gesamten Holzvorrates im österreichischen Wald, jährlichem Zuwachs, jährlicher Nutzung und daraus resultierendem ungenutztem Zuwachs in Mio. Vfm (Daten: Österreichische Waldinventur)

Holzvorrat auf Bezirksebene in 1.000 Vfm



Nadelholz Vorrat auf Bezirksebene in 1.000 Vfm



Laubholz Vorrat auf Bezirksebene in 1.000 Vfm

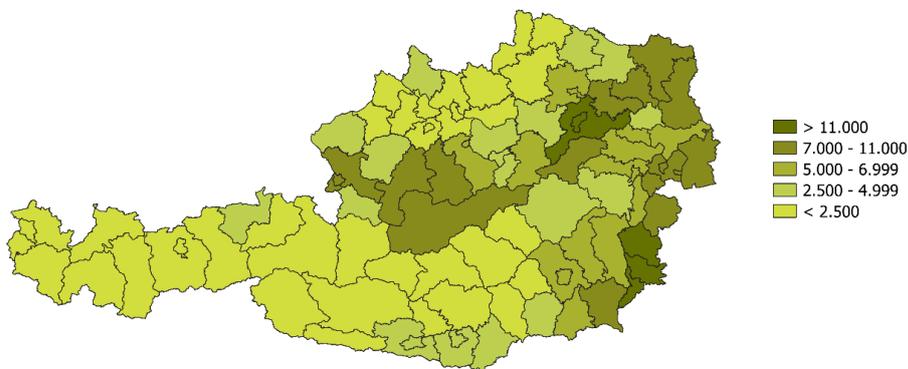


Abbildung 3: Holzvorrat gesamt (oben), sowie unterteilt in Nadelholz (Mitte) und Laubholz (unten) auf Basis der Bezirksforstinspektionen (Eigene Darstellung auf Basis der Österreichischen Waldinventur)

Ein genauerer Einblick in die Entwicklung der jährlichen Nutzung ab 2006 ist in Abbildung 4 gegeben, welche die Daten der jährlichen Holzeinschlagsmeldung (HEM) darstellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich der jährliche Holzeinschlag seither zwischen ca. 17 und 22 Mio. Efm (Erntefestmeter, entspricht 1 m³ geerntetem Holz abzüglich Rinde und Ernteverluste) bewegt. Der Anteil an Nadelholz liegt konstant über 80%. Auffällig sind allerdings die Schwankungen der Schadholzmengen, die vor allem in den Jahren 2007/08 sowie 2018-2020 beachtliche Anteile am Gesamteinschlag ausgemacht haben (bis über 60%). Diese Schadholzmengen sind auf Sturmereignisse und Borkenkäferkalamitäten zurückzuführen. Daneben ist aber zu erkennen, dass der energetisch genutzte Anteil der Einschlagsmengen über die Jahre relativ konstant war. Daraus kann abgeleitet werden, dass anfallende Schadholzmengen nicht zwingend energetisch genutzt werden.

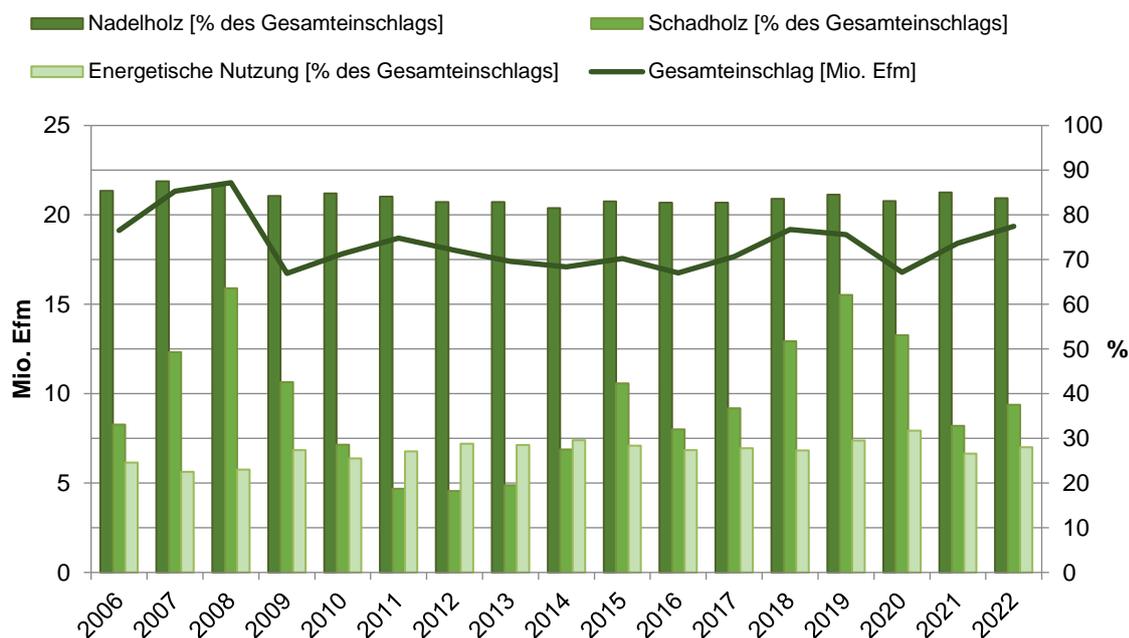


Abbildung 4: Entwicklung des jährlichen österreichischen Holzeinschlags in Mio. Efm sowie prozentueller Anteil von Nadelholz, Schadholz und Holz für die energetische Nutzung am Gesamteinschlag (Daten: Holzeinschlagsmeldung 2006 – 2022)

Der Nadelholzanteil der eingeschlagenen Holzmengen ist in Abbildung 5 und Abbildung 6 jeweils für die stoffliche und energetische Nutzung dargestellt. Während fast ausschließlich Nadelholz in die stoffliche Nutzung fließt, verteilt sich der Einschlag für die energetische Nutzung auf ca. 60% Nadelholz und 40% Laubholz.



Abbildung 5: Anteil an Nadel- und Laubholz Österreichischen Holzeinschlag für die stoffliche Nutzung in Mio. Efm o.R. (Daten: Holzeinschlagsmeldung 2008-2022)

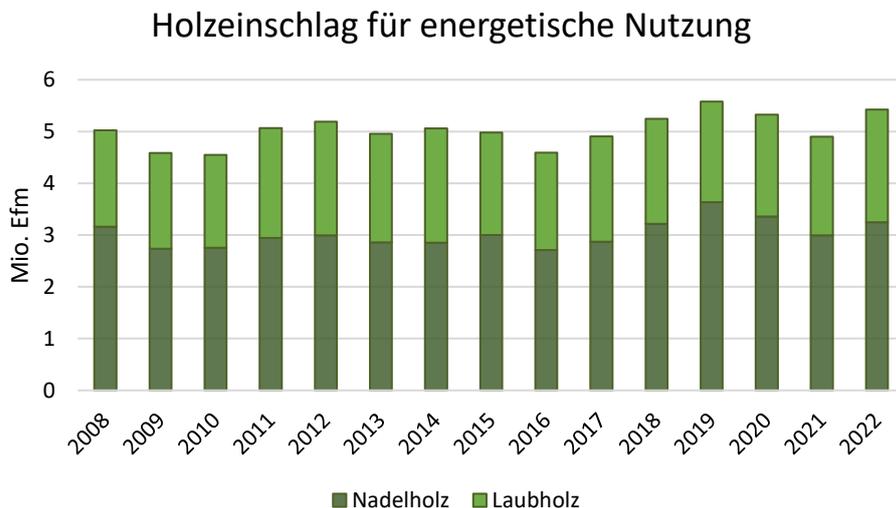


Abbildung 6: Anteil an Nadel- und Laubholz am Österreichischen Holzeinschlag für die energetische Nutzung in Mio. Efm o.R. (Daten: Holzeinschlagsmeldung 2008-2022)

3.2 Auswirkungen des Klimawandels auf das Ökosystem Wald

Aufgrund der Komplexität der Waldökosysteme sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wälder schwerer einzuschätzen als bei Nutzpflanzen. Während sich der Klimawandel auf einzelne Bäume in vorhersehbarer Weise auswirken kann, ist die Reaktion der Wälder komplex und vielschichtig. Mehrere Faktoren liegen möglichen Schwankungen der Waldbiomasse unter dem Einfluss des Klimawandels zugrunde, darunter die Auswirkungen auf das Baumwachstum, die Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und Kalamitäten und mögliche Verschiebungen in der Artenzusammensetzung (EEA, 2023).

3.2.1 Wie sich der Klimawandel auf das Baumwachstum auswirkt

Die Lufttemperatur treibt das Wachstum der Bäume an. In Europa dürfte der allgemeine Temperaturanstieg die Vegetationsperiode verlängern und damit die Produktivität der Wälder erhöhen. Bleiben die tatsächlichen Niederschlagstrends jedoch unverändert, könnte der erwartete Temperaturanstieg die Verluste durch Evapotranspiration erhöhen und zu häufigeren Perioden mit geringer Wasserverfügbarkeit führen (Ruosteenoja et al., 2018). Daher ist es sehr wichtig, das Zusammenspiel zwischen wärmeren Temperaturen und der Wasserverfügbarkeit zu berücksichtigen, wenn es darum geht, wie sich der Klimawandel auf die Waldbiomasse insgesamt auswirkt. Studien haben auch gezeigt, dass der Zeitpunkt der Niederschläge für die Verfügbarkeit von Wasser für die Vegetation wichtiger sein kann als die Gesamtmenge der Niederschläge (Ruiz-Pérez und Vico, 2020).

Der CO₂-Düngungseffekt, bei dem ein Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre die Produktivität erhöht, gilt auch für Wälder. Das Ausmaß und die Dauerhaftigkeit des Effekts der CO₂-Düngung auf das Wachstum der Biomasse sind jedoch umstritten. Norby et al. (2005) wiesen nach, dass die Auswirkungen bei verschiedenen Produktivitätsniveaus in Wäldern der gemäßigten Zonen anhalten und wiesen auf eine durchschnittliche Produktivitätssteigerung von 23 % bei einem Anstieg des CO₂-Gehalts um 180 ppm. Reyer et al. (2014) stellten fest, dass die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Produktivität fast vollständig durch CO₂-Düngung kompensiert werden, wenn diese dauerhaft erfolgt. Es ist erwähnenswert, dass die Wirkung der CO₂-Düngung durch eine geringe Nährstoffverfügbarkeit in einigen Waldökosystemen (bekannt als progressive Stickstofflimitierung) überdeckt werden kann (Craine et al., 2018). In einer anderen Studie wurde experimentell nachgewiesen, dass die CO₂-Düngung bei fehlender Nährstofflimitierung die Produktivität einiger Baumarten erhöht, aber dieser Effekt kann mit der Zeit abnehmen (Sperlich et al., 2020). Möglich ist, dass sich die Bäume an den CO₂-Effekt gewöhnen und die positiven Auswirkungen auf die Produktivität nachlassen. Dies führt zu erheblichen Unsicherheiten in Bezug auf die Gesamtauswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum. Daher kann man davon ausgehen, dass bis zum Ende des Jahrhunderts die Produktivität unter der Annahme eines gleichbleibenden CO₂-Niveaus überall in Europa (mit Ausnahme einiger südlicher Regionen, die unter starkem Trockenstress leiden) weiter ansteigt. Diese nimmt aber ab, wenn sich die Wälder an den CO₂-Effekt gewöhnen.

Wenn man jedoch verstehen will, wie sich der Klimawandel auf die Wälder insgesamt auswirkt, müssen neben den langfristigen Veränderungen der grundlegenden Klimaparameter auch die Auswirkungen von Kalamitäten berücksichtigt werden.

Parallel zum Anstieg der Gesamtproduktivität der europäischen Wälder im 20. Jahrhundert haben auch die Schäden Kalamitäten zugenommen. Die Produktivität der Wälder steht in Wechselwirkung mit den Kalamitäten, da Wälder in bestimmten Wachstumsstadien anfälliger für Ereignisse wie Sturmschäden oder Borkenkäferbefall sein können. Kalamitäten können direkt (Windgeschwindigkeit, Sturmintensität usw.) oder indirekt (höhere Temperaturen, die zu Borkenkäferausbrüchen führen, erhöhte Anfälligkeit für Windschäden aufgrund des Auftauens gefrorener Böden usw.) vom Klimawandel beeinflusst werden. Es ist davon auszugehen, dass die mit dem Klimawandel verbundenen Kalamitäten weiter zunehmen werden und so die Produktivitätsgewinne verringern bzw. die Produktivitätsverluste in ganz Europa verschärfen werden (Reyer et al., 2017). Darüber hinaus werden künftige Kalamitäten wahrscheinlich in

Nadelwäldern am stärksten ausgeprägt sein (Seidl et al., 2017). In Westeuropa wird eine erhebliche Zunahme der Feueraktivität erwartet, die durch statische Niederschlagstrends in Kombination mit einem starken Temperaturanstieg angetrieben wird (Kim et al., 2017).

3.2.2 Wie der Klimawandel die Baumartenzusammensetzung beeinflussen wird

Klimabedingte Produktivitätsveränderungen werden sich auf der Ebene der einzelnen Arten unterschiedlich auswirken. Im Allgemeinen gelten Fichte und Kiefer als "verlierende" Baumarten, da sie nur eine geringe Trockentoleranz aufweisen und sich die besiedelten Gebiete bereits weit nach Norden erstrecken, so dass die Möglichkeit einer weiteren Migration begrenzt ist (Reyer et al., 2017). Obwohl in Südeuropa ein Rückgang der Buche beobachtet wurde, halten einige Studien die Buche für resistent gegen die Auswirkungen des Klimawandels in Mitteleuropa (Dyderski et al., 2018). Die Eiche hingegen hat sich in mehreren Studien als widerstandsfähig gegenüber dem Klimawandel erwiesen.

3.3 Historische Preisentwicklung von Holzbiomassesortimenten

In Abbildung 7 wird die historische Preisentwicklung ausgewählter Holzbiomassesortimente dargestellt. Für alle Sortimente ist ab Ende 2021/Anfang 2022 ein deutlicher Preisanstieg zu beobachten (am stärksten bei den Holzpellets), der im Jahr 2023 wieder zurück geht. Die Preise bleiben aber bei den vorwiegend energetisch genutzten Sortimenten trotzdem auf einem höheren Niveau als vor der „Energiekrise“.

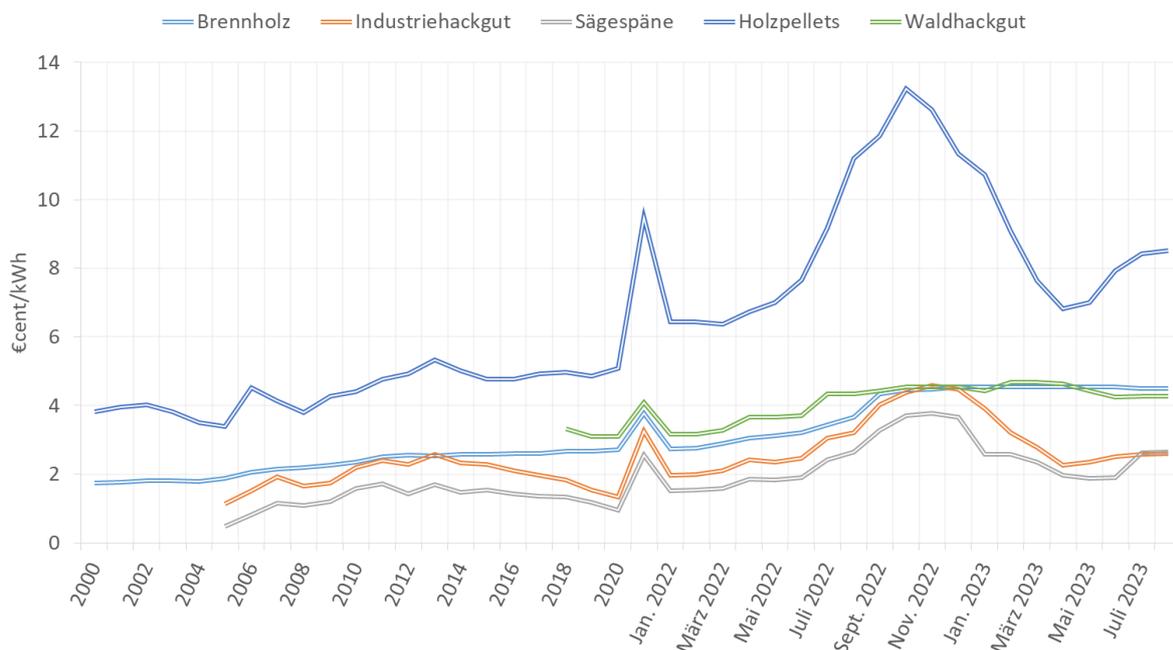


Abbildung 7: Historische Entwicklung der Biomassepreise in €/cent/kWh. Quelle: Eigene Darstellung.

4 Ausblick

Für die wirtschaftliche und ökonomische Betrachtung wurden die in Tabelle 1 dargestellte Nutzungspfade ausgewählt.

Tabelle 1: Ausgewählte Nutzungspfade

Biomasse	Raumwärme	Fernwärme	Hochtemperaturwärme	Strom	Bio-SNG	Fischer-Tropsch Diesel	Biogas Strom	Biogas Methan
Brennholz	x							
Waldhackgut	x	x	x	x	x			
Sägenebenprodukte		x	x	x	x			
Rinde		x	x	x	x	x		
Pellets	x	x	x	x				
Kurzumtriebsholz		x	x	x	x			
Energiegräser			x	x				
Wirtschaftsdünger							x	x
Bioabfälle							x	x
Klärschlamm					x		x	x
Abfälle aus der Papierindustrie					x	x		
Altholz		x	x	x	x	x		

Die Ergebnisse des BIOSTRAT Projektes werden zu Strategien für politische Akteure aufbereitet, um den Klimawandel durch die Dekarbonisierung des Energiesystems zu bekämpfen und gleichzeitig eine nachhaltige Nutzung von Biomasse zu gewährleisten. Denn politische Entscheidungsträger spielen eine entscheidende Rolle bei der Erleichterung der Energiewende, indem sie ihr Priorität einräumen, Märkte für nachhaltige, kohlenstoffarme Technologien schaffen sowie Forschung und Entwicklung fördern.

Die wichtigsten erwarteten Ergebnisse bis Projektende sind:

- dynamische Szenarien bis 2050 in denen
 - die wirtschaftliche Bewertung von Energieträgern inkl. CO₂ Kosten,
 - die bevorzugten Einsatzbereiche für Bioenergieträger anhand der Biomassepotentiale, und
 - die bevorzugten Einsatzbereiche für Bioenergieträger anhand der Kosten sowie möglichen Emissionseinsparungen berücksichtigt werden sowie
- Politikstrategien, um das Szenario mit der optimalen Lösung für die Gesellschaft schrittweise umzusetzen, was eine Minimierung der Kosten sowie der Treibhausgasemissionen bedeuten würde.

Referenzen

BML (2023): Holzeinschlagsmeldung über das Kalenderjahr 2022. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. Online verfügbar: <https://info.bml.gv.at/dam/jcr:31024149-0f7a-45d8-bfb4-add65900c0cd/Brosch%C3%BCre%20HEM.pdf> (20.11.2023)

Craine, J. M., et al., 2018, 'Isotopic evidence for oligotrophication of terrestrial ecosystems', *Nature Ecology & Evolution* 2(11), pp. 1735-1744 (DOI: 10.1038/s41559-018-0694-0).

Dyderski, M. K., et al., 2018, 'How much does climate change threaten European forest tree species distributions?', *Global Change Biology* 24(3), pp. 1150-1163 (DOI: 10.1111/gcb.13925).

EEA (European Energy Agency) (2023): The European Biomass Puzzle, Report No 08/2023, Permalink: [14f498a6aa704e4791cc61b97a2d6f43](https://www.eea.europa.eu/en/press-communications/press-releases/2023/08-2023-01).

Kim, J. B., et al., 2017, 'Assessing climate change impacts, benefits of mitigation, and uncertainties on major global forest regions under multiple socioeconomic and emissions scenarios', *Environmental Research Letters* 12(4), 045001 (DOI: 10.1088/1748-9326/aa63fc).

Norby, R. J., et al., 2005, 'Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 102(50), pp. 18052-18056 (DOI: 10.1073/pnas.0509478102).

Reyer, C., et al., 2014, 'Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide', *Annals of Forest Science* 71(2), pp. 211-225.

Reyer, C., et al., 2017, 'Are forest disturbances amplifying or canceling out climate change-induced productivity changes in European forests?', *Environmental Research Letters* 12, 034027 (DOI: 10.1088/1748-9326/aa5ef1).

Ruiz-Pérez, G. and Vico, G., 2020, 'Effects of temperature and water availability on northern European boreal forests', *Frontiers in Forests and Global Change* 3, 34 (DOI: 10.3389/ffgc.2020.00034).

Ruosteenoja, K., et al., 2018, 'Seasonal soil moisture and drought occurrence in Europe in CMIP5 projections for the 21st century', *Climate Dynamics* 50(3-4), pp. 1177-1192 (DOI: 10.1007/s00382-017-3671-4).

Seidl, R., et al., 2017, 'Forest disturbances under climate change', *Nature Climate Change* 7(6), pp. 395-402 (DOI: 10.1038/nclimate3303).

Sperlich, D., et al., 2020, 'Gains or losses in forest productivity under climate change? The uncertainty of CO₂ fertilization and climate effects', *Climate* 8(12), 141 (DOI: 10.3390/cli8120141).

Strimitzer, L.; Wlcek, B.; Bergamo, A.; Nemestothy, K. (2023a): Holzströme in Österreich. Online verfügbar: https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:e2efadef-ab3b-4b7c-8b28-60b058f22b35/Holzstr%C3%B6me_%C3%96sterreich_2021_2023%2018%2008.pdf (20.11.2023)