



ExtraValBois: Geschäftsmodelle zur Extraktion und Valorisation von Holzinhaltsstoffen aus Schweizer Holz

Forschungsprojekt unterstützt durch den Aktionsplan Holz,
Bundesamt für Umwelt BAFU

Schlussbericht der Berner Fachhochschule BFH
Institut für Werkstoffe und Holztechnologie IWH
Institut für digitale Holz- und Bauwirtschaft IdHB

Biel, Dezember 2019

Impressum

Fördergeber

Bundesamt für Umwelt BAFU

Aktionsplan Holz

Dr. Ulrike Krafft

CH-3003 Bern

Forschungsinstitut

Berner Fachhochschule BFH

Institut für Werkstoffe und Holztechnologie IWH

Solothurnstrasse 102, CH-2504 Biel, Tel +41 (0)32 344 03 39

www.ahb.bfh.ch

Projektverantwortlicher und Projektleiter

Ingo Mayer, Dr. rer. nat., Dipl.-Holzwirt, Leiter Zentrum Holz – Ressource und Werkstoff,

Leiter Kompetenzbereich Polymer- und Holzchemie, Berner Fachhochschule BFH

Projektmitarbeiter/innen Berner Fachhochschule BFH

Nadja Riedweg, BSc Holztechnik, CAS Marketing Communication; Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Institut für digitale Bau- und Holzwirtschaft IdHB

Ellen Halaburt, M.Sc., Assistentin Kompetenzbereich Materialemissionen und Extraktstoffe

Birgit Neubauer-Letsch, Diplom-Betriebswirtin (FH), Leiterin Kompetenzbereich Management und
Marktforschung (bis 31.7.2019), Institut für digitale Bau- und Holzwirtschaft IdHB

Wirtschaftspartner

La Forestière, D. Borboën, Route de la Chocolatière 26, CH-1026 Echandens

Lignum-Jura bernois, C. Gassmann, P.-Charmillot, CH-2610 St-Imier

Abstract

Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit spielen eine zunehmend **wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Produkte**. Verbraucherinnen und Verbraucher legen einerseits Wert auf Regionalität und Umweltverträglichkeit, andererseits wird der Einsatz von chemischen Produktzusätzen immer strenger reglementiert. Vor diesem Hintergrund bietet der Einsatz von Inhaltsstoffen aus Schweizer Holz eine interessante Lösung: regionale Produktion und die Nutzung von Reststoffen sind nachhaltig, umweltverträglich und entsprechen der aktuellen Nachfrage der Verbraucherinnen und Verbraucher.

Verschiedene Holzinhaltstoffe werden bereits industriell in einem eigenständigen Extraktionsprozess gewonnen und werden mit stabilen Absätzen und Erlösen in etablierten Zielmärkten vermarktet. Für die in der Schweiz heimischen Holzarten liegen jedoch noch **keine einheitlich erhobenen und damit vergleichbaren Daten zur möglichen Extraktionsausbeute und Zusammensetzung der Inhaltsstoffe vor**, und auch zur Diskussion möglicher Geschäftsmodelle fehlen die nötigen Datengrundlagen. Eine Erweiterung der Wertschöpfungskette in der Schweiz im Sinne der Kaskadennutzung der Ressource Holz erscheint jedoch interessant, wenn in einer regionalen und Cluster-basierten Zusammenarbeit innovative Produkte mit ökonomischem und ökologischem Mehrwert entstehen.

Die Hauptziele dieses Projekts bestehen folglich in der Bereitstellung:

- ▶ des aktuellen Stands des Wissens zur Zusammensetzung und Nutzung von Holzinhaltstoffen.
- ▶ von quantitativen Daten zur Verfügbarkeit relevanter Reststoffe aus der heimischen Forst- und Sägeindustrie und daraus extrahierbaren Inhaltsstoffen.
- ▶ von einer Skizzierung möglicher Geschäftsmodelle.

Die Analyse zeigt, dass mögliche Rohstoffe für die Extraktion in der Schweiz in grossen Mengen vorhanden sind. Bei der Holzernte im Jahr 2017 fielen in der Schweiz circa 506'300 Fm Industrieholz, 1'801'000 Fm Energieholz und circa 357'000 m³ Rinde sowie zusätzliche circa 695'600 m³ Restholz in Sägereien an. Diese Sortimente kommen grundsätzlich für eine Extraktion in Frage.

Die stoffliche Charakterisierung der Inhaltsstoffe der in der Schweiz vorhandenen Sortimente weist auf einzelne Holzarten hin, die im Hinblick auf die Ausbeute bei der Extraktion, die stoffliche Zusammensetzung der Extrakte sowie das Rohstoff-Vorkommen besonders geeignet erscheinen. Von Bedeutung sind insbesondere die phenolischen Verbindungen, welche mittels Heisswasserextraktion gewonnen werden können. Zu den interessanten Sortimenten zählen **Rinde von Fichte und Weisstanne sowie Holz von Eiche, Kastanie, Waldkiefer, Lärche und Arve**. Das Holz von Fichte, Weisstanne und Buche könnte wegen der anfallenden Mengen ebenfalls von Bedeutung sein, allerdings ist die Eignung dieser Extrakte für bestimmte Anwendungen weitestgehend unerforscht und bedarf weiterer Abklärung.

Für die Geschäftsmodellanalyse wurden vier beispielhafte Geschäftsmodelle genauer untersucht. Die Berechnungen zeigen insbesondere für die **Geschäftsmodelle «grosses Sägewerk», «Energieerzeugungsanlage» und «Extraktionsanlage»** ein grosses Potential. In Abhängigkeit der Art und Menge der zur Verfügung stehenden Rohstoffe kann von interessanten Margen ausgegangen werden. Grundsätzlich gilt für alle wahrscheinlichen Geschäftsmodelle, dass eine Extraktion von Holzinhaltstoffen ein zusätzlicher Schritt in etablierten Wertschöpfungsketten darstellen kann und keine Konkurrenzsituation mit etablierten Prozessen entstehen muss. Vielmehr stellt die Extraktion die Möglichkeit einer zusätzlichen Wertschöpfung dar.

Für manche Sortimente **fehlt allerdings die notwendige Datengrundlage** zur wirtschaftlichen Beurteilung und der Abschätzung des Vermarktungspotenzials der Extrakte. Grund hierfür ist, dass bislang keine Untersuchungen für stoffliche Anwendungen dieser Extrakte durchgeführt wurden und dadurch auch ihre Anwendungs- und Vermarktungspotentiale nicht seriös abgeschätzt werden können.

Für die weitere Entwicklung von Anwendungen der Extrakte bis hin zur Industriereife bedarf es neuer **Pilotanlageninfrastruktur**, die Extrakte aus Schweizer Holz in ausreichender Menge, unter geeigneten Prozessbedingungen und unter Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Konversionsschritte erzeugen kann. Eine solche Infrastruktur existiert innerhalb der Schweiz und der angrenzenden Nachbarländer noch nicht, würde jedoch einen massgeblichen Beitrag für die Absenkung der bestehenden Hürden auf dem Weg zu einer grossmassstäblichen Umsetzung von Extraktionsprozessen leisten können.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Einleitung | 6 |
| 1.1 | Ausgangslage & Zielsetzung | 6 |
| 1.2 | Aufbau des Berichts | 7 |
| 2 | Holzinhaltsstoffe, industrielle Gewinnung und Anwendungsgebiete | 8 |
| 2.1 | Inhaltsstoffe von Holz- und Rindenmatrix | 8 |
| 2.1.1 | Mono- und Polysaccharide | 10 |
| 2.1.2 | Terpene | 10 |
| 2.1.3 | Phenolische Verbindungen | 10 |
| 2.1.4 | Wachse und Fette | 11 |
| 2.2 | Industrielle Gewinnung und Anwendungsgebiete von Holzinhaltsstoffen | 12 |
| 2.2.1 | Terpene | 12 |
| 2.2.2 | Tannine | 13 |
| 2.3 | Extraktionsprozesse zur Erzeugung von Extrakten aus Holz und Rinde | 15 |
| 3 | Bestandsaufnahme Schweizer Holz | 16 |
| 3.1 | Holzvorrat in der Schweiz | 17 |
| 3.2 | Überblick Schweizer Bestand der Holzarten | 18 |
| 3.3 | Holzsortimente | 23 |
| 3.3.1 | Überblick Wertschöpfungskette | 23 |
| 3.3.2 | Detailbetrachtung der relevanten Materialflüsse und Sortimente | 25 |
| 3.3.3 | Saisonalität der Sortimente | 28 |
| 3.3.4 | Akteure und deren Angebot | 28 |
| 3.4 | Verfügbare Menge Schweizer Holz | 30 |
| 3.4.1 | Holzernte 2017 | 30 |
| 3.4.2 | Rundholzeinschnitt Sägereien | 35 |
| 3.5 | Zwischenfazit | 39 |
| 4 | Charakterisierung der Extrakte aus heimischer forstlicher Biomasse | 40 |
| 4.1 | Methodik | 40 |
| 4.1.1 | Rohstoffe | 40 |
| 4.1.2 | Extraktion | 41 |
| 4.1.3 | Chemische Charakterisierung | 41 |
| 4.2 | Ergebnisse | 41 |
| 4.2.1 | Gesamtausbeute | 41 |
| 4.2.2 | Extraktausbeute einzelner Stoffgruppen | 42 |
| 4.2.3 | Monoterpen | 43 |
| 4.2.4 | Fettsäuren | 43 |
| 4.2.5 | Harzsäuren | 44 |

| | |
|--|----|
| 4.2.6 Phenolische Verbindungen | 44 |
| 4.3 Schlussfolgerung | 45 |
| 5 Geschäftsmodelle | 46 |
| 5.1 Grundlagen für die Geschäftsmodellanalysen | 46 |
| 5.2 Geschäftsmodell «Grosses Sägewerk» | 49 |
| 5.3 Geschäftsmodell «Kleineres Sägewerk» | 51 |
| 5.4 Geschäftsmodell «Energieerzeugungsanlage» | 53 |
| 5.5 Geschäftsmodell «Extraktionsanlage» | 55 |
| 6 Fazit und Ausblick | 57 |
| 7 Abbildungsverzeichnis | 59 |
| 8 Diagrammverzeichnis | 60 |
| 9 Tabellenverzeichnis | 60 |
| 10 Literaturverzeichnis | 61 |
| Bestimmungen zum vorliegenden Bericht | 66 |

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage & Zielsetzung

Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit spielen eine zunehmend wichtige Rolle bei der Entwicklung neuer Produkte. Zum einen legen Verbraucherinnen und Verbraucher grossen Wert auf Regionalität und Umweltverträglichkeit, zum anderen wird der Einsatz von chemischen Produktzusätzen immer strenger reglementiert. Der Einsatz von Inhaltsstoffen aus Schweizer Holz bietet hierfür eine interessante Lösung: regionale Produktion und die Nutzung von Reststoffen sind nachhaltig, umweltverträglich und entsprechen der aktuellen Nachfrage der Verbraucherinnen und Verbraucher.

Der vorliegende Bericht untersucht die drei wesentlichen Grundlagen eines neuen Geschäftsmodells:

- ▶ Inhaltsstoffe verschiedener Holzarten und deren Anwendungen
- ▶ Ressourcensituation der Schweizer Holzwirtschaft
- ▶ Ausbeute an Holzinhaltstoffen bei Verarbeitung der verfügbaren heimischen Biomasse durch Extraktion

Aus Holz und Rinde kann eine Vielzahl von Inhaltsstoffen gewonnen werden, die für die industrielle Weiterverwertung interessant sind. Terpene, Tannine und weitere phenolische Verbindungen sind nur einige Beispiele dafür. Je nach Holzart variiert diese Zusammensetzung.

Für die in der Schweiz heimischen Holzarten liegen noch keine einheitlich erhobenen und damit vergleichbaren Daten zur möglichen Extraktionsbeute und Zusammensetzung der Inhaltsstoffe vor, und auch zur Diskussion möglicher Geschäftsmodelle fehlen die nötigen Datengrundlagen. Eine Erweiterung der Wertschöpfungskette in der Schweiz im Sinne der Kaskadennutzung der Ressource Holz erscheint jedoch interessant, wenn in einer regionalen und Cluster-basierten Zusammenarbeit innovative Produkte mit ökonomischem und ökologischem Mehrwert entstehen.

Die Hauptziele dieses Projekts bestehen in der Bereitstellung vom aktuellen Stand des Wissens zur Zusammensetzung und Nutzung von Holzinhaltstoffen, von quantitativen Daten zur Verfügbarkeit relevanter Reststoffe aus der heimischen Forst- und Sägeindustrie und daraus extrahierbaren Inhaltsstoffen sowie von einer Skizzierung möglicher Geschäftsmodelle. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Absenkung bestehender Hürden für die Realisierung einer industriellen Gewinnung und Nutzung von Holzinhaltstoffen aus Schweizer Holz geleistet werden. Hierfür werden folgende Projektetappen ausgeführt:

- ▶ Erstellung einer Übersicht zu den Inhaltsstoffen aus Holz- und Rindenmatrix und deren Markt- und Anwendungspotenzial im globalen Kontext.
- ▶ Ermittlung des in der Schweiz vorhandenen Roh- und Reststoffpotenzials und Evaluation respektive Abschätzung der räumlichen Verteilung der Roh- und Reststoffe.
- ▶ Bestimmung der Inhaltsstoffe, die aus heimischen Roh- und Reststoffen gewonnen werden können. Durchführung von Extraktionen im Labormassstab zur Gewinnung von Extrakten aus unterschiedlichen Reststoffen, die in der Wertschöpfungskette Schweizer Holz anfallen. Berücksichtigung der wichtigsten Nadel- und Laubholzarten in der Schweiz sowie dabei vorliegende Gewebetypen und Variation der Lösemittel. Quantifizierung und Qualifizierung der Inhaltsstoffe der Extrakte.
- ▶ Definition und ökonomische Beurteilung unterschiedlicher Geschäftsmodelle in Zusammenhang mit der Gewinnung und der stofflichen Verwertung von Inhaltsstoffen aus Schweizer Holz.

1.2 Aufbau des Berichts

Im Rahmen dieses Projekts wird eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Zum einen wird der aktuelle Wissenstand bezüglich der Holzinhaltstoffe sowie die derzeitige Markt- und Anwendungssituation zusammengefasst. Zum anderen wird das in der Schweiz vorhandene Roh- und Reststoffpotenzial bestimmt. Dazu wird auf der Basis bestehender Studien und Statistiken ermittelt, welche Reststoffsortimente relevant sind, und welche Mengen in welchen Regionen der Schweiz anfallen.

Parallel dazu wird eine Bestimmung der potentiellen Inhaltsstoffe durchgeführt, die aus heimischen Roh- und Reststoffen gewonnen werden können. Dabei werden Holzarten im Labormassstab extrahiert und die Ausbeute der Extraktion und stoffliche Zusammensetzung der Extrakte analysiert.

Die Erkenntnisse aus diesen Arbeitspaketen dienen dazu, mögliche Geschäftsmodelle für eine Extraktionsanlage in der Schweiz zu definieren und diese hinsichtlich ihrer Chancen und Risiken zu beurteilen.

Die Ergebnisse des Projekts werden im Rahmen von Fachveranstaltungen und Weiterbildungen breit kommuniziert. Insbesondere die Akteure der Wald- und Holzbranche sollen auf diese Möglichkeit zur Steigerung der Wertschöpfung aufmerksam gemacht werden. Zudem sollen weitere Branchen angesprochen werden, die die entsprechenden Extrakte zur weiteren Erzeugung von Zwischen- oder Endprodukten einsetzen könnten, beispielsweise die Baustoff-, Material-, Agrar-, Kosmetik- oder Lebensmittelbranche.



Abbildung 1 : Vorgehensweise im Projekt

2 Holz Inhaltsstoffe, industrielle Gewinnung und Anwendungsgebiete

Die Erweiterung der Wertschöpfungskette (im Sinne einer Kaskadennutzung der Ressource Holz) in der Schweiz setzt voraus, dass für die gewonnenen Extrakte Anwendungen in innovativen Produkten mit ausreichender Wertschöpfung zur Verfügung stehen. Nur dadurch kann ein Wettbewerbsvorteil gegenüber z.B. der preisgünstigen Massenproduktion von z.B. pflanzlichen Tanninen aus Harthölzern in Südamerika erreicht werden.

Neue Produkte mit einem hohen Mehrwert für die Anwender, z.B. durch die Möglichkeit kennzeichnungspflichtige, synthetische Biozide ersetzen können, spielen dabei eine Schlüsselrolle (Royer et al. 2012). Für eine systematische Darstellung der vielfältigen Chancen zur Nutzung von Holz Inhaltsstoffen aus vorhandener heimischer forstlicher Biomasse wird im Folgenden der aktuelle Wissensstand zusammengefasst.

Im ersten Abschnitt wird die chemische Zusammensetzung der bekannten Holz Inhaltsstoffe entsprechend ihrer Stoffgruppen erläutert. Die industrielle Gewinnung dieser Inhaltsstoffe und deren Anwendungsmöglichkeiten werden im zweiten Abschnitt näher betrachtet.

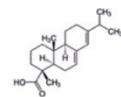
2.1 Inhaltsstoffe von Holz- und Rindenmatrix

Neben den Hauptbestandteilen Cellulose, Hemicellulose und Lignin enthält jede Holzart eine Vielzahl an weiteren Inhaltsstoffen (sogenannte sekundäre Inhaltsstoffe). Diese können grundsätzlich mit Hilfe unterschiedlicher Lösemittel (Wasser oder organische Lösemittel) aus dem Holz- und Rindengewebe herausgelöst (extrahiert) werden und werden aus diesem Grund auch als Extraktstoffe bezeichnet. Die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe ist für jede Holzart spezifisch und definiert wesentlich verschiedene Eigenschaften des Holzes dieser Art. Dies kommt unter anderem unmittelbar im charakteristischen Geruch und in der typischen Farbe jedes Holzes zum Ausdruck. Der Gehalt an Extraktstoffen innerhalb eines Baums und zwischen Bäumen im gleichen Bestand ist nicht einheitlich und kann auch je nach Alter der Bäume, Jahreszeit, Standort und Herkunft variieren (Routa et al., 2017). Die unterschiedliche Zusammensetzung bestimmt aber nicht nur viele der für eine bestimmte Art typischen Holzeigenschaften, sondern auch die Materialeigenschaften des Holzgewebes innerhalb des Stamms. Schon aufgrund der unterschiedlichen Funktionen für den Baum unterscheiden sich Rinde, Kern- und Splintholz in der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe (Eriksson et al. 2012, Hillis 1971, Zobel & van Buijtenen 1989, Hakkila and Verkasalo 2009)

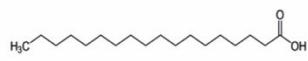
Die wichtigsten Stoffgruppen, Substanzen und Strukturformeln sind in Abbildung 2 beispielhaft aufgeführt. Diese umfassen unterschiedliche Stoffgruppen der organischen Chemie und lassen sich in Hinblick auf ihre Bedeutung für den Baum in Verbindungen für die Energiespeicherung (fettartige Verbindungen, Saccharide) und in Verbindungen mit Schutzfunktion für das Gewebe (Terpene, phenolische Verbindungen) unterteilen.



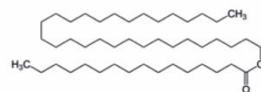
a | α -Pinen (Monoterpene)



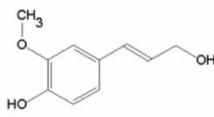
b | Abietinsäure (Harzsäuren, Diterpene)



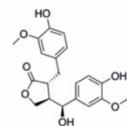
c | Stearinsäure (Fettsäuren)



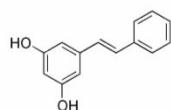
d | Palmitinsäure-Myricylester (Wachse)



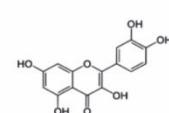
e | Coniferyl-Alkohol (einfache Phenole)



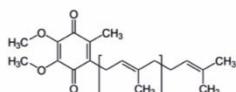
f | Hydroxymatairesinol (Lignane)



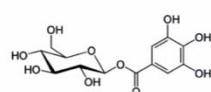
g | Pinosilvyn (Stilbene)



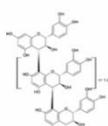
h | Quercetin (Flavonoide)



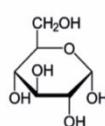
i | Ubichinon (Chinone)



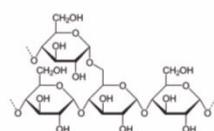
j | Glucogallin (hydrolyzable Tannine)



k | Kondensierte Tannine, beispielhafte Darstellung



l | Glucose (Monosaccharide)



m | Stärke (Ausschnitt, Polysaccharid)

Abbildung 2: Wichtige Stoffgruppen der Holzinhaltstoffe am Beispiel repräsentativer Einzelsubstanzen

Vorkommen, Zusammensetzung und Funktion einzelner Extraktstoffe des Baums werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.1.1 Mono- und Polysaccharide

Monosaccharide kommen im Holzgewebe als Inhaltsstoffe vor allem im Bereich des Cambiums und im Bereich lebender parenchymatischer Zellen im Splintgewebe des Holzes vor (z.B. Glucose, siehe Abbildung 2l). Darüber hinaus bilden einige Holzarten, z.B. die heimische Rotbuche, Stärke als hochmolekulares Polysaccharid ebenfalls in den Parenchymzellen des Splintholzgewebes.

Die im Holz enthaltenen Saccharide finden als Extraktstoffe bislang keine Beachtung, da dieselben Verbindungen in hoher Menge bei der Weiterverarbeitung diverser Einjahrespflanzen (z.B. Zuckerrüben, Mais, Kartoffeln) gewonnen werden und eine stoffliche Nutzung dieser Inhaltsstoffe des Holzes aus ökonomischen Gesichtspunkten als nicht rentabel erachtet wird.

2.1.2 Terpene

Terpene bilden das Baumharz der heimischen Nadelbäume und umfassen sogenannte Monoterpenen und Diterpenene (sog. Harzsäuren). Monoterpenen (aufgebaut aus zwei Isopren-Molekülen, siehe Abbildung 2 a) sind flüchtige Stoffe, die leicht an die Umgebungsluft abgegeben werden und sind für den charakteristischen Harzgeruch von Nadelholz verantwortlich. Diterpenen sind auf Grund ihrer grösseren Molmasse hingegen nicht flüchtig, leicht kristallisierbar, schwer wasserlöslich und bilden die bekannte ausgehärtete Harzsicht beim Wundverschluss der Nadelbäume. Die spezifische Zusammensetzung der Terpene im Harz der Nadelbäume ist oft charakteristisch für eine bestimmte Art. Deswegen wird die charakteristische Terpenzusammensetzung auch für die Chemotaxonomie eingesetzt (Hegnauer, 1994).

Terpene dienen im Allgemeinen dem antiseptischen Wundverschluss von Pflanzengeweben und dem Schutz vor Mikroorganismen indem sie als Pflanzenschutzstoffe u.a. biozid wirken (Ouyang et al. 2017). Terpene und verwandte Terpenoidverbindungen, die zu den meist verbreiteten natürlich vorkommenden Verbindungen gehören, werden häufig als Isoprenoid-Verbindungen bezeichnet, da alle auf dem Grundbaustein von Isopren (C_5H_8) aufbauen. Terpene sind im engeren Sinne flüchtige aromatische Kohlenwasserstoffe der Summenformel $C_{10}H_{16}$. Im weiteren Sinne gehören dazu Sesquiterpene ($C_{15}H_{24}$), Diterpene ($C_{20}H_{32}$) und höhere Polymere sowie verschiedene sauerstoffhaltige Verbindungen (Alkohole, Ketone und Campher), die von den Terpenkohlenwasserstoffen abgeleitet sind. Viele sind von pharmakologischer Bedeutung (Wiley, 2000).

2.1.3 Phenolische Verbindungen

Phenolische Verbindungen bilden eine der wichtigsten Stoffgruppen der sekundären Pflanzeninhaltsstoffe, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer Struktur und Funktion für den pflanzlichen Organismus stark. Alle Verbindungen dieser Stoffgruppen beinhalten mindestens eine phenolischen Ring, d.h. einen aromatischen Ring und eine oder mehrere daran gebundene Hydroxylgruppen. Häufig werden die phenolischen Verbindungen in die Stoffgruppen der Tannine, Lignane, Sitzbene und weiteren niedermolekularen phenolischen Verbindungen unterteilt. Phenolische Verbindungen werden meist als sekundäre pflanzliche Inhaltsstoffe zum Schutz der Holzmatrix vor Frassfeinden oder vor dem Abbau des Holzes durch Pilze oder Bakterien gebildet. Dies geschieht in aller Regel bei der Umwandlung von Splint- zu Kernholz, weshalb phenolische Verbindungen primär im Kernholz von Bäumen anzutreffen sind. Bäume synthetisieren manchmal Phenolverbindungen als Reaktion auf ökologische Belastungen wie Krankheitserreger- und Insektenbefall, UV-Strahlung oder Eindringen von Sauerstoff in Folge von Astabbrüchen oder anderen Verwundungen (sog. "fakultative Kernholzbildung", z.B. bei Rotbuche) (Constabel et al. 2014).

Tannine

Tannine (syn.: Gerbstoffe) sind polyphenolische Verbindungen. Dabei wird zwischen hydrolysierbaren und kondensierten Tanninen unterschieden (siehe Abbildung 2j und 2k) (Pizzi 2016). Hydrolisierbare Tannine bestehen aus Zucker-Estern der Gallussäure oder ihrer Dimere. Kondensierte Tannine setzen sich hingegen aus Flavan-Bausteinen zusammen und können als oligomere Flavan-3-ole bzw. Flavan-3,4-diole beschrieben werden. Der Name Tannin stammt von der Verwendung dieser Substanzklasse beim Gerben von Häuten zu Leder. Ihr allgemeines Erscheinungsbild als Extraktstoff variiert von cremefarbenen bis rotbraunen Pulvern bis hin zu glänzenden pastösen Substanzen. Sie haben einen adstringenten Geschmack. Tannine kommen in den meisten höheren Pflanzen vor. Wegen ihrer grundlegenden Rolle bei der Abwehr von Insekten, Pilzen oder Bakterien werden sie in fast allen Teilen

der Pflanze eingelagert, z.B. in Samen, Wurzeln, Rinde, Holz und Blattgeweben (Dixon, Liu, & Jun, 2013). Der Abwehrmechanismus basiert unter anderem auf der Fähigkeit von Tanninen, komplexe Proteine und Metallionen, die z.B. Pilzen als Spurenelemente dienen, zu binden (Pizzi 2019). Tannine zudem auch eine antivirale Wirkung, da sie inaktivierend auf unterschiedliche Viren wirken (Anttila et al., 2013). Neben ihrer weiteren positiven Wirkung auf die menschliche Gesundheit als Antioxidantien sind Gerbstoffe auch für das Wohlergehen von Wiederkäuern förderlich: proteinreiche Futtermittel wie Luzerne lösen im Pansen die Produktion von Methan aus, was für das Tier stark beeinträchtigend sein kann. Dies kann durch Zugabe von Tannin in der Nahrung reduziert werden.

Lignane

Lignane (z. B. Hydroxymatairesinol, Abbildung 2f) sind farblose, kristalline und geruchlose Verbindungen. In Pflanzen kommen Lignane frei oder glykosidisch gebunden vor, z.B. in hoher Konzentration im Bereich von Astknoten heimischer Nadelbäume wie Fichte und Waldkiefer (Holmbom et al. 2003). Sie wirken als Abwehrstoffe und besitzen regulierende Aufgaben für das Pflanzenwachstum.

Stilbene

Stilbene sind niedermolekulare C₆-C₂-C₆-Verbindungen verschiedener Biosynthesewege von Bäumen (siehe Abbildung 2g). Nadelbäume enthalten im Vergleich zu Laubbäumen häufig eine größere Menge an Stilbenverbindungen (Mannila & Talvitie 1992). So beinhaltet z.B. die Fichte in ihrer Rinde relevante Mengen dieser Stoffe in glykosidischer Form. Auch aus dem Kernholz verschiedener Nadelhölzer, z.B. aus Waldkiefern, lassen sich Stilbene extrahieren (Latva-Mäenpää et al. 2014).

Flavonoide

Flavonoide basieren auf einem sogenannten Flavan-Grundgerüst, bestehend aus zwei Aromatischen-Ringen und verbunden durch einen Tetrahydropyran-Ring. Neben ihrer Rolle als Bausteine der kondensierten Gerbstoffe kommen Flavonoide auch als monomere Verbindungen sehr häufig im Pflanzenreich und in den Gewebearten heimischer Baumarten vor. Trotz ihrer einheitlichen Grundstruktur sind sie sehr divers und es sind über 6000 verschiedene Verbindungen innerhalb dieser Stoffgruppe bekannt. Eine Gruppe von Flavonoiden, die Anthocyane, sind farbintensiv und färben Blumen und Früchte. Solche Verbindungen kommen selten im Holz vor. Flavone, Flavonole, Flavanone und Flavanonole hingegen, denen eine intensive Farbe fehlt, kommen überwiegend in holzigen Geweben vor (Harborne 1989). Vielen von ihnen besitzen eine bioaktive Wirkung und dienen auf unterschiedliche Weise im Kernholz oder weiteren Gewebetypen zum Schutz vor Mikroorganismen.

2.1.4 Wachse und Fette

Fette sind Ester langkettiger Fettsäuren mit Glycerin und dienen den Bäumen insbesondere als Energiespeicher-Moleküle im Splintholz. Zudem tragen Sie in bestimmten Gewebeteilen durch ihren hydrophoben Charakter zur Regulierung des Wassergehaltes bei. Pflanzliche Wachse sind hingegen Ester eines langkettigen Fettalkohols und einer Fettsäure (siehe Abbildung 2d). Sie besitzen ebenso wie Fette einen ausgeprägt hydrophoben, also wasserabweisenden Charakter. Im Holz kommen sie nur in wenigen Holzarten (z.B. Linde) in relevanten Konzentrationen vor.

2.2 Industrielle Gewinnung und Anwendungsgebiete von Holz inhaltsstoffen

Eine mengenmässig relevante grosstechnische Gewinnung von Holz inhaltsstoffen besteht aktuell lediglich für die Stoffgruppen der Terpene (Mono- und Diterpene) sowie für hydrolysierbare und kondensierte Tannine, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll. Darüber hinaus existieren eine grosse Anzahl von häufig historisch verankerten Anwendungen für weitere Stoffgruppen, wie z.B. Wachse. Häufig stehen den pflanzlichen Extrakten ölbasierte Konkurrenzstoffe gegenüber, die auf Grund ihrer mengenmässigen Verfügbarkeit, geringeren Herstellkosten und einfacheren Qualitätssicherung die resultierenden Anwendungen dominieren.

2.2.1 Terpene

Industrielle Gewinnung: Terpene können aus Holz und Rinde durch physikalische Extraktionsmethoden wie zum Beispiel wie z.B. Wasserdampfdestillation oder Extraktion mit apolaren organischen Lösemitteln gewonnen werden (Stahl und Schild, 1986). Terpene fallen industriell als Kuppelprodukt in der Zellstoffherstellung an, wo sie als Hauptbestandteil des Terpentinöls (engl. «crude turpentine») gesammelt werden. Die Jahresproduktion von Terpentinöl im Rahmen der Zellstoffherstellung wird weltweit auf ca. 350'000 t/a geschätzt (Bajpai 2018). Andere Quellen gehen von einer niedrigeren Produktionsmenge von knapp unter 300'000 t/a aus. Diterpene (Harzsäuren), als weiterer Bestandteil der Nadelbaumharze, fallen im Rahmen der Zellstoffherstellung ebenfalls in einem Kuppelprodukt, dem sogenannten «tall oil» an. Die jährliche Produktion von Tall Oil wird auf ca. 350'000 t/a geschätzt. Holzartenabhängig beinhaltet das Tall oil ca. 15-35 % Harzsäuren, die in einem Destillationsschritt vom Tall Oil abgetrennt werden können. Somit kann von einer Jahresproduktion an Diterpenen von ca. 50'000 bis 100'000 t/a ausgegangen werden, die auch unter dem umgangssprachlichen Begriff «Kolophonum» vermarktet werden.

Anwendungen: Monoterpen und einige Sesquiterpene werden in der industriellen Produktion von Duft- und Aromastoffen sowie Parfümen eingesetzt. So wird z.B. Limonen, das im Nadelholzharz aber vor allem in den Schalen von Zitrusfrüchten vorkommt, vielen Putzmitteln als Duftstoff zugesetzt (Schwab et al., 2008). Verschiedene ätherische Öle und die daraus destillierten Terpene, Zedernöl (geschätzte weltweite Produktion 1.500 – 2.000 t/a) und Kampfer (< 1000 t/a) – werden in der Pharmaindustrie eingesetzt (Niehaus et al., 2011). Als kostengünstig verfügbare optisch aktive Substanzen werden einige Monoterpen – wie z.B. α -Pinen und Limonen – als Grundlage für die Synthese optischer Aufheller benutzt (Wiley, 2000). Als Zusatzstoff in Lacken und Farben erhöhen sie deren Resistenz gegen Algen, Pilze oder Bakterien. Terpene dienen als Ausgangsstoff für die Herstellung einer Vielzahl von Materialien und Produkten: Elastomere, Kunststoffe, Hydrogele, flexible Elektronik, Harze, technische Polymere und Verbundwerkstoffe (Zhu 2016).

Tabelle 1: Beispielhafte Auflistung ätherischer Öle als Stoffgemisch, deren Eigenschaften wesentlich durch ihren Gehalt an Terpenen bestimmt werden. Diese Öle werden als Kuppelprodukt der Zellstoffherstellung oder durch eigenständige Extraktion aus pflanzlichen Rohstoffen gewonnen. (Verändert entnommen aus Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley 2000)

| Art des ätherischen Öls | Nutzung | Jährliche weltweite Produktion (t/a) |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Terpentinöl | Lösemittel und Parfümproduktion | 280.000 |
| Eukalyptusöl | Pharmazeutische Nutzung | 50 – 100 |
| Zedernöl | Duftstoff in Parfüm | 1.500 – 2.000 |

Diterpene («Kolophonum») werden hingegen als Harzbestandteil in diversen Naturfarben und -lacken, Additiv in Druckfarben, als Bogenharz für die Bögen von Streichinstrumenten, als Lötflussmittel und für verschiedene Spezialanwendungen im Sportbereich (u.a. Harze zur Erhöhung der Griff- und Trittsicherheit bei verschiedenen Sportarten wie z.B. Spottklettern, Handball, Tanzen und Gewichtheben) vermarktet.

2.2.2 Tannine

Industrielle Gewinnung: Pflanzliche Tannine werden vor allem auf der Südhalbkugel aus wenigen Baumarten mit Hilfe der Heisswasserextraktion gewonnen. Die weltweite industrielle Produktion von Tanninen umfasst ca. 220.000 t/a (Tabelle 2). Eine genaue Quantifizierung ist jedoch schwierig. Produkte, die auf Tannin-Lignin-Mischungen basieren, werden dennoch teilweise als «Tannine» vermarktet. Diese sind in der Aufstellung in Tabelle 2 nicht berücksichtigt. Aus der Tatsache, dass diese Produkte in manchen Statistiken zum Tannin-Markt berücksichtigt werden, ergeben sich Abweichungen in den Angaben zum Tanninmarkt in unterschiedlichen Quellen.

Tabelle 2: Tanninproduktion und -mengen pro Jahr (Quelle: Silvateam, mündliche Kommunikation)

| | | | |
|----------------------|---|---------------------------|----------------|
| Black Wattle/Mimosa | <i>Acacia mearnsii</i> | Rindenextrakt | 80.000 |
| Quebracho | <i>Schinopsis lorentzii, balansae</i> | Kernholzextrakt | 60.000 |
| Kastanien | <i>Castanea vesca, C. sativa</i> | Kernholzextrakt | 10.000-12.000 |
| Tara | <i>Caesalpina spinosa</i> | Kernholzextrakt | 10.000 |
| Kiefer | <i>Pinus pinaster</i> | Rindenextrakt | 300 |
| Eiche | <i>Quercus sp., andere Kernhölzer</i> | Kernholzextrakt | 5.000 |
| Chinesische Gallnuss | <i>Rhus Typhina semialata, Quercus infectoria</i> | Gallnussextrakt | 4.000 |
| Moa | <i>Cetechu, Acacia mangium</i> | wasserextrahierte Tannine | ~ 50.000 |
| | | | <u>221.300</u> |

Anwendungsgebiete: Tannine werden kommerziell in vielen Bereichen genutzt: zur Lederproduktion, als Rostumwandler, als Bindemittel zur Verklebung von Holzwerkstoffen und Konservierungsstoff sowie in der Pharma industrie. Etwa 60 % der weltweiten Tanninproduktion fliesst in die Lederproduktion. Dabei wird es als Gerbstoff zur Vernetzung der Kollagene der zu gerbenden Häute eingesetzt, wodurch die Haltbarkeit und die Resistenz gegen Mikroorganismen erhöht werden und Leder entsteht.

Knapp 25 % werden zur Herstellung von Klebstoffen für die Holzwerkstoffherstellung eingesetzt. Durch Kondensation mit z.B. Formaldehyd lassen sich dabei wasserbeständige und emissionsarme duroplastische Bindemittel herstellen.

Auch in der Nahrungsmittelindustrie finden Tannine Anwendung. Hier werden sie überwiegend zur Weinproduktion eingesetzt, wo sie aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung als Konservierungsmittel und als Antioxidantien eingesetzt werden. Weine mit einem hohen Anteil an Tanninen behalten ihre Farbe und altern beständiger (Garcia-Estevez et al 2018, Pricariello et al 2018). Aufgrund dieser Wirkung werden sie auch zunehmend als Antioxidantien in Nahrungsergänzungsmitteln eingesetzt. Einen weiteren Einsatzbereich haben Tannine in Rostschutzmittel-Systemen, wo Tannine als Antioxidantien eingebracht werden (Zelinka & Stone, 2011). Für dieses Anwendungsgebiet konnte bereits bestätigt werden, dass einige Tannine von bei uns heimischen Baumarten bessere Leistungseigenschaften in den Farbsystemen erzeugen, als die aktuell üblicherweise eingesetzten Tannine tropischer und subtropischer Baumarten, z.B. erhöhte Reaktivität, höhere Korrosionshemmung und bessere Adhäsionseigenschaften bei Tanninen aus Kernholz der Waldföhre (Matamala et al. 2000).

In verschiedenen Kosmetik-Produkten werden Tannine ebenfalls eingesetzt, so z.B. in Haarpflegeprodukten der Fa. Freestyle consulting, die Produkte zur Haarglättung mit Tannin als Wirkstoff vermarktet («Tanino Haarpflege»). Tabelle 3 fasst die aktuellen Anwendungsgebiete von Tannin zusammen.

Tabelle 3: Anwendungsbereiche von Tannin

Anwendungsbereich: **Lederindustrie**

Stand der Entwicklung: Industriell umgesetzt

Quelle: Chan et al., 2015

Anwendungsbereich: **Klebstoffe (Holzindustrie)**

Stand der Entwicklung: Industriell umgesetzt

Quelle: (Langenberg, Grigsby, & Ryan, 2010; Venla, Trischler, & Sandberg, 2013), (Venla et al., 2013)

Anwendungsbereich: **Epoxid-Harz-Kleber**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Jahanshahi, Pizzi, Abdulkhani, & Shakeri, 2016)

Anwendungsbereich: **Beschichtung**

Stand der Entwicklung: Labormassstab und Pilotprojekte, als Wirkstoff in Rostschutzfarben industriell umgesetzt

Quelle: (Garcia, Glasser, & Pizzi, 2016)

Anwendungsbereich: **Holzschutzmittel (Pilze, Termiten; Käfer)**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Tondi et al., 2012), (Hu, Thevenon, Palanti, & Tondi, 2017)

Anwendungsbereich: **Schäume**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Delgado-Sánchez et al., 2016)

Anwendungsbereich: **Verpackungen**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Missio et al., 2017)

Anwendungsbereich: **Proteinabsorbierung**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Girard, Bean, Tilley, Adrianos, & Awika, 2018)

Anwendungsbereich: **Metallionen-Bindung (Chelat)**

Stand der Entwicklung: Labormassstab

Quelle: (Gianluca Tondi et al., 2012), (Bacelo, Vieira, Santos, Boaventura, & Botelho, 2018)

Anwendungsbereich: **Medizin**

Stand der Entwicklung: Industriemassstab

Quelle: (de Jesus et al., 2012)

Anwendungsbereich: **Tierfutter**

Stand der Entwicklung: Industriemassstab

Quelle: (Lyman, Provenza, & Villalba, 2008)

Anwendungsbereich: **Weinherstellung**

Stand der Entwicklung: Industriemassstab

Quelle: (García-Estévez et al. 2017), (Picariello et al., 2018)

2.3 Extraktionsprozesse zur Erzeugung von Extrakten aus Holz und Rinde

Die gezielte Gewinnung holzbasierter Extrakte fokussiert vor allem auf die Produktion von tanninreichen Extrakten. Dafür wird im industriellen Massstab eine Heisswasserextraktion eingesetzt. Hierbei werden alle wasserlöslichen Verbindungen (insbesondere Tannine und weitere phenolische Verbindungen, aber auch Zuckerverbindungen) weitgehend aus der zu extrahierenden Biomasse herausgelöst. So wird die Gewinnung tanninreicher Extrakte im industriellen Massstab aus den Arten "Quebracho" (*Schinopsis lorentzii* [Engl.]) und der Schwarzholz-Akazie "Mimosa" (*Acacia mearnsii* [De Wild.]) mit Heisswasser in einem Gegenstrom-Prozess durchgeführt. In der Regel wird das luftgetrocknetes Ausgangsmaterial mit Hilfe von Hammermühlen zu Partikeln mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 1-4 mm zermahlen und anschliessend in Extraktionsgefässe («Extrakteure») gefüllt. Üblicherweise wird mit einem Flottenverhältnis von 5:1 und höher gearbeitet und die Partikel während einer Extraktionsdauer von 30 - 60 min bei Temperaturen von 70 - 90°C mittels Heisswasser extrahiert. Das Extrakt besitzt nach der Extraktion einen Feststoffgehalt von 1-5 %, wird anschliessend durch einen Filtrationsschritt von den Partikeln getrennt und mit Hilfe von Verdampfern auf einen Feststoffgehalt von 20-30 % eingeengt, bevor es zu wasserfreiem Pulver mittels Sprühtrocknung getrocknet wird.

3 Bestandsaufnahme Schweizer Holz

Die Extraktion von Holzinhaltstoffen soll gemäss dem Ansatz der Kaskadennutzung des Rohstoffs Holz vor allem aus Resthölzern und Rinde vorgenommen werden. Diese werden bislang kaum stofflich sondern mehrheitlich energetisch verwertet. Ein vorgelagerter Extraktionsschritt könnte eine zusätzliche Wertschöpfung ermöglichen und den bestehenden Verarbeitungsprozess sinnvoll ergänzen. Im Rahmen dieses Projekts soll das in der Schweiz grundsätzlich vorhandene Roh- und Reststoffpotenzial ermittelt respektive abgeschätzt werden. Die folgenden Sortimente sind dabei von Relevanz:

- ▶ Meterware
- ▶ Schwarten und Spreissel
- ▶ Scheitholz
- ▶ Hackschnitzel mit und ohne Rinde
- ▶ Rinde
- ▶ Sägespäne
- ▶ Hobelspäne

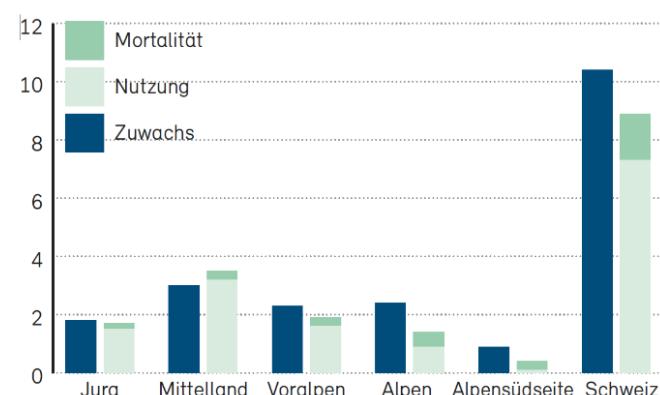
Die durchgeführten Studien legen nahe, dass sich einige Holzarten besonders gut für die Extraktion von Holzinhaltstoffen eignen. Unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit in der Schweiz wurden die folgenden Holzarten für die nähere Betrachtung in diesem Kapitel ausgewählt:

- ▶ Nadelholz:
 - ▶ Weisstanne (*Abies Alba*)
 - ▶ Lärche (*Larix decidua*)
 - ▶ Fichte (*Picea abies*)
 - ▶ Arve (*Pinus cembra*)
 - ▶ Waldkiefer (*Pinus sylvestris*)
- ▶ Laubholz:
 - ▶ Edelkastanie (*Castanea sativa*)
 - ▶ Buche (*Fagus sylvatica*)
 - ▶ Stieleiche (*Quercus robur*)

3.1 Holzvorrat in der Schweiz

Die Kennzahl des Holzvorrats beschreibt das Volumen in Rinde der lebenden Bäume und Sträucher. In der Schweiz ist dieser Holzvorrat tendenziell steigend und beträgt gemäss der Erhebung 2009-2013 des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI4) 419 Millionen Kubikmeter. Dieser Holzvorrat wird sowohl von natürlichen Elementen als auch durch das Handeln des Menschen beeinflusst und weist je nach Region und Baumart grosse Unterschiede auf. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Mittelland der Holzvorrat zwischen den letzten zwei Erhebungen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI3 04/06 und LFI4 09/13) auch nach Abzug der natürlichen Mortalität um 0.3 % abgenommen hat. In den Alpen, Voralpen, auf der Alpensüdseite und im Jura ist der Vorrat hingegen gestiegen (siehe Diagramm 1). Der Vorrat von Laubholz (+6.5 %) ist stärker gestiegen als der von Nadelholz (+2.5 %). Die Fichte ist mit einem Vorratsanteil von 44 % die häufigste Baumart im Schweizer Wald, im Mittelland hat sich ihr Anteil um knapp 8 % verringert.

Schaftholz in Rinde; Mio. m³/Jahr



Schaftholz in Rinde, Mio. m³/Jahr

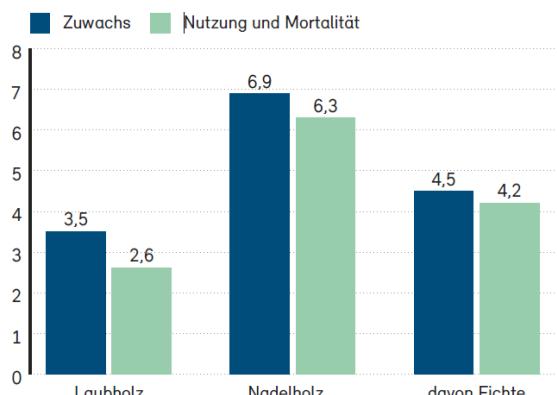


Diagramm 1: Zuwachs, Nutzung und Mortalität nach Regionen LFI3-LFI4 (LFI4 (09/13) bezieht sich auf 5/9 des Stichprobennetzes), (Quelle: BAFU, Jahrbuch Wald und Holz 2018, Schweizerisches Landesforstinventar (LFI3 04/06 0- LFI4 09/13), WSL)

Diagramm 2: Zuwachs, Nutzung, Mortalität nach Baumarten LFI3-LFI4, (LFI4 (09/13) bezieht sich auf 5/9 des Stichprobennetzes), (Quelle: BAFU, Jahrbuch Wald und Holz 2018, Schweizerisches Landesforstinventar (LFI3 04/06 0- LFI4 09/13), WSL)

Tabelle 4 zeigt die Veränderung des Vorrats zwischen den letzten zwei Erhebungen des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI3 04/06 und LFI4 09/13) der für dieses Projekt relevanten Baumarten für die fünf Produktionsregionen der Schweiz. In den Alpen und auf der Alpensüdseite ist der Vorrat der meisten Baumarten steigend, insbesondere die Arve, die Edelkastanie, die Weisstanne, die Buche und auch die Fichte weisen Zuwächse auf. Einzig die Vorräte der Waldkiefer sowie der Stieleiche sind in diesen Regionen zurückgegangen. Im Mittelland sind die Bestände bei den meisten betrachteten Baumarten rückläufig, in den Voralpen hingegen sind insbesondere die der Lärche und der Weisstanne steigend. Betrachtet man die einzelnen Baumarten im Detail, sticht die Zunahme des Vorrates der Arve auf der Alpensüdseite und der Edelkastanie in den Alpen (bei geringen Mengen) sowie der Lärche in den Voralpen hervor.

Tabelle 4: Veränderung des Vorrats ausgewählter Baumarten für die fünf Produktionsregionen der Schweiz (Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 201807: Vorrat, Veränderung LFI3 04/06 – LFI4 09/13)

| | Produktionsregion | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|--------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| | Jura | Mittelland | Voralpen | Alpen | Alpensüdseite | Schweiz |
| Weisstanne (Abies alba) | 8.4% | -0.1% | 7.4% | 10.5% | 9.7% | 6.1 % |
| Lärche (Larix decidua/L. kaempferi) | -12.1% | -2.9% | 17.5% | 2.9% | 7.1% | 3.6 % |
| Fichte (Picea abies) | -2.3% | -9.5% | -1.2% | 4.9% | 9.8% | 0 % |
| Arve (Pinus cembra) | .% | .% | .% | 3.8% | 42.2% | 3.9 % |
| Waldkiefer (Pinus sylvestris) | -10.6 % | -22.3 % | -3.6% | -2.8% | -22.5% | -11.3% |
| Edelkastanie (Castanea sativa) | .% | -13.4% | .% | 14.9% | 9.1% | 9.3% |
| Buche (Fagus sylvatica) | 0.7 % | 0.0% | 0.4% | 4.4% | 11.1% | 1.5% |
| Stieleiche (Quercus robur) | -10.4 % | 3.9% | -7.5% | -47.9% | -17.2% | -1.8% |
| Total | 0.3 % | -3.6% | 1.4% | 4.1% | 9.8% | 1.5% |

3.2 Überblick Schweizer Bestand der Holzarten

Wie in der Einleitung beschrieben, kann davon ausgegangen werden, dass für die Extraktion von Inhaltsstoffen aus Schweizer Holz vor allem die Holzarten Weisstanne, Lärche, Fichte, Arve, Waldkiefer, Edelkastanie, Buche und Stieleiche interessant sind. In den nachfolgenden Abschnitten ist deren Verbreitung sowie die zu erwartende Entwicklung des Bestands in der Schweiz bis im Jahr 2050 abgebildet. Als Grundlage dienen die Angaben des Schweizerischen Landesforstinventars (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) und der vom Bundesamt für Umwelt BAFU in Auftrag gegebene Bericht «PorTree» (Niklaus E. Zimmermann, 2014), welcher die zukünftige Entwicklung der Schweizer Holzarten unter Annahme bestimmter Klimamodelle prognostiziert.

Pro Holzart wird nachfolgend der aktuelle Bestand dem prognostizierten Bestand bis 2050 grafisch gegenübergestellt. Die grünen Punkte der Grafik zum aktuellen Bestand wiederspiegeln die LFI-Probeflächen mit einem Vorkommen zwischen 1983 und 2018, wobei die gewählte Baumart in mindestens zwei Inventuren festgestellt werden musste. Die Grafik mit den rot eingefärbten Flächen zeigt die zukünftige Verbreitung (bis 2050) unter dem angenommenen Klimamodell. Diese Annahme basiert auf sechs verschiedenen Modellen, die wiederum durch die Kombination weiterer Modelle erstellt wurden und denen Berichte des Weltklimarats zugrunde liegen.

Weisstanne (*Abies alba*)

In der Schweiz konzentriert sich der Bestand der Weisstannen besonders auf den westlichen Jura, das zentrale Mittelland und die Voralpen auf Höhen zwischen 600 und 1200 m ü. M. Sie bevorzugt gut mit Wasser versorgte Böden und kommt in trockenen Gebieten (z.B. Wallis und Tessin) deutlich weniger häufig vor (Abbildung 3).

Der Bestand der Weisstanne wird sich ähnlich wie bei der Fichte unter dem angenommenen Klimamodell gemäss Zimmermann in den tiefen Lagen zwischen Genfer- und Bodensee verringern. Das natürliche Areal wird sich bis 2050 hauptsächlich auf den Jura und die höheren Voralpen sowie einzelne Gebiete im Tessin beschränken (Abbildung 4).

Lärche (*Larix decidua*)

Das Vorkommen von Lärchen in der Schweiz beschränkt sich grösstenteils auf das Wallis, die Gebirgstäler im Tessin und das Bündnerland. Knapp drei Viertel dieser Nadelbäume wachsen an Steilhängen oberhalb von 1400 m ü. M. Die Verbreitung der Lärche ist sehr stark abhängig vom Lichtangebot (Abbildung 5).

Nachfolgende Abbildung zeigt auf, dass sich unter dem angenommenen Klimamodell die Lärche künftig besonders stark in höheren Lagen verbreitet. Gemäss Zimmermann ist in der Schweiz in den nächsten Jahrzehnten mit einer Bestandszunahme an Lärchen zu rechnen (Abbildung 6).



Abbildung 3: Verbreitung der Weisstanne 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

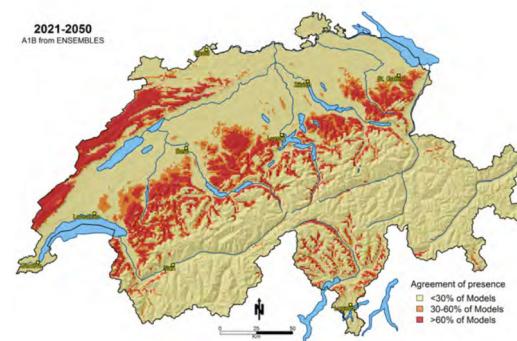


Abbildung 4: Zukünftig erwartete Verbreitung der Weisstanne (Niklaus E. Zimmermann, 2014)



Abbildung 5: Verbreitung der Lärche Jahr 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

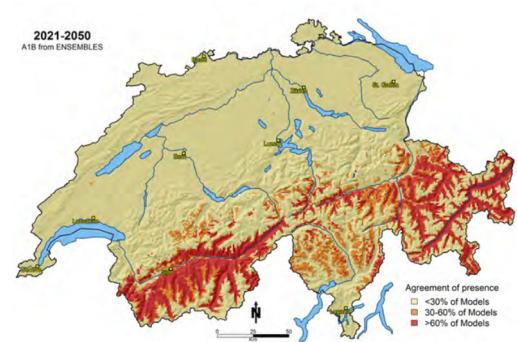


Abbildung 6: Zukünftig erwartete Verbreitung der Lärche (Niklaus E. Zimmermann, 2014)

Fichte (*Picea abies*)

Die Fichte ist an fast allen waldfähigen Standorten zu finden und besonders in tieferen Lagen über ihr natürliches Areal hinaus verbreitet. Sie wächst in Höhen von 250 bis über 2200 m ü. M. Am stärksten verbreitet hat sich die Fichte in der Alpen- und Voralpenregion sowie im westlichen Jura (Abbildung 7).

Laut Prognose von Zimmermann (2014) wird der Fichtenbestand unter dem angenommenen Klimamodell abnehmen und sich eher in höherliegende Gebiete zurückziehen. Bis 2050 ist eine Verringerung des Bestands besonders in tiefen Lagen zwischen Genfer- und Bodensee zu erwarten (Abbildung 8). Grundsätzlich ist die Baumart gemäss Zimmermann aber nicht bedeutsam bedroht (Abbildung 8).

Arve (*Pinus cembra*)

Die Arve ist in der Schweiz hauptsächlich im Engadin und in den südlichen Walliser Seitentälern anzutreffen. Sie bevorzugt Höhenlagen und wächst folglich mehrheitlich in einer Höhe über 1800 m ü. M. und kommt sogar auf über 2500 m ü. M. vor. Ihre Bestände wurden durch grossflächige Rodungen, insbesondere für Alpweiden, in den letzten Jahrhunderten stark verringert (Abbildung 9).

Die sehr langsam wachsende Baumart wird durch den Klimawandel wohl wesentliche Teile ihres Lebensraumes verlieren. Da sie jedoch in diversen Regionen geschützt ist und sich auch in noch höher gelegene Gebiete zurückziehen kann, wird ihr Bestand in der Schweiz gesichert sein (Abbildung 10).



Abbildung 7: Verbreitung der Fichte 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

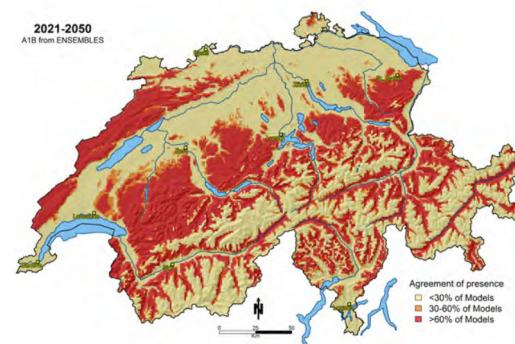


Abbildung 8: Zukünftig erwartete Verbreitung der Fichte
(Niklaus E. Zimmermann, 2014)

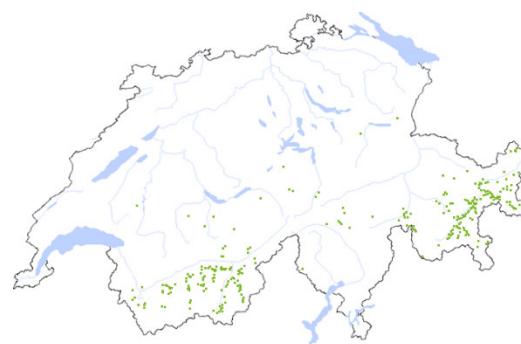


Abbildung 9: Verbreitung der Arve 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

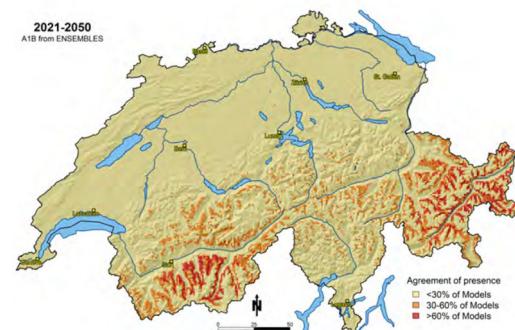


Abbildung 10: Zukünftig erwartete Verbreitung der Arve
(Niklaus E. Zimmermann, 2014)

Waldkiefer (*Pinus sylvestris*)

Waldkiefern verbreiten sich besonders in tiefen Lagen (unterhalb von 1200 m ü. M.) und sind anspruchslos was die Bodenqualität betrifft, benötigen aber viel Licht. Auf Dauer kann sie sich gemäss Zimmermann nur an Extremstandorten gegen andere Arten durchsetzen. Der grösste Anteil an Waldkiefern liegt im Wallis, wo auch die ausgedehntesten zusammenhängenden Bestände vorkommen (Abbildung 11).

Laut der Prognose wird die Waldkiefer mit dem Klimawandel wenig Probleme haben. Sie ist eine Pionierbaumart und kann sich über Samen, die durch den Wind verteilt werden, gut verbreiten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie sich vermehrt in höhere Lagen und in Täler zurückzieht. In den letzten Jahren zeigte sich jedoch insbesondere in den wärmsten Regionen im Wallis ein massives Absterben der Baumart nach besonders trockenen Jahren. Dieser Effekt ist noch nicht weiter untersucht und nicht im Modell abgebildet (Abbildung 12).

Edelkastanie (*Castanea sativa*)

Die Edelkastanie (auch Esskastanie genannt) ist eng mit den Eichenarten verwandt. Sie wächst zurzeit in der Schweiz fast ausschliesslich auf der Alpensüdseite und sehr häufig in reinen Grossbeständen an steilen Süd- bis Westhängen bis 1250 m ü. M (Abbildung 13).

Abbildung 14 zeigt auf, wie sich die Edelkastanie unter dem erwarteten Klimawandel bis 2050 weiterentwickeln könnte. Interessanterweise ist zu erkennen, dass sie sich auch nördlich der Alpen ausdehnt, was bis anhin nur in einzelnen Gegenden mit speziellen klimatischen Bedingungen möglich war. Bis zum Jahr 2080 kann in der Schweiz sogar mit einer massiven Zunahme des Edelkastanienbestands gerechnet werden (Abbildung 14).



Abbildung 11: Verbreitung der Waldkiefer 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

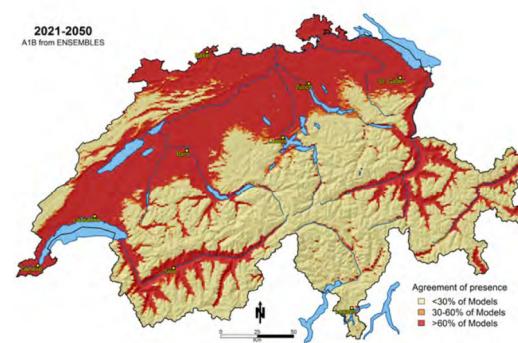


Abbildung 12: Zukünftig erwartete Verbreitung der Waldkiefer (Niklaus E. Zimmermann, 2014)

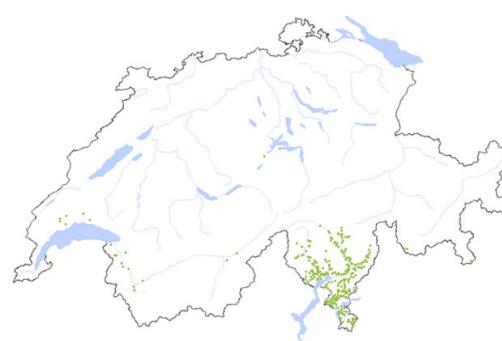


Abbildung 13: Verbreitung der Edelkastanie 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

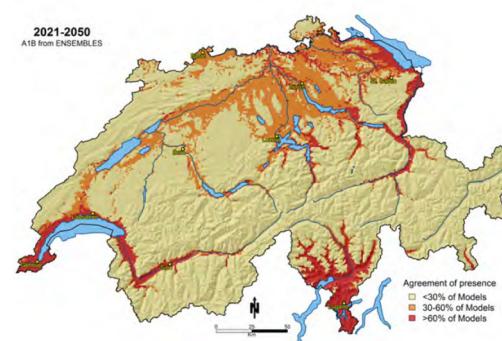


Abbildung 14: Zukünftig erwartete Verbreitung der Edelkastanie (Niklaus E. Zimmermann, 2014)

Buche (*Fagus Sylvatica*)

Die Buche hat heute im Mittelland einen Anteil von circa 20 % an der Gesamtstammzahl. Den höchsten Buchenanteil weisen die Regionen Jura, Basel und Tessin auf. Einzig die niederschlagsarmen Alpentäler sowie Höhenlagen ab 1300 m ü. M. sind natürlicherweise frei von Buchen (Abbildung 15).

Die Prognose bis ins Jahr 2050 zeigt eine Abnahme der Verbreitung der Buche. Sie wird zwar nicht grundsätzlich in ihrem Bestand bedroht sein und sich auch in höheren Lagen ansiedeln können, jedoch wird sie insbesondere in den trockenen Mittelland-Regionen seltener werden (Abbildung 16).

Stieleiche (*Quercus robur*)

Die Stieleiche ist insbesondere im Mittelland und im östlichen Jura häufig anzutreffen. Sie benötigt viel Licht sowie eine lange und warme Vegetationsperiode und bevorzugt deshalb Lagen unter 800 m ü. M (Abbildung 17).

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Eiche vom Klimawandel tendenziell profitiert (siehe Abbildung 18). Sie ist trockenheits-tolerant, ziemlich störungsresistent und kann auf unterschiedlichen Böden wachsen. Ihre Lebensräume werden folglich in Zukunft eher steigen (Abbildung 18).



Abbildung 15: Verbreitung der Buche 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

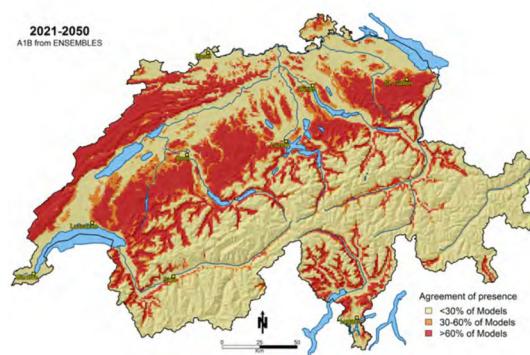


Abbildung 16: Zukünftig erwartete Verbreitung der Buche (Niklaus E. Zimmermann, 2014)



Abbildung 17: Verbreitung der Stieleiche 2018
(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019)

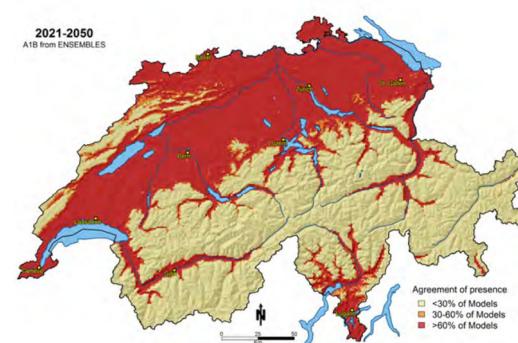


Abbildung 18: Zukünftig erwartete Verbreitung der Stieleiche (Niklaus E. Zimmermann, 2014)

3.3 Holzsortimente

3.3.1 Überblick Wertschöpfungskette

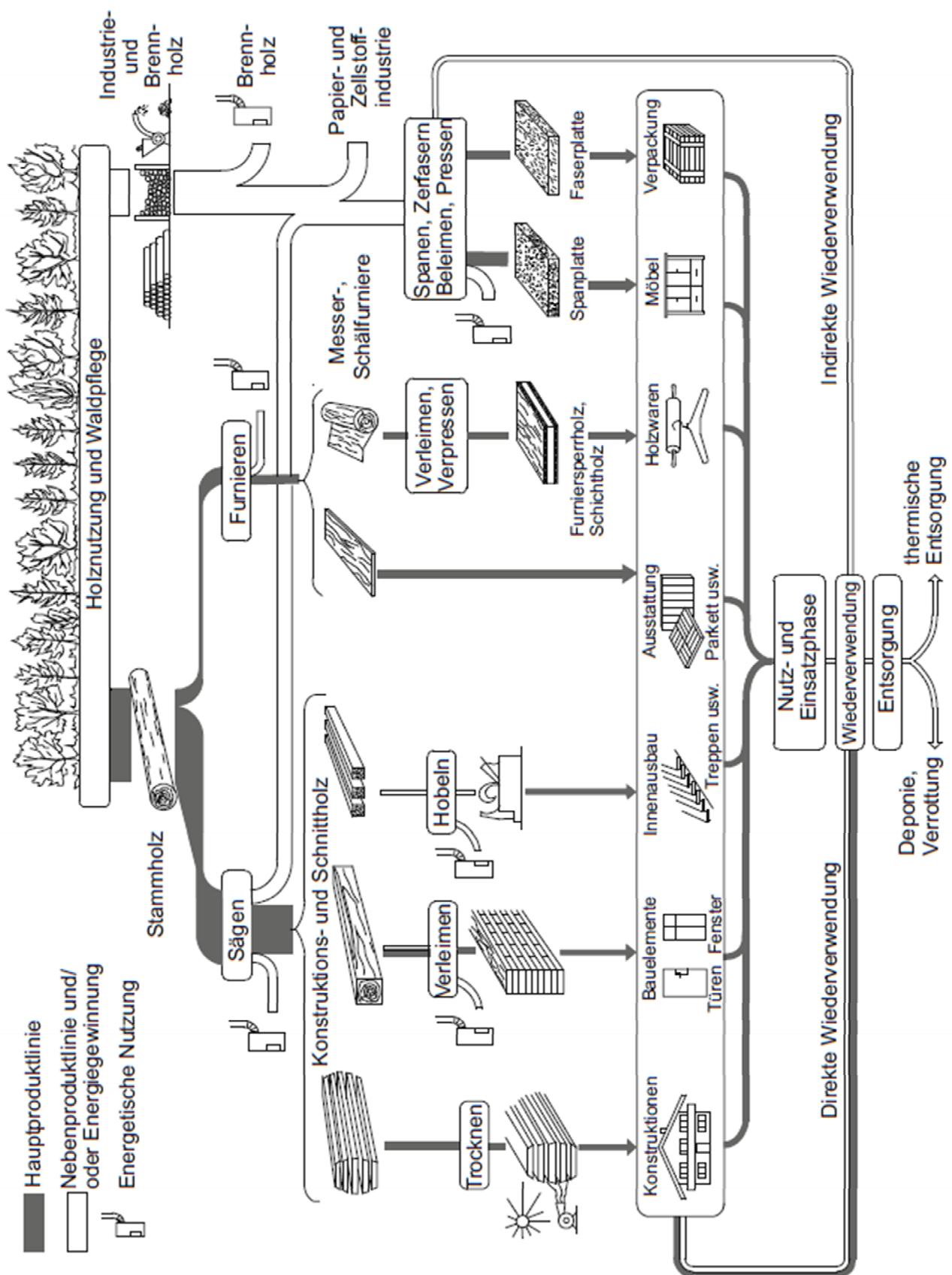
Für die Extraktion von Holzinhaltsstoffen kommen diverse Restholzprodukte in Frage, beispielsweise Rinde, Hackschnitzel, Schwarten und Spreissel etc. (siehe Kapitel 3.1). Um das vorhandene Potenzial der einzelnen Sortimente und die Plausibilität neuer Geschäftsmodelle abschätzen zu können, ist ein grundlegendes Verständnis für die Wertschöpfungskette der Schweizer Wald- und Holzbranche Voraussetzung.

In der Abbildung 19 ist der Materialfluss von Holz durch die Volkswirtschaft abgebildet. Ausgangspunkt sind die Waldflege und die Holzernte. Dabei wird einerseits Stammholz gewonnen, das in den Prozess der stofflichen Verwertung kommt. In Sägereien wird es meist entrindet und zu Konstruktions- und Schnittholz eingeschnitten. Als Nebenprodukt dieses Prozesses fallen Rinde, Schwarten und Spreissel sowie Sägemehl an, die heute oft wie in Abbildung 19 dargestellt für die Energieerzeugung genutzt werden. Anschliessend wird das Konstruktions- und Schnittholz mehrheitlich weiterverarbeitet, beispielsweise gehobelt, gekappt und/oder verleimt. Bei diesen Prozessschritten entstehen wiederum Resthölzer wie Säge- und Hobelreste.

Ein geringer Teil des Stammholzes wird nach der Ernte im Wald in spezialisierten Werken zu Furnieren weiterverarbeitet. Auch bei diesem Prozess entstehen Nebenprodukte wie Rinde und Resthölzer.

Bei der Waldflege und Holzernte fällt nicht nur qualitativ hochwertiges Stammholz an, sondern auch Rundholz minderer Qualität mit beispielsweise geringem Durchmesser, einer starken Krümmung oder hoher Astigkeit, das für die Erzeugung von Industrieholz wie Hackschnitzel oder Scheitholz genutzt werden kann. Starke Äste, Rinde und überzählige Holzmengen werden mehrheitlich als Energieholz verwendet.

All diese Sortimente kommen grundsätzlich für den Einsatz als Rohstoff für die Extraktgewinnung in Frage. Es ist davon auszugehen, dass die Weiterverwendung dieser Holzreststoffe zur Energiegewinnung nach dem Extraktionsprozess nach wie vor möglich ist. Der genaue Brennwert dieser Stoffe müsste jedoch noch untersucht werden. Andere Einsatzzwecke, wie beispielsweise die Herstellung von Holzwerkstoffen, sind nach der Extraktion wohl ebenfalls noch möglich. Doch auch dies müsste näher untersucht werden.



3.3.2 Detailbetrachtung der relevanten Materialflüsse und Sortimente

Hinsichtlich der anfallenden Resthölzer, die für eine Extraktion von Holzinhaltsstoffen genutzt werden könnten, scheinen vor allem die folgenden zwei Materialflüsse relevant zu sein: Die stoffliche Verwertung des Holzes in Sägereien sowie die Industrie- und Brennholzherstellung direkt nach der Holzernte im Wald. Nachfolgend werden diese zwei Prozesse detailliert beschrieben.

Sägerei: Einschnitt und Weiterverarbeitung von Stammholz

Der Prozess des Einschnitts und der Weiterverarbeitung von Stammholz in einem Sägewerk sowie die anfallenden Reststoffe und die Möglichkeit der Extraktstoffgewinnung können folgendermassen dargestellt werden:

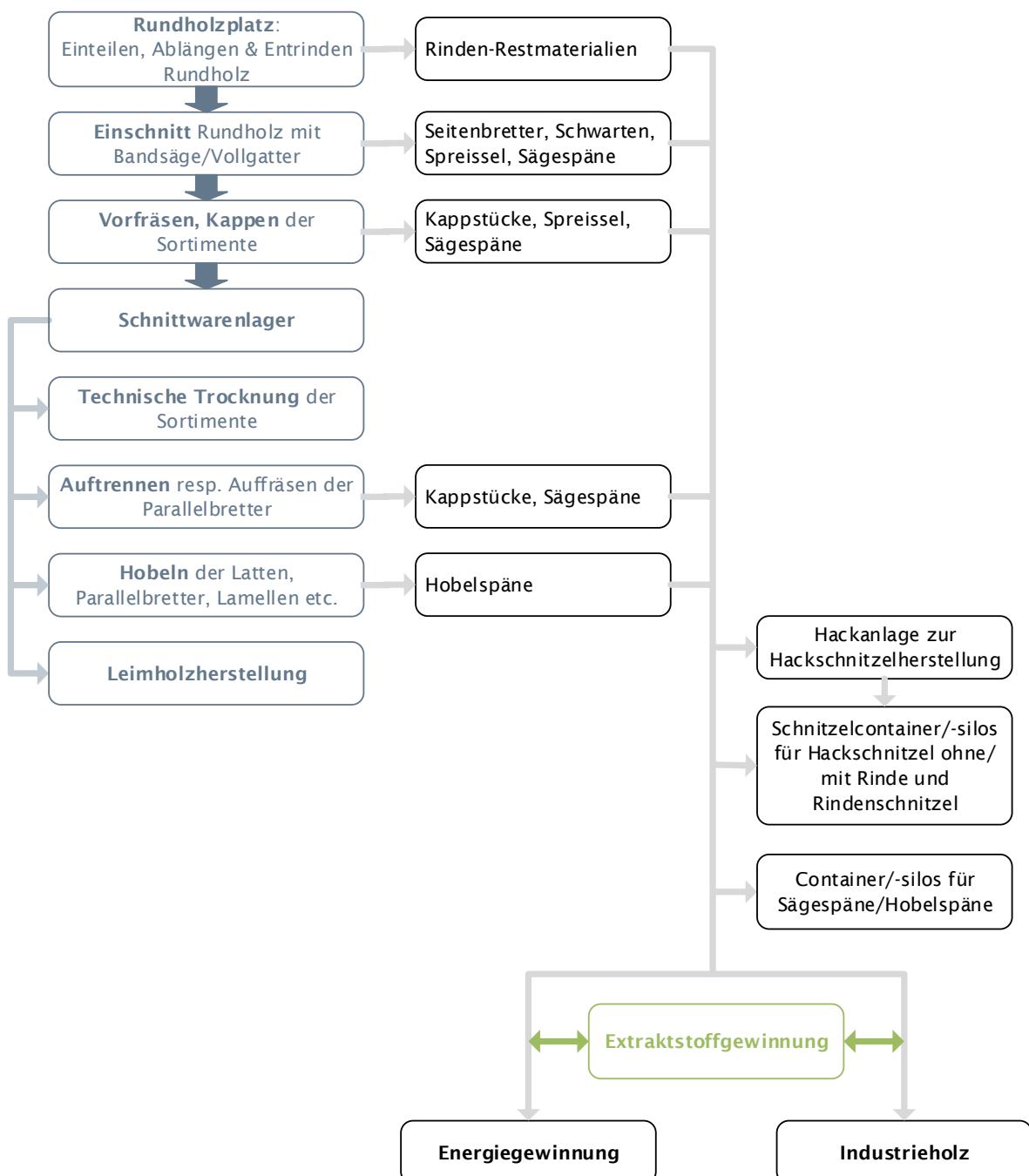


Abbildung 20: Prozessdarstellung des Einschnitts und der Weiterverarbeitung von Stammholz mit den anfallenden Reststoffen und der Möglichkeit der Extraktstoffgewinnung

Auf dem Rundholzplatz einer Sägerei wird das Rundholz meist je nach einzuschneidendem Produkt eingeteilt und abgelängt sowie entrindet. Dabei fallen Rindenreststoffe an, die in Container oder Silos zwischengelagert werden. Beim anschliessenden Einschnitt des Rundholzes mit einer Bandsäge oder einem Vollgatter ergeben sich als Nebenprodukte Seitenbretter, Schwarten und Spreissel, die oftmals in einer Hackanlage gehackt und gemeinsam oder auch getrennt von den Sägespänen gesammelt werden. Wie viele Silos respektive Container eine Sägerei hat und inwiefern die verschiedenen Restholzsortimente getrennt werden, ist von Firma zu Firma unterschiedlich.

Nach dem Einschnitt werden die meisten Sortimente noch vorgefräst oder gekappt, wobei Resthölzer wie Kappstücke und Sägespäne entstehen. Je nach Produkt und Unternehmen werden die Schnittwaren anschliessend luftgetrocknet oder in einer Trockenkammer technisch getrocknet, bevor sie dann eventuell weiterverarbeitet werden.

Teilweise verfügen Sägereien selbst über ein Hobelwerk oder verkaufen die Schnittwaren an spezialisierte Hobelwerke, die die Parallelbretter auftrennen und durch hobeln Latten, Parallelbretter, Lamellen etc. herstellen. Bei der Leimholzherstellung werden diese Lamellen anschliessend zu Konstruktionsholz verleimt. Einige Sägereien können diesen Prozess wiederum unter einem Dach abdecken, andere Firmen haben sich explizit auf die Leimholzherstellung spezialisiert.

Ein grosser Teil all dieser anfallenden Resthölzer werden aktuell für die Energiegewinnung genutzt. Zum einen für den Eigenbedarf, zum anderen werden sie auch verkauft. Vor der Verbrennung der Sägespäne und Hackschnitzel wäre es denkbar, einen Zwischenschritt für die Extraktstoffgewinnung einzuschieben. Die Hackschnitzel müssten eventuell noch zerkleinert werden, dann könnten sie direkt in eine Extraktionsanlage gegeben werden. Nach der Extraktion wären die Hackschnitzel zu entwässern, damit sie wie gewohnt für die Energieerzeugung genutzt werden könnten.

Mögliche Einflüsse des Extraktionsverfahrens auf den Brennwert der Reststoffe müssten jedoch noch untersucht werden. Zudem wäre es nach heutigem Kenntnisstand von Vorteil, wenn die Reststoffsortimente nach Holzart, Typ (Rinde oder Holz) und Produkt (Hackschnitzel oder Säge-/Hobelspäne) getrennt gelagert und extrahiert werden könnten.

Ebenfalls genauer zu analysieren ist, inwiefern Hackschnitzel, die für den Einsatz als Industrieholz vorgesehen sind, vorher einer Extraktion unterzogen werden können. Aktuell ist nicht geklärt, welchen Einfluss die Extraktion auf die Qualität der Hackschnitzel hat.

Wald: Industrie- und Brennholzherstellung

Eine beträchtliche Menge Holz wird nach der Ernte nicht als Stammholz der stofflichen Verwertung zugeführt, sondern direkt zur Energiegewinnung oder als Industrieholz verwendet. Es sind dies insbesondere Sortimente wie Schwachholz respektive Rundholz mit einer geringeren Qualität, der Schlagabraum, der nach der Holzernte zurückbleibt wie beispielsweise Äste, Baumwipfel, Kappstücke etc. sowie Rinde, die gleich im Wald anfällt. Diese Waldreststoffe werden hauptsächlich als Meterware, Scheitholz oder Hackschnitzel verkauft. Entweder gelangen sie direkt vom Waldbesitzer an Energieerzeugungsanlagen und an die Holzindustrie wie beispielsweise Spanplattenhersteller, oder sie werden von Forstbetrieben oder spezialisierten Händlern weiterverkauft. Grundsätzlich wäre es wiederum denkbar, im Prozess vor der Energieerzeugung und eventuell auch vor der Verwendung als Industrieholz einen Zwischenschritt zur Extraktstoffgewinnung einzufügen. Dies unter der Voraussetzung, dass die Hackschnitzel nach der Extraktion noch die nötige Qualität für die Weiterverarbeitung haben.

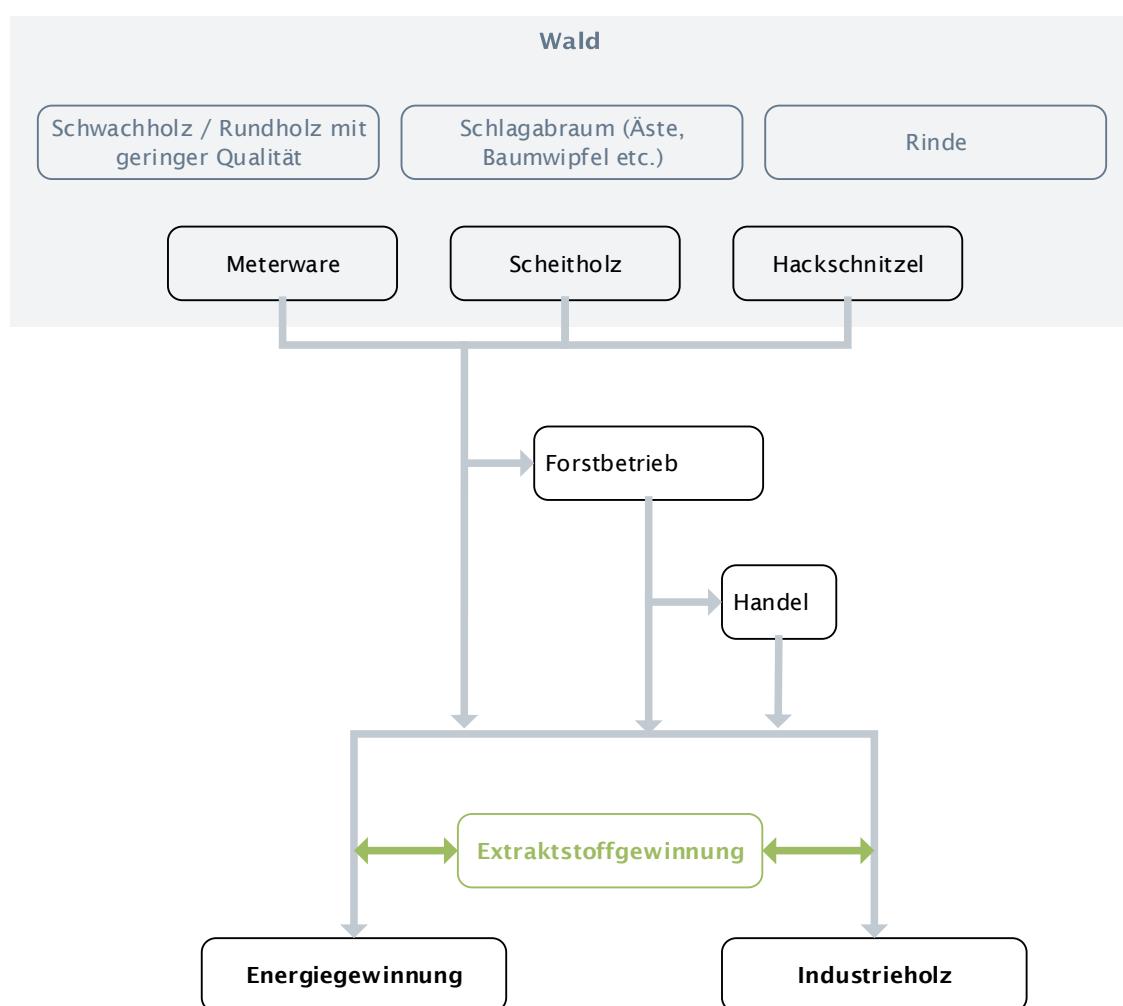


Abbildung 21: Prozessdarstellung der Energie- und Industrieholzherstellung mit der Möglichkeit der Extraktstoffgewinnung

3.3.3 Saisonalität der Sortimente

Für das Geschäftsmodell einer Extraktionsanlage für Holzinhaltstoffe ist eine konstante Rohstoffversorgung im Jahresverlauf eine wichtige Grundvoraussetzung.

Traditionell findet die Holzernte im Wald im Winter statt. Zum einen sind die Bäume in dieser Zeit in Vegetationsruhe und stehen nicht voll «im Saft». Dies vereinfacht unter anderem die Trocknung des Holzes und erhöht die Lagerfähigkeit aufgrund der geringeren Anfälligkeit für Pilzbefall. Zum anderen kann der Boden geschont und Rückschäden können vermieden werden, vorausgesetzt es herrschen tiefe Temperaturen, oder es liegt sogar Schnee (Pro Natura Zürich, 2019).

Damit die Sägewerke auch im Sommer mit Holz versorgt werden können, wird dieses beispielsweise im Wald, beim Zwischenhändler oder im Sägewerk zwischengelagert.

Vermehrt werden auch im Sommer Holzschläge gemacht. Dadurch ist es möglich, die Lagerkosten zu reduzieren und flexibel auf die Nachfrage zu reagieren. Zudem können die Maschinen und das Personal das ganze Jahr über ausgelastet werden. Die Trocknung des «in Saft» stehenden Holzes ist dank den heutigen Technologien gut durchführbar. Da jedoch die Vegetation stärker beeinträchtigt wird und beispielsweise Vögel während ihrer Brutzeit gestört werden, wird die Haupternte auch in Zukunft im Winter erfolgen.

Mit der entsprechenden Organisation und Lagerhaltung verschiedener Sortimente (Sägereiresholz, Waldhackschnitzel etc.) wird es indes problemlos möglich sein, eine allfällige Extraktionsanlage über das ganze Jahr konstant mit Holz zu versorgen. Dies belegen exemplarisch auch die Kostenangaben des Jahrbuchs Wald und Holz (BAFU) für Nadelholz-Waldhackschnitzel, ersichtlich im nachfolgenden Diagramm:

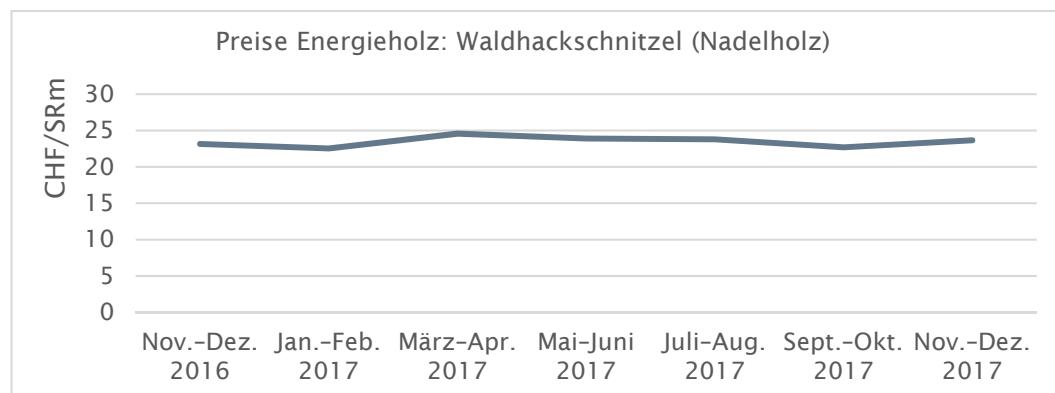


Diagramm 3: Produzentenpreise für Nadelholz-Waldhackschnitzel 2017, gewogene Durchschnitts-Verkaufspreise von inländischem Rohholz, ab mit Lastwagen befahrbaren Waldstrassen (Quelle: Jahrbuch Wald und Holz (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2018))

3.3.4 Akteure und deren Angebot

In der Schweizer Holzwertschöpfungskette gibt es eine Vielzahl von Anbietern von Holzreststoffen. Dies wurde auch bereits im Kapitel 3.3.2 ersichtlich.

Für die Beurteilung der infrage kommenden Holzlieferanten für eine zukünftige Extraktionsanlage gilt es fünf Anbietergruppen zu betrachten.

Die erste Gruppe sind die Landwirte. Sie sind in der Schweiz häufig Waldeigentümer und führen im Winter mehrheitlich selbst Holzschläge durch. Sie bieten oftmals ab ihrem Hof Meterware sowie Scheitholz an. Da die verfügbaren Mengen jedoch meist gering sind, ist diese Anbietergruppe für eine Extraktionsanlage bedingt interessant.

Eine weitere Gruppe bilden die Forstbetriebe, die professionelle Holzschläge durchführen. Die durchschnittlich sehr kleinen Eigentumsgrößen und dadurch geringen Bewirtschaftungsflächen machen es jedoch auch für sie schwierig, eine kosteneffiziente Bewirtschaftung sicherzustellen. Immer öfter schliessen sie sich deshalb in Betriebskooperationen oder Holzverwertungsgenossenschaften zusammen (Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL), Waldwirtschaft Schweiz (WVS), Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2010). Dabei gibt es verschiedene Stufen: bei den Betriebskooperationen

reicht das Feld vom Modell «Kopfbetrieb mit Einzelabrechnung» – ein Betrieb stellt die zur Waldbewirtschaftung notwendigen Ressourcen bereit, Auftragsvergabe, Planung, Durchführung und Abrechnung jedoch erfolgen für jeden Hieb separat – bis hin zu organisatorischen Zusammenschlüssen um die gesamte Waldfläche gemeinsam zu bewirtschaften. Die Vermarktungsorganisationen kooperieren teilweise einzig bei der Holzvermarktung, teilweise wickeln sie von der Planung der Holzernte über die Organisation des Transports bis hin zur Abrechnung alles im Rahmen einer Kooperation ab. Eine Zusammenarbeit mit solchen Kooperationen und Genossenschaften könnte für eine Extraktionsanlage durchaus interessant sein, da diese oftmals konstant hohe Mengen über das ganze Jahr hindurch anbieten können.

Sowohl die Forstbetriebe wie auch die Betriebskooperationen und Verwertungsgenossenschaften bieten in erster Linie Sortimente ab Wald sowie Meterware, Scheitholz und Hackschnitzel ab Lager/Betrieb an (siehe Tabelle 5).

Für die Versorgung einer Holzextraktionsanlage mit Rinde, Hackschnitzel, Säge- und Hobelräppen ab Lager/Betrieb sind in erster Linie Säge- und Hobelwerke sowie Restholzgroßhändler mögliche Partner. Interessant könnte es auch sein, ein bestehendes Sägewerk mit einer Extraktionsanlage als zusätzlichen Wertschöpfungsschritt zu ergänzen. Auf diese Option wird im Kapitel 5 Geschäftsmodelle genauer eingegangen.

Tabelle 5 : Holzsortimente der einzelnen Anbietergruppen der Schweizer Holzwirtschaft (In Anlehnung an (Hartmann, Kaltschmitt, & Hofbauer, 2016))

| | Landwirte | Forstbetriebe | Betriebskooperationen, Holzverwertungsgenossenschaften | Säge-/ Hobelwerke | Restholz- grosshändler |
|--------------------|------------------------------|---------------|--|-------------------|------------------------|
| Ab Wald | Meter-Ware | × | × | × | |
| | Hackschnitzel mit Rinde | × | × | × | |
| | Rinde | | × | × | × |
| Ab Lager / Betrieb | Meterware | × | × | × | |
| | Schwartens & Spreissel | | | × | × |
| | Scheitholz | × | × | × | |
| | Hackschnitzel mit/ohne Rinde | | × | × | × |
| | Rinde | | | × | × |
| | Sägespäne | | | × | × |
| | Hobelräppen | | | × | × |

Legende: x = «mehrheitlich im Angebot», Ȣ = «teilweise im Angebot»

3.4 Verfügbare Menge Schweizer Holz

3.4.1 Holzernte 2017

Überblick

In der Schweiz wurden im Jahr 2017 gemäss der Schweizerischen Forststatistik knapp 4.7 Mio. m³ Holz geerntet (siehe Tabelle 6). 64 % davon war Nadelholz, 56 % Laubholz. Betrachtet man die geernteten Holzsortimente, zeigt sich, dass total 50 % als Stammholz weiterverarbeitet werden, 11 % fliessen in den Kanal des Industrieholzes und 39 % werden als Energieholz genutzt. Das Energieholz fällt zu 59 % in Form von Hackschnitzeln und zu 41 % als Stückgut an. Vergleicht man die Anteile der Sortimente von Nadelholz und Laubholz, wird ersichtlich, dass 70 % der Nadelholzernte als Stammholz genutzt wird, beim Laubholz hingegen werden 71 % direkt energetisch genutzt.

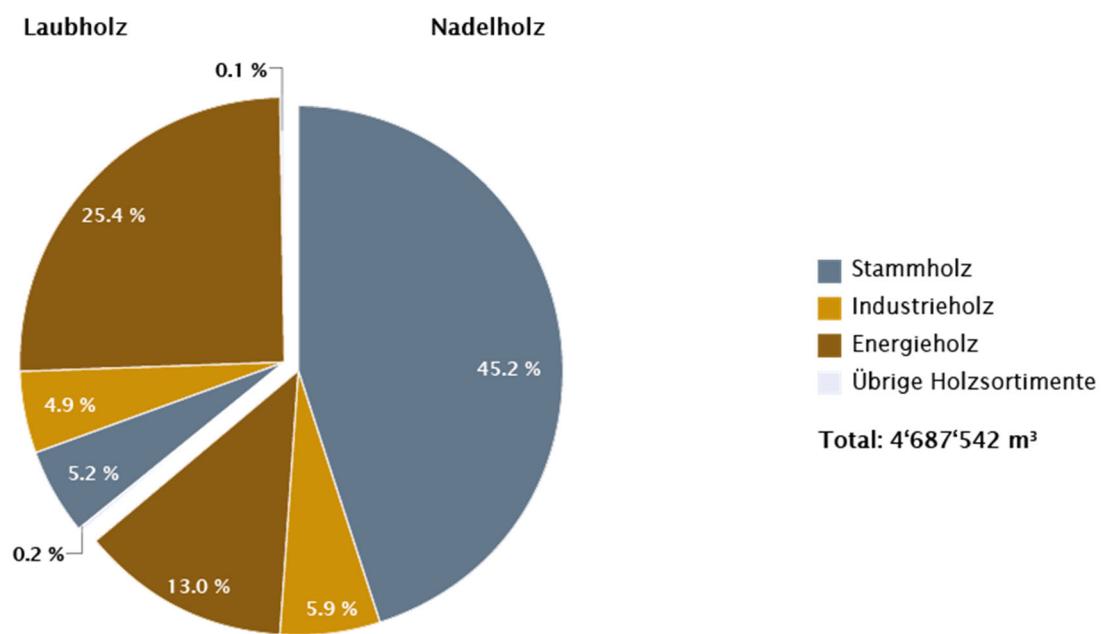


Diagramm 4: Holzernte 2017 (Quelle: BFS – Schweizerische Forststatistik, 2018)

Tabelle 6: Holzsortiment 2017 in m³ (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018)

| | | |
|-------------------------------|------------------|-----------|
| Gesamt | Total | 4'688'000 |
| | Nadelholz | 3'014'000 |
| | Laubholz | 1'674'000 |
| Stammholz | Total | 2'366'000 |
| | Nadelholz | 2'121'000 |
| | Laubholz | 246'000 |
| Industrieholz | Total | 506'000 |
| | Nadelholz | 275'000 |
| | Laubholz | 232'000 |
| Energieholz | Total | 1'801'000 |
| Stück-Energieholz | Nadelholz | 210'000 |
| | Laubholz | 532'000 |
| Hack-Energieholz ² | Nadelholz | 400'000 |
| | Laubholz | 658'000 |
| Übrige Holzsortimente | Total | 14'000 |
| | Nadelholz | 8'000 |
| | Laubholz | 6'000 |

Regionale Verteilung Holzernte

Vergleicht man die Holzernte in den verschiedenen Regionen der Schweiz, werden deutliche Unterschiede ersichtlich: Im Kanton Bern ist sie am grössten, gefolgt von den Kantonen Zürich, Waadt, Graubünden und Aargau. In den schwer zugänglichen Gebieten der Alpen und auf der Alpensüdseite ist die Holzernte am geringsten (siehe Abbildung 22). Dies korreliert mit der Veränderung des Holzvorrats, der insbesondere im Alpenraum zu-, im Mittelland hingegen abnimmt (siehe Kapitel 3.1).

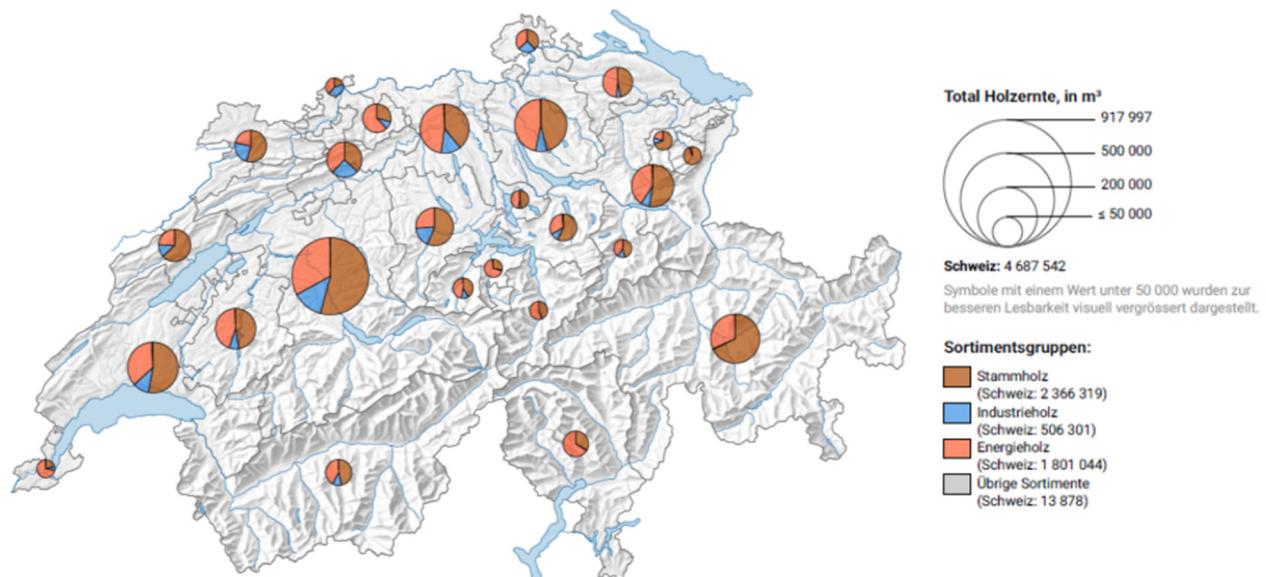


Abbildung 22: Holzernte 2017 (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018)

Tendenziell ist die Holzernte von 2016 zu 2017 gestiegen, in insgesamt 18 Kantonen nahm sie zu. Rückläufig war sie in den Kantonen Genf, Waadt, Neuenburg, Zug, Uri, Glarus und Appenzell Innerrhoden (siehe Abbildung 23).

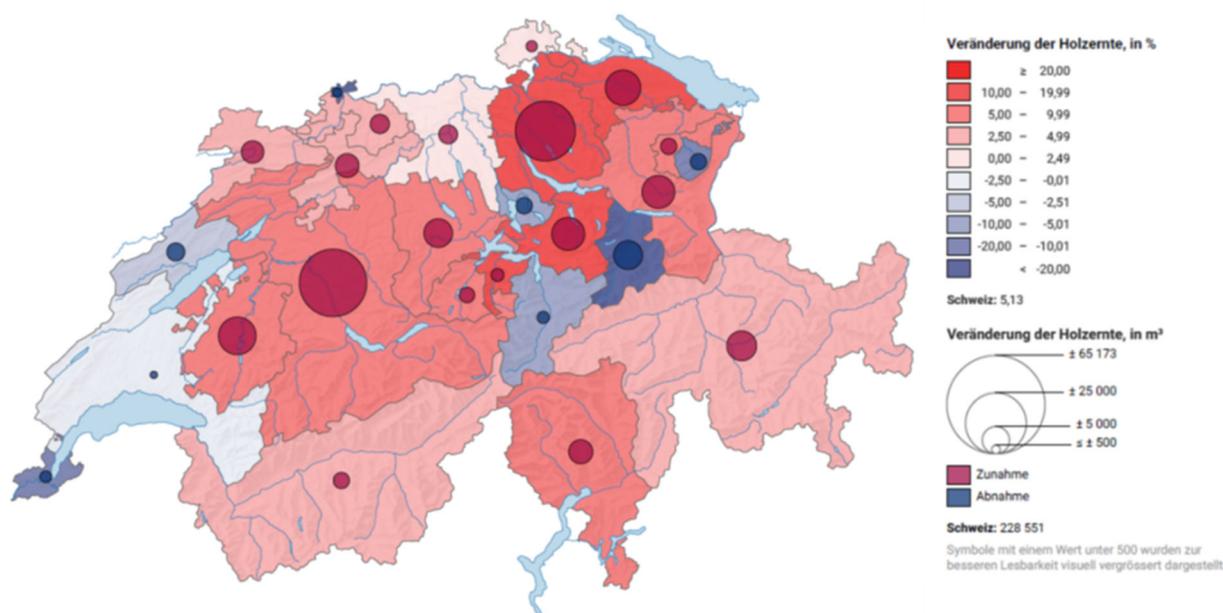


Abbildung 23: Veränderung der Holzernte 2016-2017 (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018)

Sortimente der Holzernte

Zur Beurteilung möglicher Geschäftsmodelle für eine Extraktionsanlage sind die verfügbaren Mengen der relevanten Sortimente (Meterware, Schwarten und Spreissel, Scheitholz, Hackschnitzel, Rinde, Säge- und Hobelspäne) für die ausgewählten Holzarten von Bedeutung. Gemäss dem Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU) wurden im Jahr 2017 im Bereich Nadelholz 274'582 Festmeter Industrieholz und 610'634 Festmeter Energieholz geerntet. Die geernteten Laubholzmengen liegen beim Industrieholz bei 231'719 Festmeter und beim Energieholz bei 1'190'410 Festmeter (siehe Tabelle 7).

Kennzahlen zu den einzelnen Holzarten sind in diesem Detaillierungsgrad nicht vorhanden. Die Schätzungen zur verfügbaren Menge Edelkastanie stammen von Danilo Piccioli, Direktor Federlegno.ch, der regionalen Arbeitsgemeinschaft für das Holz des Tessins. Gemäss seiner Aussage werden lediglich 315 m³ Edelkastanie als Stammholz genutzt, jedoch circa 25'000 m³ als Energieholz verwertet.

Bezüglich der verfügbaren Menge an Rinde weist das Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU) in der Tabelle zum Aufkommen von Rohholz und Altpapier 2017 über alle Holzarten 357'000 m³ Rinde aus. Bei einem Nadelholzanteil von 64 % an der gesamten Holzernte kann somit mit einer Menge von circa 228'500 m³ Nadelholzrinde gerechnet werden. Diese Menge wird durch die Umrechnungsfaktoren für Waldholz der Interessengemeinschaft Industrieholz plausibilisiert. Gemäss diesen beträgt der durchschnittliche Anteil von Rinde an einem Kubikmeter Holz 0.11 m³, was bei 2'210'522 Festmeter Nadelholz circa 233'000 m³ Rinde ergibt.

Tabelle 7: Gesamte Holzernte nach Sortiment 2017 (Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU), Tabelle 4.4)

| | Nadelholz | Laubholz | Edelkastanie |
|-------------------------|---|--------------|--------------------------|
| Stammholz | 2'120'522 Fm | 245'797 Fm | 315 m ³ |
| Industrieholz | 274'582 Fm | 231'719 Fm | |
| Energieholz | 610'634 Fm | 1'190'410 Fm | 25'000 m ³ ** |
| Stück-Energieholz | 210'190 Fm | 532'369 Fm | |
| Hack-Energieholz | 400'444 Fm | 658'041 Fm | |
| Rinde (Waldholz) | 357'000 m ³ (alle Holzarten) * | | |

Fm = m³ feste Holzsubstanz

* Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU), Tabelle 13.1, im Inland verfügbar (Inlandproduktion plus Einfuhren minus Ausfuhren)

** Angabe von Danilo Piccioli, Direktor federlegno.ch

Holznutzung nach Baumart

Für eine grobe Einschätzung der Anteile der einzelnen, für dieses Projekt relevanten Holzarten, können die Angaben des Landesforstinventars (LFI) zur jährlichen Nutzung betrachtet werden. Die vom LFI ausgewiesenen Mengen sind nicht direkt mit den Daten zur Holzernte des Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU) vergleichbar, da diese aus der Forststatistik stammen und dafür beispielsweise nicht die gleichen Baumteile erfasst und Ernteverluste nicht berücksichtigt werden. Die prozentualen Anteile der einzelnen Holzarten können jedoch als Indikatoren genutzt werden.

Wie in der Tabelle 8 ersichtlich, wird Fichte in Bezug auf die gesamte Nadelholznutzung am stärksten genutzt (Veränderungen LFI3 04/06 und LFI4 09/13). 68 % aller genutzten Nadelhölzer können dieser Baumart zugeordnet werden. Die Weisstanne macht einen Anteil von 24 % an der gesamten Nadelholznutzung aus, die Waldkiefer sowie die Lärche mit 5 respektive 2 % verfügen hingegen nur über einen geringen Anteil.

Bei den Laubbäumen ist die Buche die Baumart, die am häufigsten genutzt wird. Die Stieleiche und die Edelkastanie machen lediglich 3.7 % respektive 0.6 % der jährlichen Lauholznutzung aus.

Tabelle 8: Jährliche Holznutzung nach Baumart (Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 199803: Nutzung, LFI3 04/06 und LFI4 09/13)

| | Jährliche Nutzung [m ³] | Anteil in % an Total Nadelbäume/Laubbäume | Anteil in % an Total |
|-------------------------|-------------------------------------|---|----------------------|
| Nadelbäume total | 5'055'000 | 100 % | 72% |
| Weisstanne | 1'207'000 | 23.9% | 17.1% |
| Lärche | 126'000 | 2.5% | 1.8% |
| Fichte | 3'427'000 | 67.8% | 48.7% |
| Arve | 11'000 | 0.2% | 0.2% |
| Waldkiefer | 239'000 | 4.7% | 3.4% |
| Sonstige Nadelbäume | 4'805'000 | 95.1% | 68.3% |
| Laubbäume total | 1'982'000 | 100% | 28% |
| Edelkastanie | 11'000 | 0.6% | 0.2% |
| Buche | 1'294'000 | 65.3% | 18.4% |
| Stieleiche | 73'000 | 3.7% | 1.0% |
| Sonstige Laubbäume | 604'000 | 30.5% | 8.6% |
| Total | 7'039'000 | | |

3.4.2 Rundholzeinschnitt Sägereien

Neben der gesamten Holzernte sind auch die Kennzahlen zum Rundholzeinschnitt in den Schweizer Sägereien interessant, da sie Aufschluss über die verfügbaren Restholzsortimente der Sägereien geben. Im Jahr 2017 wurden total 1'783'548 m³ Rundholz eingeschnitten, davon 1'705'492 m³ Nadelholz (96 %) und 78'056 m³ Laubholz (4 %). An dieser Gesamtmenge hatten die Fichte und die Weisstanne gemeinsam einen Anteil von 92 % und die Buche einen Anteil von 2 %. Insgesamt 61 % vom gesamten Rundholzeinschnitt konnten als Schnittholz gewonnen werden, 39 % fielen als Restholz an (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Rundholzeinschnitt in den Sägereien 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.01)

| | Nadelholz | Laubholz |
|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Total Rundholzeinschnitt | 1'705'492 m ³ | 78'056 m ³ |
| Total Schnittholz | 1'037'286 m ³ | 47'949 m ³ |
| Total Restholz | 668'206 m ³ | 30'107 m ³ |

Das Sägereirestholtz wurde gemäss der eidgenössischen Holzverarbeitungserhebung 2017 (BFS) mehrheitlich als Rohstoff in der Papier- und Zellstoffindustrie sowie in Plattenwerken eingesetzt, zu insgesamt 44 %. Knapp ein Viertel des Restholzes wurde von den Sägereien als Energieholz im eigenen Betrieb eingesetzt, weitere 22 % wurden als Energieholz an Dritte verkauft (siehe Diagramm 5).

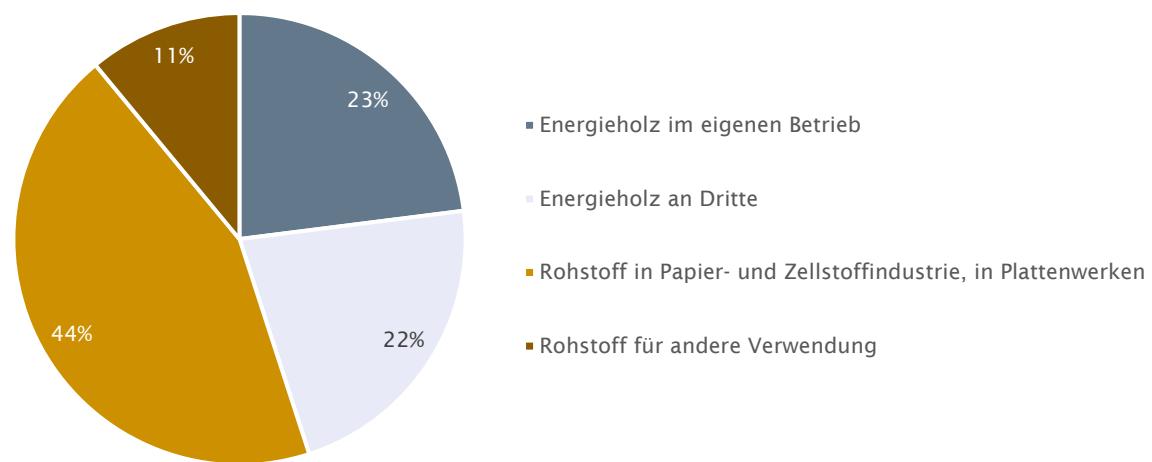


Diagramm 5 : Restholzverwertung in Prozent in den Sägereien, 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.03)

Diese Statistik der eidgenössischen Holzverarbeitungserhebung 2017 weist die Restholzverwertung als Total aller Holzarten aus. Der Anteil des Nadelholzes am Rundholzeinschnitt liegt bei 96 % (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.01). Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass im Jahr 2017 total 668'206 m³ Nadelholz als Restholz in den Sägereien anfiel. Circa 155'900 m³ davon wurde als Energieholz im eigenen Betrieb und circa 145'700 m³ als Energieholz an Dritte eingesetzt (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Restholzverwertung in den Sägereien, 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.03)

| | Total (alle Holzarten) [m ³] | Nadelholz (95.6 %, berechnet)* [m ³] | Laubholz (4.4 %, berechnet)* [m ³] |
|---|--|--|--|
| Restholz insgesamt | 698'313 | 667'800 | 30'600 |
| <i>Verwertung als:</i> | | | |
| Energieholz im eigenen Betrieb | 162'933 | 155'800 | 7'100 |
| Energieholz an Dritte | 152'305 | 145'600 | 6'700 |
| Rohstoff in Papier- und Zellstoffindustrie, in Plattenwerken | 305'721 | 292'300 | 13'400 |
| Rohstoff für andere Verwendung | 77'347 | 74'000 | 3'400 |

* Ergebnis gerundet auf 100er-Stelle

Regionale Verteilung der Sägereien

Neben der grundsätzlichen Verfügbarkeit der Sortimente ist auch die regionale Verteilung der anfallenden Resthölzer für die Beurteilung der Geschäftsmodellvarianten für eine Extraktionsanlage interessant. Im Diagramm 6 ist die Ernte von Industrie-Nadelholz und Energie-Nadelholz pro Kanton im Jahr 2017 dargestellt. In den Kantonen Bern und Graubünden wird am meisten Energieholz aus Nadelhölzern geerntet, gefolgt von Zürich und Fribourg. Beim Industrieholz aus Nadelhölzern ist die Ernte im Kanton Bern mit Abstand am grössten, an zweiter und dritter Stelle folgen die Kantone Waadt und Luzern.

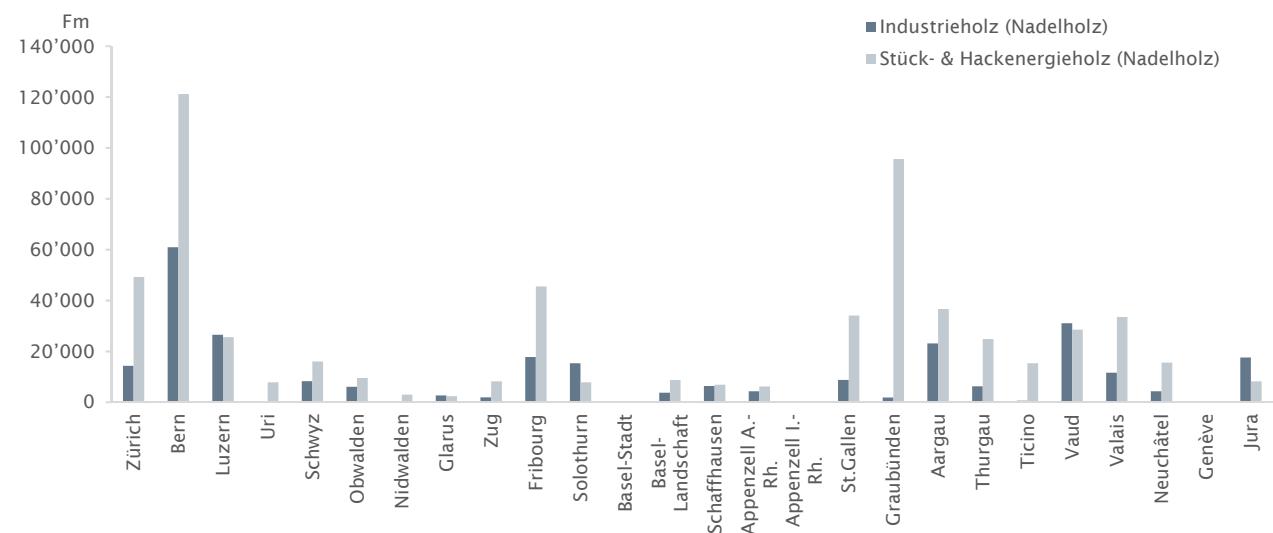


Diagramm 6 : Industrieholz- und Energieholz-Ernte nach Kanton 2017, in Fm (Datenquelle: Schweizerische Forststatistik, Jahrbuch Wald & Holz 2018 (BAFU))

Als Ergänzung zur Holzernte sind im Diagramm 7 die Anzahl Sägewerke pro Kanton, aufgeteilt nach der Rundholz-Einschnittmenge, abgebildet:

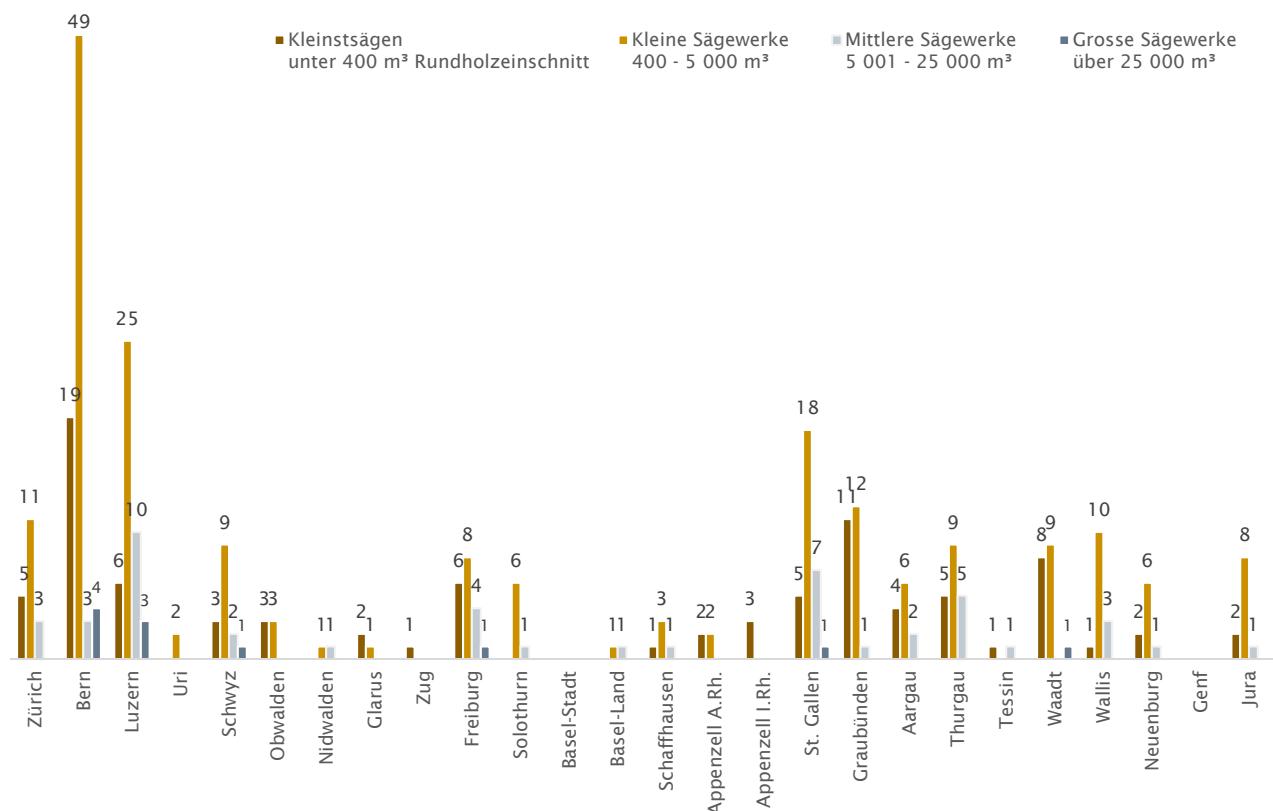


Diagramm 7 : Anzahl Sägereien nach Kantonen (Datenquelle: (STAT-TAB – interaktive Tabellen (BFS), 2017)

Die gesamte Anzahl an Sägewerken ist in den Kantonen Bern (75), Luzern (44) und St. Gallen (31) am höchsten. Betrachtet man nur die grossen Sägewerke mit über 25'000 m³ Rundholzeinschnitt, zeigt sich, dass es nur in den Kantonen Bern und Luzern vier respektive drei grosse Sägewerke sowie in den Kantonen Schwyz, Freiburg, St. Gallen und Waadt je ein grosses Sägewerk gibt.

Grundsätzlich scheint es, dass eine höhere Anzahl an Sägewerken pro Kanton mit einer grösseren Nadelholzernte einhergeht. Es gibt aber auch Ausnahmen wie der Kanton Aargau, wo sich lediglich 12 Sägewerke befinden, die geerntete Menge Nadelholz aber jene der meisten anderen Kantone übersteigt (ähnlich beim Kanton Waadt). Werden lediglich die mittelgrossen und grossen Sägewerke betrachtet, scheint kein Zusammenhang zwischen Anzahl Sägewerke und Nadelholzernte zu bestehen. Es ist davon auszugehen, dass diese das Rundholz meist aus der ganzen Schweiz sowie aus dem grenznahen Ausland beziehen.

Einen Überblick über die Verteilung der Nadelholz-Sägewerke in der Schweiz gibt auch die Mitgliederkarte des Verbands Holzindustrie Schweiz. Diese verteilen sich grösstenteils über das Flachland zwischen Genfer- und Bodensee und liegen somit auch im Gebiet, wo die umfangreichsten Bestände vorhanden sind und die grössten Holzernten anfallen (vgl. Kap. 2.2.2). In den Bergkantonen sowie den schwer zugänglichen Gebieten der Alpensüdseite befinden sich gemäss der Mitgliederkarte von HIS eher wenig Sägewerke.

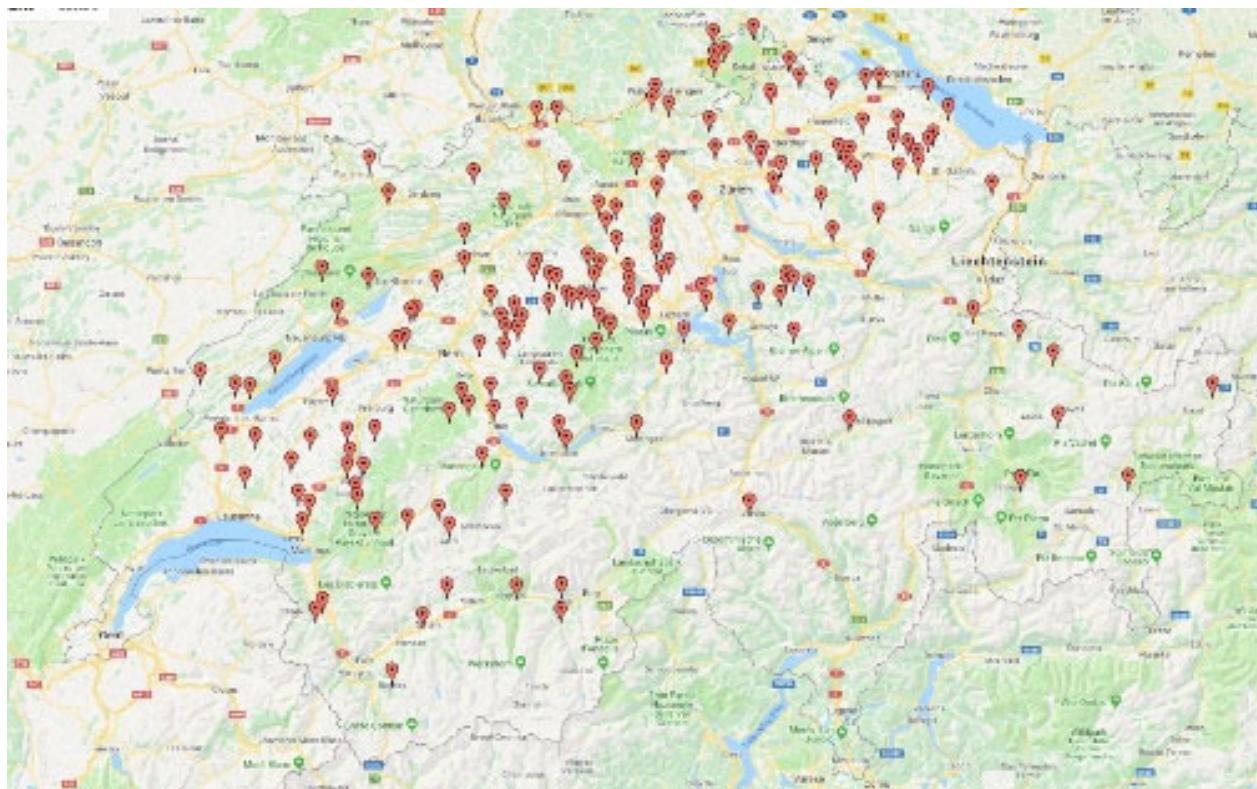


Abbildung 24: Nadelholzsägewerke (Mitglieder) des Verbands Holzindustrie Schweiz (Holzindustrie Schweiz, 2017)

3.5 Zwischenfazit

Generell ist der Holzvorrat in der Schweiz in den letzten Jahren gestiegen, im Mittelland hingegen ist die Nutzungsrate insbesondere von Nadelholz hoch und dadurch auch der Holzvorrat leicht rückläufig. Durch den Klimawandel ist mittelfristig mit einem Rückgang der meisten Nadelhölzer im Mittelland und mit einem Anstieg ihrer Verbreitung in den Alpen zu rechnen. Die Kastanien- und Stieleichenpopulation wird hingegen wohl von den höheren Temperaturen profitieren und könnte im Schweizer Mittelland zunehmen.

Die für eine Extraktion interessanten Restholz-Sortimente fallen sowohl bei der Ernte im Wald wie auch beim Rundholzeinschnitt in den Sägewerken an. Die in der Schweiz anfallenden Mengen von circa 506'300 Fm Industrieholz, 1'801'000 Fm Energieholz und circa 357'000 m³ Rinde sowie die zusätzlichen circa 695'600 m³ Restholz der Sägereien belegen das grosse Potenzial für eine Extraktionsanlage für Holzhaltsstoffe in der Schweiz.

Dabei ist die Fichte mit einem Anteil an der jährlichen Nutzung von 68 % das mengenmässig interessanteste Nadelholz, je nach Geschäftsmodell kann aber auch die Nutzung der weiteren Nadelholzarten wie Weisstanne, Waldkiefer und Lärche gewinnversprechend sein. Und auch im Bereich Laubholz gibt es bezüglich der Verfügbarkeit von Ressourcen interessante Möglichkeiten, dies zeigen unter anderem die grossen Mengen, welche für die Energieerzeugung eingesetzt werden. 66% des Energieholzes im Jahr 2017 war Laubholz.

Die Analysen zeigen weiter, dass insbesondere die Edelkastanie im Tessin ein sehr grosses Potenzial birgt. Zum einen werden aktuell bereits circa 25'000 m³ Kastanienholz ausschliesslich für die Energieerzeugung genutzt, und zum anderen kann davon ausgegangen werden, dass die Nutzung noch deutlich erhöht werden könnte.

Dies wäre ein mögliches Beispiel für die Schaffung einer neuen Wertschöpfungskette mit zusätzlich geerntetem Holz, mit dem primären Nutzen der Extraktion von Holzhaltsstoffen. Denn sinnvollerweise würde eine solche Wertschöpfungskette in einer Region aufgebaut, in der auch zukünftig ein ausreichend grosses Restholzvorkommen erwartet werden kann.

Falls bestehende Wertschöpfungsketten mit einem Extraktionsschritt ergänzt werden, kommen als Standorte insbesondere die erntestarken Kantone im Mittelland in Frage, wie Bern, Graubünden, Freiburg, Aargau und Waadt. Je nach Geschäftsmodell ist der Standort aber auch an ein bestehendes Sägewerk gekoppelt, dessen Restholzsortimente direkt für die Extraktion eingesetzt werden.

4 Charakterisierung der Extrakte aus heimischer forstlicher Biomasse

Die chemische Zusammensetzung von Extrakten von Holz oder anderen Gewebearten heimischer Baumarten ist derzeit nur punktuell bekannt. Bislang fehlt eine systematische Charakterisierung der Extrakte nach einer einheitlichen Methodik, die eine direkte Vergleichbarkeit ermöglicht. Im Folgenden wird die Charakterisierung von Extrakten von sieben für die Schweiz wirtschaftlich relevanten Baumarten beschrieben. Dafür wurden die Gewebe von Nadeln, Feinästen, Rinde und Holz (Kern- und Splintholz) mit Hilfe von Lösemitteln aufsteigender Polarität im Labormassstab extrahiert und die Gesamtausbeute der Extraktion sowie einzelne Stoffgruppen quantifiziert. Die dabei eingesetzte Methodik und die Ergebnisse wurden detailliert in Piccand et al. (2019) beschrieben.

4.1 Methodik

Proben unterschiedlicher Gewebetypen (Kernholz, Rinde, Feinäste und ggf. Nadeln) der Baumarten Fichte, Kiefer, Lärche, Eiche, Buche Arve und Tanne wurden frisch geerntet durch Schweizer Forstbetriebe gesammelt. Nach Aufarbeitung der Gewebe zu extrahierbaren Partikeln erfolgte eine stufenweise Extraktion mit Hilfe der Lösemittel Hexan, Methanol und Wasser. Eine chemische Charakterisierung der Extrakte durch verschiedene Chromatographie-basierte Analysemethoden ermöglichte eine detaillierte Bestimmung der Stoffgruppen Saccharide, Fettsäuren, Harzsäuren, Terpene, Tannine, phenolische Verbindungen. Eine gravimetrische Bestimmung der getrockneten Extrakte ermöglichte zudem die Bestimmung der Gesamtausbeute der Extraktion (**Abbildung 25**).

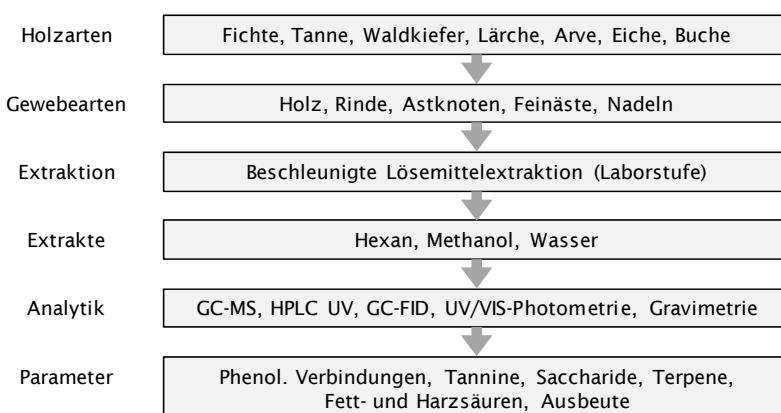


Abbildung 25: Übersicht zur Methodik der Charakterisierung der Extrakte

4.1.1 Rohstoffe

Insgesamt 29 Gewebeproben aus sieben Baumarten wurden an drei Standorten im Kanton Bern/Schweiz für die Extraktion gesammelt (Übersichtliche Darstellung in Tabelle 1 im Anhang):

- ▶ Bätterkinden (Höhe: ca. 500 m ü. M): Rotbuche (*Fagus sylvatica*), Europäische Lärche (*Larix decidua*), Stieleiche (*Quercus robur*), Weißtanne (*Abies alba*) und Fichte (*Picea abies*)
- ▶ Münchenbuchsee (Höhe: ca. 600 m ü. M): Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), alle Gewebeproben von Astknoten außer Arve (*Pinus cembra*)
- ▶ Grindelwald (Höhe: ca. 2000 m ü. M): Arve (*Pinus cembra*)

Die Rinden wurden manuell von den Stämmen entfernt, ebenso wie die Nadeln von den gesammelten Zweigen. Splint- und Kernholz von Lärche, Eiche und Kiefer wurden getrennt. Für jede Gewebeart wurden Proben von je drei Bäumen der jeweiligen Art zu gleichen Teilen gemischt.

Die Proben wurden in Würfel mit einer Kantenlänge von 0,5-1,5 cm geschnitten und gefriergetrocknet (Alpha 1-4 LDplus, Christ). Der Anfangsfeuchtegehalt (MC) wurde für jede Probe dreimal bestimmt. Die gefriergetrockneten Proben wurden mit einer Hammermühle (C 100 UPZ, Hosokawa Alpine, Siebweite 1.5mm) gemahlen und bis zur Extraktion bei -20°C gelagert.

4.1.2 Extraktion

Die Extraktionen wurden mit einer Reihe von Lösemitteln mit aufsteigender Polarität (Hexan bei 60°C, Methanol bei 90°C und mit Wasser bei 120°C) durchgeführt. Diese sukzessive Extraktion ermöglichte die weitgehende Extraktion aller apolaren sowie polaren Inhaltsstoffe aus dem Gewebe. Die Durchführung der Extraktionen erfolgte im Labormassstab (Accelerated Solvent Extraction ASE 200, Dionex, 11ml-Zellen).

In jedem Extraktionsschritt wurden jeweils 20 ml Lösungsmittel durch die Zellen geleitet und die Extrakte aus jedem Extraktionsschritt getrennt aufgefangen und analysiert. Alle Extraktionen erfolgten in dreifacher Wiederholung. Die angegebenen Werte der Extraktausbeute und der chemischen Charakterisierung sind jeweils Mittelwerte aus drei unabhängig voneinander durchgeföhrten Extraktionen.

Von jedem Hexanextrakt wurde ein 3-ml-Aliquot entnommen und bis zur Analyse bei -20°C gelagert. Die Hexan- und Methanolextrakte wurden für eine Dauer von ca. 3 h unter Vakuum bei 65°C getrocknet, Wasserextrakte gefriergetrocknet und ebenfalls bis zur Analyse bei -20°C gelagert.

4.1.3 Chemische Charakterisierung

Fett- und Harzsäuren in den Extrakten wurden nach einem Silylierungsschritt durch Gaschromatographie in Kopplung mit Massenspektroskopie (GC-MS) quantifiziert; Terpene mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (Thermal Desorption Gas Chromatography; TD-GC/MS) und phenolische Monomere sowie kondensierte Tannine mittels Flüssigchromatographie (High Pressure Liquid Chromatographie; HPLC-UV). Schliesslich wurden Monosaccharide und Polysaccharide mittels Flammenionisationsdetektor (GC-FID) quantifiziert. Ein detaillierter Beschrieb der Methodik ist in Piccand et al., 2019 aufgeführt.

4.2 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Gesamtausbeute und die Gehalte an Extrakten unterschiedlicher Stoffgruppen beschrieben. Die Darstellungen umfassen die Gewebeproben mit dem jeweils höchsten Stoffgehalt in den einzelnen Stoffgruppen. Die Ergebnisse für alle Gewebeproben und Stoffgruppen können Tabelle 1 und Tabelle 2 im Anhang entnommen werden.

4.2.1 Gesamtausbeute

Die höchsten Ausbeuten bei der sukzessiven Extraktion der Gewebeproben (Summe aller drei Extraktionsschritte) konnten für die Rindengewebe gemessen werden. Dabei lagen die Gesamtausbeuten zwischen 18,6% (Buchenrinde) und 39% (Rinden der Fichte und Arve). Die Erträge der aufeinanderfolgenden Extraktionen mit Hexan, Methanol und Wasser der verschiedenen Pflanzengewebe sind in Tabelle 1 im Anhang dargestellt. Gewebearten mit einer Gesamtausbeute über 20% sind in Abbildung 20 dargestellt. Neben den Rindengeweben weisen auch andere, einzelne Gewebemuster eine Gesamtausbeute bei der Extraktion von über 20% auf, wie z.B. die Feinäste der Waldkiefer, Nadeln unterschiedlicher Baumarten (Gesamtausbeute zwischen 30,4% und 35,3%) und das Astknotenholz der Lärche und Arve. Aufgrund der gewebespezifischen Unterschiede in der Zusammensetzung der Inhaltsstoffe ergeben sich wenig überraschend grosse Unterschiede in der Ausbeute bei den drei Teilextrakten (Hexan-, Methanol- und Wasserextrakt). Ausser den hier analysierten Gewebeproben weist die Kastanie (*Castanea sativa*) als in der Schweiz heimische Holzart ebenfalls eine hohe Gesamtausbeute bei der Extraktion auf. Die Gesamtausbeute bei der Extraktion ist hier sowohl in der Rinde (26,3%) als auch im Kernholz (19,2%) vergleichsweise hoch (Kakavas, 2018).

Bei den Hexanextrakten, die unpolare Inhaltsstoffe wie Harzsäuren, Fettsäuren und Terpene enthalten, zeigten die Waldkiefer und die Arve auf Grund des hohen Harzgehaltes und des hohen Gehaltes an Fettsäuren unabhängig vom anatomischen Gewebe höhere Ausbeuten (2,8-8%) als andere Arten. Besonders niedrige Ausbeuten bei der Hexanextraktion können für die Gewebetypen der beiden Laubholzarten Buche und Eiche gemessen werden (zwischen 0,3 und 1,5%). Dieser Umstand kann auf die Abwesenheit von Harzen im Holzgewebe der heimischen Laubhölzer zurückgeführt werden.

Die höchsten Ausbeuten konnten durch die Methanolextraktion erzielt werden. Dabei werden alle polaren Verbindungen, z.B. Saccharide oder phenolischen Verbindungen (darunter Tannine) herausgelöst. Alle Rindenarten wiesen hier Ausbeuten von über 10% auf, bei einzelnen Baumarten sogar bis zu etwa 25% (Arve und Fichte). Darüber wiesen unterschiedliche Holzgewebe, z.B. Eichenkernholz (8.1%) und insbesondere Astknotengewebe (Arve 13.5%, Weisstanne 13.0%) sowie Feinäste (zwischen 6.4% und 11.0%) höhere Ausbeuten auf.

Bei der nachfolgenden Extraktion mit Heisswasser (als dritter Extraktionsschritt) werden stark polare Verbindungen, die in der vorhergehenden Methanolextraktion noch nicht herausgelöst wurden, extrahiert. Die Ausbeute der wässrigen Fraktion zeigte die höchsten Werte für die Gewebetypen Rinde, Zweige und Nadeln. Die maximale Ausbeute (14,8%) wurde für Lärchenastknotenholz gemessen. Lärche zeigte auch die höchsten Ausbeuten bei Kern- und Splintholz (7.7% und 2.6%, andere rund 2.4-2.9% bei Kernholz und 1.4-2.1% bei Splintholz).

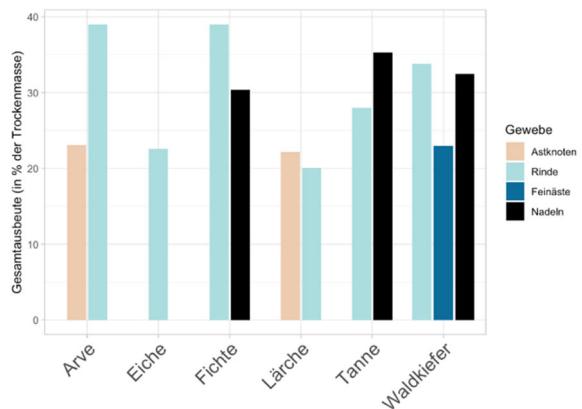


Abbildung 26: Gewebearten mit einer Gesamtextraktausbeute von mehr als 20%

4.2.2 Extraktionsausbeute einzelner Stoffgruppen

Der Gesamtgehalt der einzelnen Stoffgruppen (z.B. Harz- und Fettsäuren, Terpene, Polyphenole, Saccharide) in einem Gewebe, wurde mit der Summe der Extraktionsergebnisse der spezifischen Verbindungen in drei aufeinanderfolgenden Extraktionen mit Lösungsmittel (Hexan, Methanol und Wasser) bei zunehmender Polarität ermittelt.

In fast allen Proben war der Gehalt an Harzsäuren höher als der an Fettsäuren. Das Arvenkernholz hatte mit 1,6% den höchsten Anteil an Fettsäuren. Die Arten und Gewebe mit einem höheren Anteil an Fettsäuren als 0.8% sind in Abbildung 28 dargestellt. Des Weiteren wiesen die Rindenproben relativ hohe Gehalte an Harzsäuren auf, hier hatte die Rinde der Fichte einen vergleichbaren Wert wie jener der Arve, beide ca. 1%. Bei den flavanoiden Verbindungen hatte das Kernholz der Eiche den höchsten Wert mit 2,8%, gefolgt vom Astknotenholz der Arve mit 2,4 %. Die Arten und Gewebe mit einem Harzsäuregehalt über 1.3% sind in Abbildung 29 dargestellt.

Terpene waren vor allem in den Feinästen von Fichte und Kiefer, aber auch in Astknoten der Kiefer mit je 0.5% vorhanden. Die Arten und Gewebe mit einem Terpengehalt über 0.3% sind in Abbildung 27 dargestellt. Die Gesamtmenge der phenolischen Verbindungen (TPC) ist in Abbildung 30 dargestellt, hier wurden Arten und Gewebe mit einem TPC über 15% dargestellt, auffällig ist der sehr hohe TPC-Anteil in der Rinde der Arve von über 35%.

4.2.3 Monoterpen

Die höchsten Monoterpenkonzentrationen konnten in Feinästen, Nadeln und in Rindengeweben einzelner Baumarten gemessen werden. Feinäste der Waldkiefer (0.53%), Fichte (0.57%) weisen dabei die höchsten Konzentrationen auf. Ähnlich hohe Konzentrationen konnten in den Rinden der Arve (0.38%), Weisstanne (0.45%) und Fichte (0.28%) und in den Nadeln der Weisstanne (0.31%) nachgewiesen werden (Abbildung 27).

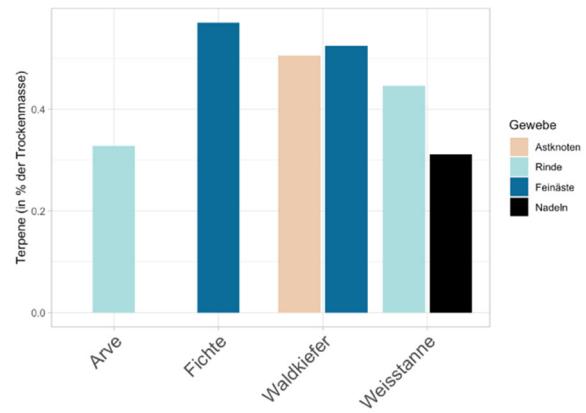


Abbildung 27: Monoterpengehalt unterschiedlicher Gewebearten. Darstellung umfasst Gewebearten mit einem Terpengehalt von mehr als 0.3%

4.2.4 Fettsäuren

Fettsäuren dienen dem Baum zur Energiespeicherung und sind in diesem Zusammenhang vor allem im Gewebe von Nadelbäumen beschrieben. Die höchste Konzentration an Fettsäuren konnten auch in der vorliegenden Studie in Gewebetypen von Nadelbäumen gemessen werden. **Abbildung 28** zeigt Gewebearten mit einem Fettsäureanteil von mehr als 0.8% in der Trockenmasse. In unterschiedlichen Gewebetypen der Arve können Fettsäurekonzentrationen von etwa 1% (Astknoten und Rinde) bis zu etwa 1.6% (Kernholz) gemessen werden. Einige weitere Rinden von Nadelbäumen, wie z.B. Fichte (1.15%) und Weisstanne (0.87%) weisen ebenfalls höhere Konzentrationen auf.

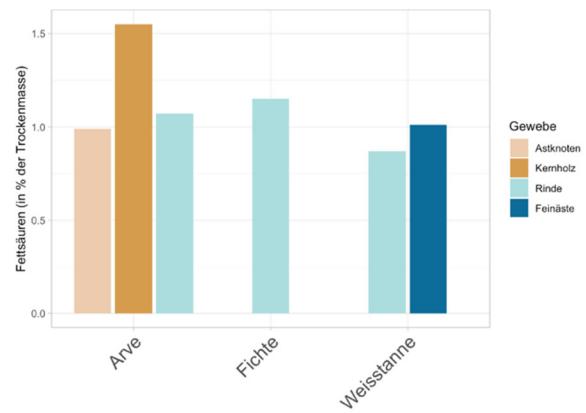


Abbildung 28: Fettsäuregehalt von mehr als 0.8 % in unterschiedlichen Gewebetypen

4.2.5 Harzsäuren

Harzsäuren als Hauptbestandteil der Nadelbaumharze wurde vor allem in harzreichen Geweben von Nadelbäumen nachgewiesen. So besitzt beispielsweise die Waldkiefer als Baumart mit bekannterweise hohem Harzanteil im Holzgewebe vergleichsweise hohe Konzentrationen an Harzsäuren in unterschiedlichen Gewebetypen (Splintholz 0.9%, Kernholz 2.6%, Rinde 1.0%, Astknoten 2.8%, Feinäste 1.2%). Deutliche Unterschiede konnten im Rindengewebe unterschiedlicher Nadelbaumarten gemessen werden. Hier liegen die Konzentrationen zwischen 4.5% (Arve) und 0.3% (Lärche). Keine Harzsäuren konnten im Holzgewebe oder im Rindengewebe der Laubhölzer Buche und Eiche gemessen werden und sind aufgrund der Abwesenheit von Harzkanälen in diesen Gewebetypen nachvollziehbar.

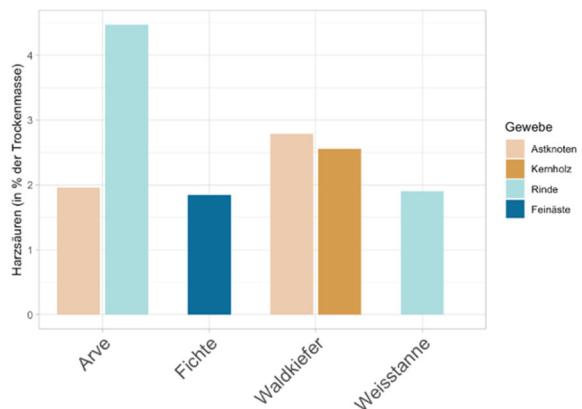


Abbildung 29: Harzsäuregehalt (Diterpene) von mehr als 1.5% in unterschiedlichen Gewebetypen

4.2.6 Phenolische Verbindungen

Phenolische Verbindungen umfassen unterschiedliche Untergruppen, die für eine kommerzielle Nutzung von Extrakten von Interesse sind. Neben kondensierten und hydrolysierbaren Tanninen sind dies niedermolekulare phenolische Verbindungen, zu denen unter anderem Lignanen, Silbene und monomere Flavanoide zählen. Eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Stoffgruppen der phenolischen Verbindungen wurde in Piccand et al. 2019 vorgenommen. Im Folgenden wird der Gesamtgehalt an phenolischen Verbindungen mit Hilfe des Parameters TPC (engl., Total Phenolic Compounds) dargestellt. Vor allem Kernholz- und Rindengewebe weisen im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen die höchsten Gehalte an phenolischen Verbindungen auf. Aus dem Kernholz von Lärche (15.4%), Eiche (12.0%) und Waldkiefer (9.0%) können jeweils grosse Mengen an phenolischen Verbindungen extrahiert werden.

Auch unterschiedliche Rindengewebe wiesen hier hohe Ausbeuten auf. Für Fichtenrinde konnte ein Gehalt an phenolischen Verbindungen von 17.0%, für Arvenrinde sogar von 36.1% gemessen werden. Einzelne weitere Gewebearten (z.B. Astknoten Arve 15.7%, Astknoten Weisstanne 14.1%, Nadeln Weisstanne 11.2%, Nadeln Fichte 13.5%) wiesen ebenfalls erhöhte Gehalte an extrahierbaren phenolischen Verbindungen auf. Besonders hervorzuheben sind die Ergebnisse der in Piccand et al. 2019 durchgeführte Detailanalyse zur stofflichen Zusammensetzung der phenolischen Verbindungen.

Das Kernholz der Eiche und verschiedene Rindenarten (hier vor allem Fichte und Arve) wiesen dabei besonders hohe Anteile an Tanninen (Gerbstoffen) auf, für die etablierte kommerzielle Nutzungsformen vorliegen.

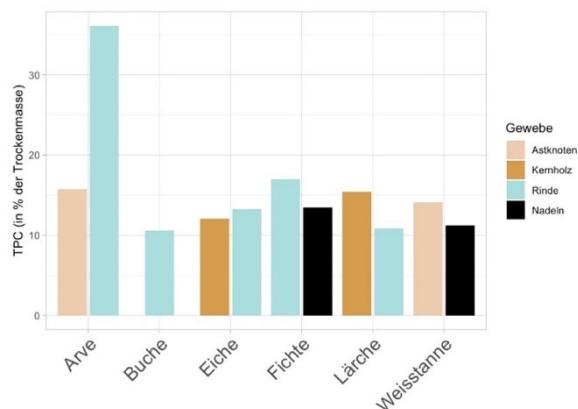


Abbildung 30: Gehalt an phenolischen Verbindungen (TPC, Total Phenolic Compounds) von mehr als 10.0% in unterschiedlichen Gewebearten

4.3 Schlussfolgerung

Insgesamt 29 Gewebearten heimischer forstlicher Biomasse, darunter Kernholz, Splintholz, Rinde, Astknotengewebe, Zweige und Nadeln von sieben verschiedenen Baumarten wurden gesammelt und hinsichtlich ihres Gehaltes an verschiedenen Inhaltsstoffen (Terpenen, Fett- und Harzsäuren, Saccharide und phenolischen Verbindungen, darunter Tannine) mittels Extraktion im Labormassstab analysiert. Durch die Arbeit liegt erstmalig eine einheitlich erhobene Übersicht zur stofflichen Zusammensetzung und zur Ausbeute von Inhaltsstoffen heimischer forstlicher Biomasse vor. Die Daten, können als Grundlage für eine weitere Diskussion zur Realisierung einer industriellen Gewinnung von Extraktstoffen aus Biomasse aus Schweizer Wäldern eingesetzt werden.

In Hinblick auf die aktuell industriell gewonnenen Stoffgruppen holbasiert Extrakte (Terpene und phenolische Verbindungen) lassen sich anhand der Ergebnisse Schlussfolgerungen hinsichtlich ihrer Eignung als Rohstoffgrundlage für industrielle Prozesse ziehen. Einige der hier untersuchten harzreichen Nadelholzarten wiesen in ihren Geweben relevante Konzentrationen an Monoterpenen sowie Harzsäuren (Diterpenen) auf. Dazu gehörten unter anderem Waldkiefer, Arve und Fichte. Diese Holzarten sind sicherlich in Bezug auf Ihre stoffliche Zusammensetzung für die Gewinnung von Mono- und Diterpenen geeignet. Auf dem Weltmarkt werden diese Stoffgruppen aus Kuppelprodukten der Papier- und Zellstoffproduktion gewonnen (siehe 2.2.1). Der Trend in diesen Industrien geht zu immer grösseren Produktionseinheiten, mit Jahreskapazitäten von > 1 Mio. Festmeter/a. Es erscheint unwahrscheinlich, dass eine Erzeugung von Mono- und Diterpenen losgelöst von einem Hauptprodukt Zellstoff und in kleineren Produktionseinheiten rentabel gewonnen werden kann, insbesondere vor dem Hintergrund der Abwesenheit einer Zellstoffproduktion in der Schweiz zum aktuellen Zeitpunkt.

Für die phenolischen Verbindungen konnten in einer Reihe unterschiedlicher Gewebetypen hohe Konzentrationen im Gewebe und entsprechende Extraktionsausbeuten nachgewiesen werden. Verschiedene Kernholz- und Rindengewebe stellen am ehesten Gewebearten dar, die auf Grund ihrer mengenmässigen Verfügbarkeit als Rohstoff hier in Frage kommen. Hohe Anteile an phenolischen Verbindungen (darunter eine hohe Konzentration an Tanninen) konnte z.B. im Kernholz der Stieleiche nachgewiesen werden (in ähnlich hohen Konzentrationen wie im Kernholz der Edelkastanie). Noch höhere Konzentrationen können nur im Kernholz der Lärche nachgewiesen werden. Hier sind zudem grössere Menge niedermolekularer phenolischer Verbindungen extrahierbar, die vor allem für Anwendungen als bioaktive Wirkstoffe interessant sein könnten. Ähnliches gilt auch für Kernholzextrakte weiterer Baumarten, z.B. Waldkiefer und Arve, für die aber insgesamt niedrigerer Konzentrationen an phenolischen Verbindungen gemessen wurden. Sehr hohe Konzentrationen an phenolischen Verbindungen wurden zudem in unterschiedliche Rindengeweben nachgewiesen, z.B. für Fichten- und Arvenrinde. Grundsätzlich besitzen alle Rindengewebe relevante Mengen an phenolischen Verbindungen und machen sie damit zu potentiellen Ausgangsstoffen für eine stoffliche Gewinnung von phenolischen Verbindungen - darunter Tannine - im industriellen Massstab.

5 Geschäftsmodelle

5.1 Grundlagen für die Geschäftsmodellanalysen

Für die Betrachtung der verschiedenen Geschäftsmodelle mussten mehrere Annahmen getroffen werden. Diese lassen sich grundsätzlich mit unterschiedlich hoher Präzision bzw. Wahrscheinlichkeit treffen. Für eine einfachere Betrachtung wurden unterschiedliche Präzisionsstufen für die getroffenen Annahmen definiert, die an Hand einer Farbcodierung bei übersichtlicher Darstellung in **Tabelle 11** erkennbar sind:

- ▶ «belegbar»: Annahme ist anhand von Literatur- oder Marktdaten belegbar.
- ▶ «abschätzbar, mit hoher Sicherheit»: Annahme kann aus anderen Primärdaten mit hoher Wahrscheinlichkeit abgeleitet werden.
- ▶ «abschätzbar, mit geringer Sicherheit»: Annahme kann aus anderen Primärdaten mit geringer Sicherheit abgeleitet werden.
- ▶ «kaum abschätzbar, sehr geringe Sicherheit»: keine geeignete Datengrundlage verfügbar, allenfalls mit hoher Unsicherheit abschätzbar.

Rohstoffsortimente

Folgende Hackschnitzel-Rohstoffsortimente wurden definiert:

- ▶ Rinde, sortenrein Fichte oder Tanne (mengenmäßig wichtigste Baumarten, hohe Konzentration an phenolischen Verbindungen in der Rinde, Rinden-Hackschnitzel könnten zukünftig im Sägewerk unter Umständen sortenrein erzeugt werden).
- ▶ Rinde, Mischsortiment
- ▶ Holz (Laubholz), Kastanie oder Eiche (Baumarten mit ähnlich hoher Konzentration an hydrolisierbaren Gerbstoffen im Kernholz)
- ▶ Holz (Nadelholz), Kiefer, Lärche oder Arve (Holzarten mit erhöhter Konzentration bioaktiver phenolischer Verbindungen im Kernholz)
- ▶ Holz (Nadelholz), Fichte und Tanne (mengenmäßig wichtigste Baumarten)

Je nach Ort, wo die Sortimente anfallen, nach ihrer mengenmässigen Verfügbarkeit sowie nach Möglichkeiten für die weitergehende Nutzung der extrahierten Biomasse, wurden den einzelnen Geschäftsmodellen die ökonomisch potenziell sinnvollen Sortimente zugewiesen (Tabelle XY).

Ausbeute: Die zu erwartende Ausbeute bei Extraktion der unterschiedlichen Rohstoffsortimente setzt sich zusammen aus der langjährigen Erfahrung der BFH bei der Extraktion verschiedener Rinden- und Holz-Sortimente im Labormassstab und üblichen Ausbeuten bei der industriellen Extraktion von Kastanienholz. Die zu erwartende Ausbeute liegt zwischen 2.5 % (Nadelholz-Hackschnitzel Fi/Ta) und 12 % (Holz Eiche oder Kastanie).

Märkte und erwartete Erlöse: In Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Extrakte ergeben sich verschiedene mögliche Einsatzbereiche und Märkte. Unterschiedliche Annahmen wurden anhand der chemischen Zusammensetzung der Extrakte und in Anlehnung an etablierte Anwendungen und Märkte tropischer Extrakte getroffen. Die dabei erwarteten Erlöse wurden unter Annahme einer Vermarktung im Tonnen-Massstab abgeschätzt. Ein möglicher Markt für tanninreiche Extrakte bildet z.B. der Einsatz als Gerbmittel in der Ledergerbung. Auf diesem Markt können aktuell bei der Vermarktung tropischer Quebracho- und Mimosa-Extrakte Erlöse von 1.5 - 2 CHF/kg und für Kastanienholz-Extrakt Erlöse von 2.5 - 3 CHF/kg erzielt werden.

Tanninreiche Extrakte können auch als Grundstoffe für die Formulierung von Bindemitteln Anwendung finden, unter anderem für den Holzwerkstoffbereich. Auf diesem Markt werden aktuell Extrakte aus Quebracho, Mimosa und der Rinde der Monterey-Kiefer (*Pinus radiata*) vermarktet. Die in diesem Markt aufgerufenen Marktpreise liegen aktuell im Bereich von 1.8 - 2.5 CHF/kg. Die hohe Bioaktivität insbesondere der phenolischen Inhaltsstoffe (phenolische Monomere und Tannine) ist die Grundlage für mögliche Anwendungen der Extrakte mit Wirkstofffunktion. Dazu gehören Anwendungen, die auf eine Hemmung des Bakterien- und Pilzwachstums auf Oberflächen oder in Materialsystemen abzielen.

Aktuell ergeben sich in diesen Märkten erste Anwendungen als Wirkstoffe in den Bereichen Werkstoffe, Consumer Goods und Tierfutter. Die hierbei erzielten Erlöse konnten im Rahmen des Projekts mangels verlässlicher Quellen nicht eindeutig bestimmt werden. Bei vorsichtiger Abschätzung kann jedoch angenommen werden, dass für entsprechende Anwendungen Erlöse von über 2.5 CHF/kg erzielt werden können. Insbesondere trifft dies auf die sortenreinen Sortimente zu, da hier Produkte mit gut definierbarer stofflicher Zusammensetzung erzeugt werden können.

Die im Einzelnen getroffenen Annahmen zu Erlösen der Extrakte unterschiedlicher Rohstoffsortimente basieren auf unterschiedlich hoher Variabilität der Zusammensetzung der Extrakte (Reinsortimente gegenüber Mischsortimenten) sowie der Eignung einzelner Stoffgruppen für bestimmte Anwendungen.

Fertigungskosten: In der hier getroffenen Definition beinhalten die Herstellungskosten den nicht materialbezogenen Ressourceneinsatz des Herstellungsprozesses sowie weitere Kosten der Produktionsplanung und Qualitätssicherung. Die hierbei anfallenden Kosten setzen sich im Wesentlichen aus Kosten für Betriebspersonal und Energiekosten für den Prozess zusammen. Je nach Biomasse, Prozessführung, Anlagentechnologie, Skalierung, Automatisierungsgrad der Prozessanlage sowie betrieblichen Rahmenbedingungen (z.B. Nutzung von Restwärme aus anderen Prozessen) variieren diese Kosten im Einzelfall stark. Aus diesem Grund wird im Folgenden mit einer Annahme von durchschnittlichen Fertigungskosten in Höhe von 800 CHF/to Extrakt gerechnet. Dies entspricht in etwa den Herstellkosten einer mehrstufigen Heisswasserextraktion im grosstechnischen Massstab. Von der hier getroffenen Definition ausgenommen sind kalkulatorische Abschreibungen für den Wertverlust der Anlageninfrastruktur.

Wertänderung Sortimente durch Extraktion: Die angenommene Wertänderung der Sortimente setzt sich zusammen aus a) Reduktion der durch die Extraktion entzogenen Biomasse, b) Erhöhung der Holzfeuchte, die bei weiterer thermischer Verwertung zu einer Reduktion des Heizwertes führt und c) verschiedenen Veränderungen in der Holz- oder Rindenmatrix, die Vorteile für bestimmte stoffliche Weiternutzungen der extrahierten Biomasse mit sich bringen.

Marge: Als nummerisches Ergebnis der Geschäftsmodellanalysen wird pro Sortiment die Marge ausgewiesen. Diese Marge beschreibt die Differenz zwischen den erzielbaren Erlösen für die Extrakte und den Fertigungskosten sowie der Wertveränderung der Sortimente durch die Extraktion. Die Fokussierung auf diese wenigen Kostenarten wird vorgenommen, um einen Vergleich der Attraktivität der Geschäftsmodelle tätigen zu können, ohne situative Gegebenheiten miteinzubeziehen.

Tabelle 11 : Überblick über die Reststoff-Sortimente und die jeweiligen Extraktstoffe

| Sortiment Rohstoffe | Ausbeute | Extraktstoffe | Märkte | Erlös | Erlös | Fertigungs-kosten | Fertigungs-kosten |
|------------------------|----------------------------------|--|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | [kg/t Rohstoff _{atro}] | | | [CHF/t Extrakt _{atro}] | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | [CHF/t Extrakt _{atro}] | [CHF/t Rohstoff _{atro}] |
| Rinde (Fi o. Ki) | 100 | kond. Tannine, phenol. Verbindungen, Saccharide | Bindemittel | 2000 | 200 | 800 | 80 |
| | | | Gerbstoffe | 1800 | 180 | | |
| | | | Wirkstoffe | 3000 | 300 | | |
| Rinde (Mischsortiment) | 100 | kond. Tannine, phenol. Verbindungen, Saccharide | Bindemittel | 2000 | 200 | 800 | 80 |
| | | | Gerbstoffe | 1500 | 150 | | |
| | | | Wirkstoffe | 2500 | 250 | | |
| Holz (Fi u. Ki) | 25 | weitere phenol. Verbindungen | Wirkstoffe | 2000 | 50 | 800 | 20 |
| Holz (Kastanie, Eiche) | 120 | hydrolys. Tannine, weitere phenol. Verbindungen | Gerbstoffe | 2800 | 336 | 800 | 96 |
| | | | Wirkstoffe | 3000 | 360 | | |
| | | | Geschmacksstoff Lebensmittel | 3000 | 360 | | |
| Holz (Ki, Lä o. Arve) | 50 | Tannine, weitere phenol. Verbindungen, Terpene, Harzsäuren | Wirkstoffe | 2500 | 125 | 800 | 40 |

Legende Schriftfarben:

Schwarz = «belegbar»

grün = «abschätzbar, mit hoher Sicherheit»

blau = «abschätzbar, mit geringer Sicherheit»

rot = «kaum abschätzbar, sehr geringe Sicherheit»

Die nachfolgenden Geschäftsmodellanalysen basieren auf den in den vorangehenden Abschnitten erläuterten Annahmen sowie auf Angaben von Experten und Marktkennzahlen. Als Bezugsgröße wird in den Berechnungen die Atro-Tonne (t atro) der eingesetzten Biomasse verwendet. Sowohl die anfallenden Mengen der Sortimente, die Kosten für die Extraktion, der mittlere Erlös der Extrakte wie auch die Wertveränderung der Sortimente durch die Extraktion werden darauf bezogen.

Für die Weiterverwendung der extrahierten Sortimente kommen sowohl die industrielle Nutzung wie auch die energetische Nutzung in Frage, weshalb in den Berechnungen beide Möglichkeiten berücksichtigt werden. Bei der industriellen Nutzung könnte für die Holzsortimente insbesondere die Papierherstellung interessant sein, da diese auf feuchte Sortimente angewiesen ist und das Fehlen der extrahierten Stoffe für den Prozess tendenziell vorteilhaft sein könnte. Für die Rinde kämen Einsatzgebiete wie die Herstellung von Torf-Ersatz und Rinden-Mulch in Frage.

Folgende Abkürzungen werden für die Holzarten in den Tabellen verwendet:

- Fichte = Fi
- Weisstanne = Ta
- Waldkiefer = Ki
- Lärche = Lä.

5.2 Geschäftsmodell «Grosses Sägewerk»

Das Geschäftsmodell für ein grosses Sägewerk sieht vor, dass die Extraktion als ergänzende Wertschöpfungsstufe im Unternehmen integriert wird. Die im Werk anfallenden Restholzsortimente wie Rinde und Holz von Fichte und Weisstanne werden für die Extraktion genutzt. Das bestehende Produktsortiment des «grossen Sägewerks» wird folglich durch die Extrakte ergänzt.

Für die Berechnung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- ▶ Als durchschnittliche Einschnittmenge eines grossen Sägewerks in der Schweiz werden 300'000 Festmeter Holz definiert.
- ▶ In grossen Schweizer Sägewerken werden in erster Linie Fichte und Weisstanne eingeschnitten.
- ▶ Ein grosses Sägewerk ist in der Lage, die anfallende Rinde sortenrein zu sammeln und dem Extraktionsprozess zuzuführen.

Die Analyse zeigt, dass für das Geschäftsmodell «grosses Sägewerk» insbesondere die Rinden-Sortimente interessant sind (siehe Tabelle 12). Es kann davon ausgegangen werden, dass die daraus gewonnenen Extrakte relativ hohe mittlere Erlöse auf dem Markt erzielen. Diese hohen Erlöse decken auch die Wertverminderungen für die weitere Nutzung der Reststoffe, welche sich in erster Linie durch die Masseverluste ergeben. Pro Jahr kann gemäss der vorliegenden Analyse mit Margen in der Höhe von circa 2 Millionen CHF respektive von etwas über 1.5 Millionen CHF gerechnet werden, je nach Sortenreinheit der Sortimente.

Die zu erwartende Marge für die Extrakte aus Fichten- und Weisstannenholz ist mit circa einer Million CHF deutlich geringer. Dies aufgrund der viel niedrigeren Ausbeute bei der Extraktion sowie tieferen mittleren Erlösen für die Extrakte. Dank der grossen anfallenden Rohstoffmengen sind jedoch auch diese Sortimente interessant. Allerdings besteht bei der Analyse dieses Sortiments eine hohe Unsicherheit, da zur Beurteilung möglicher Anwendungen und dabei erzielbarer Erlöse keine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist.

Die Unterschiede der Margen je nach weiterem Verwendungszweck der Reststoffe sind gering. Die Weiterverwendung für industrielle Zwecke ist etwas interessanter, da die Wertverminderung der Reststoffe etwas tiefer ausfällt, dies aufgrund der niedrigeren Marktpreise für Industrieholz im Vergleich zum Energieholz. Zudem würde das stoffliche Potenzial des Holzes im Sinne einer Kaskadennutzung besser ausgeschöpft werden. Dies gilt auch für alle nachfolgenden Geschäftsmodelle (Kapitel 5.3 bis 5.5).

Tabelle 12: Geschäftsmodellanalyse "Grosses Sägewerk"

| | | Rinde (Fi o. Ta) | Rinde (Mischsortiment) | Holz (Fi u. Ta) |
|---|------------------------------------|------------------|------------------------|-----------------|
| Anfallende Menge Rohstoff pro Jahr¹ | [t Rohstoff _{atro} /Jahr] | 15'000 | 15'000 | 40'000 |
| Variable Fertigungskosten Extraktion | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 80 | 80 | 20 |
| Erlös Extraktstoffe für Bindemittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 200 | 200 | - 5 |
| Erlös Extraktstoffe für Gerbstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 180 | 150 | - 5 |
| Erlös Extraktstoffe für Wirkstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 300 | 250 | 50 |
| Erlös Extraktstoffe für Geschmacksstoffe Lebensmittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - 5 | - 5 | - 5 |
| Mittlerer Erlös für die Extrakte | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 227 | 200 | 50 |
| Wertverminderung Reststoffe für die industrielle Nutzung² | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 12 | 12 | 4 |
| Wertverminderung Reststoffe für die Energieerzeugung³ | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 17 | 17 | 5 |
| Marge mit Reststoffen für industrielle Nutzung | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 135 | 108 | 27 |
| Marge mit Reststoffen für Energieerzeugung | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 130 | 103 | 25 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für industrielle Nutzung)⁴ | [CHF/Jahr] | 2'021'500 | 1'621'500 | 1'060'000 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für Energieerzeugung)⁴ | [CHF/Jahr] | 1'944'900 | 1'544'900 | 1'011'000 |

¹ Gemäss den Experten der BFH und dem Stand des Wissens fallen ca. 11 % der eingeschnittenen Holzmenge eines Sägewerks als Rinde und ca. 30 % als weitere Holz-Reststoffe an

² Auf Basis des Erlöses gemäss «Preisliste und Annahmekriterien für zertifiziertes Schweizer Holz FSC®/PEFC» von Swiss Krono, 1.10.2019 – 30.9.2020 und "Preisliste Sägespäne, Hackschnitzel, Rinde, Rinde-Mulch" von Lehman Holzwerk AG, Ausgabe 19.1

³ Auf Basis des Erlöses gemäss «Richtpreise für Hackschnitzel, Empfehlung von Holzenergie Schweiz», WaldSchweiz, 2018/2019

⁴ Ergebnis gerundet auf 100er-Stelle

⁵ Datengrundlage für Anwendung der Extrakte im Markt nicht vorhanden

5.3 Geschäftsmodell «Kleineres Sägewerk»

Die zweite Geschäftsmodellanalyse beleuchtet ein kleineres Sägewerk, das auf den Einschnitt von spezifischen Holzarten wie Waldkiefer, Lärche, Arve oder Edelkastanie und Eiche spezialisiert ist. Die Extraktionsanlage ergänzt den bestehenden Betrieb und verwertet die eigenen Resthölzer. Das bestehende Produktsortiment wird folglich wie beim Geschäftsmodell «grosses Sägewerk» durch die Extrakte ergänzt.

Für die Berechnung wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- ▶ Ein kleineres Sägewerk in der Schweiz schneidet circa 30'000 Festmeter Holz pro Jahr ein.
- ▶ Für ein kleineres Sägewerk ist der Aufwand zu gross, die Rinde sortenrein zu sammeln und weiterzuverwenden. Deshalb fällt die Rinde als Mischsortiment von verschiedenen Holzarten an.

Interessante Sortimente für eine Extraktionsanlage bei einem «kleineren Sägewerk» scheinen insbesondere die Laubhölzer Kastanie und Eiche zu sein (siehe Tabelle 13). Deren Extrakte erzielen gemäss der Schätzung einen mittleren Erlös von über 350 CHF pro Tonne Rohstoff atro. Dies ist genügend hoch, um die geringeren Mengen der verfügbaren Resthölzer im Vergleich zu einem grossen Sägewerk zu kompensieren. So resultiert pro Jahr eine Marge von circa 1.3 Millionen CHF, je nach weiterem Verwendungszweck der Reststoffe. Die Verkaufserlöse dieser Extrakte im Markt sind mehrheitlich belegbar und die Analyse folglich zuverlässig.

Die Erlöse für Rinde befinden sich gemäss der Einschätzung grundsätzlich auf einem guten Niveau, durch die relativ geringe Menge liegt die berechnete Marge jedoch lediglich bei etwas über 150'000 CHF pro Jahr. Auch das Sortiment Kiefer-, Lärchen- oder Arvenholz erzielt gemäss der Analyse lediglich eine Marge von circa 300'000 CHF pro Jahr, die etwas grössere Menge vermag den tieferen mittleren Erlös von 125 CHF pro Tonne Rohstoff atro nicht zu kompensieren. Bei diesem Sortiment ist jedoch eine relativ grosse Unsicherheit vorhanden, da die Erlöse der Extrakte nicht sicher abgeschätzt werden können und für mögliche Anwendungen, die auf der bioaktiven Wirkung der Extrakte beruhen, durchaus höher ausfallen könnten.

Tabelle 13: Geschäftsmodellanalyse "Kleineres Sägewerk"

| | | Rinde (Mischsortiment) | Holz (Kastanie o. Eiche) | Holz (Ki, Lä o. Arve) |
|--|---|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Anfallende Menge Rohstoff pro Jahr ¹ | [t Rohstoff_{atro}/Jahr] | 1'500 | 5'625 | 4'000 |
| Variable Fertigungskosten Extraktion | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 80 | 96 | 40 |
| Erlös Extraktstoffe für Bindemittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 200 | - ⁵ | - ⁵ |
| Erlös Extraktstoffe für Gerbstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 150 | 336 | - ⁵ |
| Erlös Extraktstoffe für Wirkstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 250 | 360 | 125 |
| Erlös Extraktstoffe für Geschmacksstoffe Lebensmittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁵ | 360 | - ⁵ |
| Mittlerer Erlös für die Extrakte | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 200 | 352 | 125 |
| Wertverminderung Reststoffe für die industrielle Nutzung ² | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 12 | 14 | 7 |
| Wertverminderung Reststoffe für die Energieerzeugung ³ | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 17 | 33 | 9 |
| Marge mit Reststoffen für industrielle Nutzung | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 108 | 242 | 78 |
| Marge mit Reststoffen für Energieerzeugung | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 103 | 223 | 76 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für industrielle Nutzung) ⁴ | [CHF/Jahr] | 162'200 | 1'363'100 | 313'200 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für Energieerzeugung) ⁴ | [CHF/Jahr] | 154'500 | 1'255'700 | 302'200 |

¹ Gemäss den Experten der BFH und dem Stand des Wissens fallen ca. 11 % der eingeschnittenen Holzmenge eines Sägewerks als Rinde und ca. 30 % als weitere Holz-Reststoffe an. Aufgrund der unterschiedlichen Holzdichte unterscheiden sich die Mengen zwischen den Laubholz- und den Nadelholzsortimenten

² Auf Basis des Erlöses gemäss «Preisliste und Annahmekriterien für zertifiziertes Schweizer Holz FSC®/PEFC» von Swiss Krono, 1.10.2019 – 30.9.2020 und "Preisliste Sägespäne, Hackschnitzel, Rinde, Rinde-Mulch" von Lehman Holzwerk AG, Ausgabe 19.1

³ Auf Basis des Erlöses gemäss «Richtpreise für Hackschnitzel, Empfehlung von Holzenergie Schweiz», WaldSchweiz, 2018/2019

⁴ Ergebnis gerundet auf 100er-Stelle

⁵ Datengrundlage für Anwendung der Extrakte im Markt nicht vorhanden

5.4 Geschäftsmodell «Energieerzeugungsanlage»

Ein weiteres mögliches Geschäftsmodell ist die Integration einer Extraktionsanlage in den Betrieb einer Energieerzeugungsanlage, beispielsweise eines Biomassekraftwerks. Vor der energetischen Verwendung des Holzes wird die Extraktion als zusätzliche Wertschöpfungsstufe in den Prozess eingegliedert. Die Holzreststoffe bezieht eine Energieerzeugungsanlage in der Schweiz meist von Sägereien und/oder von Forstunternehmen und spezialisierten Holzreststoffhändlern. Als Sortimente für dieses Geschäftsmodell wird folglich Holz von Nadel- wie auch Laubhölzern vorgesehen. Rinde wird in der Analyse nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen werden kann, dass die in Sägewerken anfallenden Mengen für einen Verkauf zu gering sind und im Forst keine systematische Entrindung der Stämme erfolgt.

Für die Berechnung wurden die folgenden weiteren Annahmen getroffen:

- ▶ Die Feuerleistung des Biomassekraftwerks beträgt 20 MWh. Dies entspricht einem grösseren Kraftwerk, liegt jedoch circa 50 % unter der Feuerleistung der grössten Anlagen in der Schweiz. Unter der Annahme, dass dieses Werk im Jahr durchschnittlich zu 45 % ausgelastet ist, können die anfallenden Mengen der Sortimente je nach Heizwert der Holzarten berechnet werden.
- ▶ Eine Energieerzeugungsanlage bezieht in erster Linie Holzreststoff-Sortimente, Rinde ist in zu geringen Mengen auf dem Markt verfügbar.

Für diese zusätzliche Wertschöpfungsstufe in einer Energieerzeugungsanlage sind insbesondere die Sortimente Kastanien- und Eichenholz sehr interessant (siehe Tabelle 14). Deren Extrakte erzielen einen hohen mittleren Erlös von circa 350 CHF pro Tonne Rohstoff atro und können die Wertverminderungen der Sortimente durch die Extraktion für die Energieerzeugung gut abdecken. Die so berechnete Marge liegt bei knapp vier Millionen CHF pro Jahr.

Ebenfalls interessant scheinen Waldkiefer-, Lärchen- und Arvenholz zu sein, auch wenn sich der geschätzte mittlere Erlös auf einem deutlich tieferen Niveau befindet. Diese Beträge sind jedoch nur mit einer geringen Sicherheit abschätzbar, weshalb sie mit Unsicherheiten behaftet sind. Gemäss der vorliegenden Berechnung würde die Marge circa 1'218'000 CHF pro Jahr betragen, knapp ein Drittel der für die Eichen- und Kastaniensortimente berechneten Marge.

Für die Sortimente der Fichten- und Weisstannenhölzer sind die angenommenen Mengen und Erlöse der Extrakte zu gering, um eine gute Marge erzielen zu können. Jedoch fehlen für diese Erlösschätzungen die Grundlagen, falls sie höher ausfielen oder eine grosse Energieerzeugungsanlage deutlich höhere Mengen dieser Sortimente energetisch nutzten würde, könnten sie trotzdem interessant sein.

Tabelle 14: Geschäftsmodellanalyse "Energieerzeugungsanlage"

| | | Holz (Fi u. Ta) | Holz (Kastanie o. Eiche) | Holz (Ki, Lä o. Arve) |
|--|---|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| Anfallende Menge Rohstoff pro Jahr ¹ | [t Rohstoff_{atro}/Jahr] | 18'334 | 17'828 | 16'119 |
| Variable Fertigungskosten Extraktion | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 20 | 96 | 40 |
| Erlös Extraktstoffe für Bindemittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁴ | - ⁴ | - ⁴ |
| Erlös Extraktstoffe für Gerbstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁵ | 336 | - ⁴ |
| Erlös Extraktstoffe für Wirkstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 50 | 360 | 125 |
| Erlös Extraktstoffe für Geschmacksstoffe Lebensmittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁴ | 360 | - ⁴ |
| Mittlerer Erlös für die Extrakte | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 50 | 352 | 125 |
| Wertverminderung Reststoffe für die Energieerzeugung ³ | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 5 | 33 | 9 |
| Marge mit Reststoffen für Energieerzeugung | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 25 | 223 | 76 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für Energieerzeugung) ³ | [CHF/Jahr] | 463'400 | 3'980'000 | 1'217'800 |

¹ Berechnungsgrundlagen: Feuerleistung 20 MWh, 45% Auslastung, Heizwerte der Holzarten

² Auf Basis des Erlöses gemäss «Richtpreise für Hackschnitte, Empfehlung von Holzenergie Schweiz, WaldSchweiz, 2018/2019

³ Ergebnis gerundet auf 100er-Stelle

⁴ Datengrundlage für Anwendung der Extrakte im Markt nicht vorhanden

5.5 Geschäftsmodell «Extraktionsanlage»

Das Geschäftsmodell «Extraktionsanlage» beschreibt die Möglichkeit, dass ein spezialisiertes Unternehmen die Holzextraktion als neuen Geschäftszweig oder als neue Haupttätigkeit betreibt. Die dafür notwendigen Rohstoffe werden explizit für die Extraktion eingekauft, wodurch man sich auf besonders interessante Sortimente fokussieren kann. Jedoch gilt auch für dieses Geschäftsmodell die Annahme, dass Rinde nicht in den erforderlichen Mengen auf dem Markt verfügbar ist. Die Beschaffungskosten für den Rohstoff werden bei der Berechnung wie bei den anderen Geschäftsmodellanalysen ausgeklammert, da davon ausgegangen werden kann, dass diese durch den Erlös beim Verkauf der Reststoffe bis auf die berücksichtigte Wertverminderung abgedeckt werden können.

Für die Sortimente Kastanien-, Eichen-, Waldkiefer-, Lärchen- und Arvenholz wird von denselben Reststoffmengen wie bei der Energieerzeugungsanlage ausgegangen. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich und ist plausibel, da dies circa der vierfachen Menge der in einem kleineren Sägewerk anfallenden Restholzmenge entspricht. Für Fichten- und Weisstannenholz wurde mit 300'000 Schüttraummetern eine deutlich höhere Restholzmenge vorgesehen. Denn es kann angenommen werden, dass auf dem Markt grössere Mengen dieses Sortiments verfügbar sind, darauf deuten insbesondere die Schliessung eines Holzfaserdämmstoffwerks im Jahr 2019 sowie einer Papierfabrik im Jahr 2017 hin.

Für die Berechnung wurden die folgenden weiteren Annahmen getroffen:

- ▶ Eine spezialisierte Extraktionsanlage bezieht in erster Linie Holzreststoff-Sortimente, Rinde ist in zu geringen Mengen auf dem Markt verfügbar.
- ▶ Die Extraktionsanlage kann die Reststoffe für eine industrielle oder energetische Nutzung weiterverkaufen

Die Sortimente Kastanien- und Eichenholz sind gemäss der Analyse für das Geschäftsmodell «Extraktionsanlage» am vielversprechendsten (siehe Tabelle 15). Dank dem hohen Erlös der Extrakte scheint bei der industriellen Weiterverwendung der Reststoffe eine gute Marge in der Höhe von über 4'300'000 CHF erzielbar zu sein.

Die zwei Nadelholzsortimente erzielen gemäss den Annahmen ein ähnlich gutes Ergebnis, die Fichten- und Weisstannenhölzer profitieren dabei von der voraussichtlich deutlich höheren Verfügbarkeit auf dem Markt. Werden die Reststoffe nach der Extraktion industriell weitergenutzt, zeigen die Berechnungen Margen in der Höhe von circa 1'136'000 CHF pro Jahr für die Fichten- und Weisstannen-Sortimente sowie circa 1'262'000 CHF pro Jahr für die Kiefer-, Lärchen- und Arvenhölzer.

Tabelle 15: Geschäftsmodellanalyse "Extraktionsanlage"

| | | Holz (Fi u. Ta) | Holz (Kastanie o. Eiche) | Holz (Ki, Lä o. Arve) |
|---|---|--------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Anfallende Menge Rohstoff pro Jahr¹ | [t Rohstoff_{atro}/Jahr] | 42'857 | 17'828 | 16'119 |
| Variable Fertigungskosten Extraktion | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 20 | 96 | 40 |
| Erlös Extraktstoffe für Bindemittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁵ | - ⁵ | - ⁵ |
| Erlös Extraktstoffe für Gerbstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁵ | 336 | - ⁵ |
| Erlös Extraktstoffe für Wirkstoffe | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | 50 | 360 | 125 |
| Erlös Extraktstoffe für Geschmacksstoffe Lebensmittel | [CHF/t Rohstoff _{atro}] | - ⁵ | 360 | - ⁵ |
| Mittlerer Erlös für die Extrakte | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 50 | 352 | 125 |
| Wertverminderung Reststoffe für die industrielle Nutzung² | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 4 | 14 | 7 |
| Wertverminderung Reststoffe für die Energieerzeugung³ | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 5 | 33 | 9 |
| Marge mit Reststoffen für industrielle Nutzung | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 27 | 242 | 78 |
| Marge mit Reststoffen für Energieerzeugung | [CHF/t Rohstoff_{atro}] | 25 | 223 | 76 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für industrielle Nutzung)⁴ | [CHF/Jahr] | 1'135'700 | 4'320'200 | 1'262'100 |
| Marge pro Jahr (Reststoffe für Energieerzeugung)⁴ | [CHF/Jahr] | 1'083'200 | 3'980'000 | 1'217'800 |

¹ Berechnungsgrundlagen: Annahme für Holz (Fi u. Ta): 300'000 SRm können auf dem Markt beschafft werden. Annahme für Holz (Ki, Lä o. Arve): die Reststoffmenge entspricht derjenigen der Energieerzeugungsanlage und circa der vierfachen Restholzmenge eines kleineren Sägewerks

² Auf Basis des Erlöses gemäss «Preisliste und Annahmekriterien für zertifiziertes Schweizer Holz FSC®/PEFC» von Swiss Krono, 1.10.2019 – 30.9.2020 und "Preisliste Sägespäne, Hackschnitzel, Rinde, Rinde-Mulch" von Lehman Holzwerk AG, Ausgabe 19.1

³ Auf Basis des Erlöses gemäss «Richtpreise für Hackschnitze, Empfehlung von Holzenergie Schweiz, WaldSchweiz, 2018/2019

⁴ Ergebnis gerundet auf 100er-Stelle

⁵ Datengrundlage für Anwendung der Extrakte im Markt nicht vorhanden

6 Fazit und Ausblick

Verschiedene Holz Inhaltsstoffe werden bereits industriell in einem eigenständigen Extraktionsprozess gewonnen und werden mit stabilen Absätzen und Erlösen in etablierten Zielmärkten vermarktet. Diese Holz Inhaltsstoffen umfassen vor allem phenolische Verbindungen, darunter insbesondere Tannine (sog. Gerbstoffe). Sie finden Anwendungen als Gerbmittel im Bereich der Ledergerbung, in Klebstoffsystemen z.B. für die Holzwerkstoffherstellung und in anderen Bindemittelanwendungen sowie in Anwendungen, die auf der bioaktiven Wirkung der Holz Inhaltsstoffe beruhen. Als weitere Stoffgruppe werden Terpene (Bestandteile der Baumharze von Nadelhölzern) in grossen Mengen gewonnen und im Rahmen unterschiedlicher Anwendungen vermarktet. Ihre Erzeugung geschieht jedoch fast ausschliesslich im grossen Massstab aus Kuppelprodukten der Papier- und Zellstoffherstellung und erscheint ausserhalb dieser Wertschöpfungskette ökonomisch nicht rentabel zu sein.

Mögliche Rohstoffe für die Extraktion sind in der Schweiz in beachtlichen Mengen vorhanden. Bei der Holzernte im Jahr 2017 fielen knapp 274'600 Fm Nadel- und 231'700 Fm Laub-Industrieholz an. Zudem flossen 610'600 Fm Nadelholz und 1'190'400 Fm Laubholz direkt in die energetische Verwendung. Weiter wurden in Schweizer Sägereien 1'705'500 m³ Nadelholz und 78'100 m³ Laubholz eingeschnitten, wovon wiederum circa 39% Restholz entsteht. Grundsätzlich interessant sind alle Sortimente, die in Bereichen Anwendung finden, bei der der Rohstoff ohnehin in zerkleinerter Form, z.B. als Hackschnitzel, Späne etc. vorliegt (oder entsprechend verarbeitet werden könnte). Eine Extraktion kann dabei durchaus in bestehende Wertschöpfungsketten als zusätzlicher Wertschöpfungsschritt integriert werden, bei dem den Rohstoffen Holz Inhaltsstoffe als Extrakt entzogen werden und das extrahierte Material anschliessend weiter in der bisherigen Anwendung eingesetzt wird.

Die stoffliche Charakterisierung der Inhaltsstoffe der in der Schweiz vorhandenen Sortimente weist auf einzelne Holzarten hin, die im Hinblick auf die Ausbeute bei der Extraktion und die stoffliche Zusammensetzung der Extrakte besonders geeignet erscheinen, da aus ihnen grössere Mengen an phenolischen Verbindungen mittels Heisswasserextraktion gewonnen werden können. Hierzu gehören insbesondere Rinden verschiedener Nadel- und Laubhölzer. So können z.B. mit Rinden der Fichte (39%), Waldkiefer (34%), Weisstanne (28%) und Buche (19%) hohe Extrakt ausbeuten bei Extraktion im Labormassstab erzielt werden. Auch das Kernholz einiger Holzarten (Kastanie, Eiche, Lärche, Waldkiefer und Arve) ist hinsichtlich der daraus extrahierbaren Holz Inhaltsstoffe besonders für eine Extraktion geeignet.

Unter Berücksichtigung des Rohstoff-Vorkommens sowie der Extraktionsausbeute ergeben sich bestimmte Sortimente, die für die Umsetzung einer Extraktion im industriellen Massstab in der Schweiz besonders interessant sind. Dazu zählen insbesondere Rinde von Fichte und Weisstanne sowie Holz von Eiche, Kastanie, Waldkiefer, Lärche und Arve. Das Holz von Fichte, Weisstanne und Buche könnte wegen der anfallenden Mengen ebenfalls von Bedeutung sein, allerdings ist die Eignung dieser Extrakte für bestimmte Anwendungen weitestgehend unerforscht und bedarf weiterer Abklärung.

Mögliche Geschäftsmodelle können zum einen die Sortimente berücksichtigt, welche an Ort und Stelle bereits anfallen oder bereits verwertet werden. Zum anderen kann der Zukauf von Sortimenten vorgesehen werden, deren Extraktstoffe eine hohe Wertschöpfung erzielen, so dass sich ihre Beschaffung für die alleinige Extraktion ökonomisch rentiert. Bei Betrachtung der Sortimente wird deutlich, dass zudem ein nicht unerhebliches Mobilisierungspotential für bislang unternutzte Holzarten in bestimmten Regionen besteht.

Ausreichend hohe Margen könnten in den hier betrachteten Geschäftsmodellen «grosses Sägewerk», «Energieerzeugungsanlage» und «Extraktionsanlage» erzielt werden. Massgebend sind dabei insbesondere die Art und Menge der zur Verfügung stehenden Rohstoffe. Weiter zu berücksichtigen sind zudem die teilweise mit geringer Sicherheit getroffenen Abschätzungen zu Erlösen und Herstellkosten der Extrakte sowie die zusätzlichen erforderlichen Investitionskosten in Anlageninfrastruktur, die im Einzelfall starken variieren können. Grundsätzlich gilt für alle wahrscheinlichen Geschäftsmodelle, dass eine Extraktion von Holz Inhaltsstoffen ein zusätzlicher Schritt in etablierten Wertschöpfungsketten darstellen kann und keine Konkurrenzsituation mit etablierten Prozessen entstehen muss. Vielmehr stellt die Extraktion die Möglichkeit einer zusätzlichen Wertschöpfung dar. Damit könnte eine Extraktionsstufe auch in Konzepten zu einer holzbasierten Bioraffinerie oder einem holzbasierten "Bioproduktwerk Schweiz" (Lehner 2018) eine wichtige Rolle einnehmen.

Für manche Sortimente fehlt allerdings die notwendige Datengrundlage zur wirtschaftlichen Beurteilung und der Abschätzung des Vermarktungspotenzials der Extrakte. Grund hierfür ist, dass bislang keine Untersuchungen für stoffliche Anwendungen dieser Extrakte durchgeführt wurden und dadurch auch ihre Anwendungs- und Vermarktungspotentiale nicht seriös abgeschätzt werden können. Dies trifft insbesondere auf Holzarten mit eher geringer Extraktausbeute zu, die jedoch eine hohe Mengenverfügbarkeit in der Schweiz aufweisen, wie Holz der Fichte, Weisstanne und Buche. Zudem sind die genauen Stoffflüsse und Mengen von Holzarten mit kleineren Beständen wie der Lärche, Waldkiefer, Arve und Eiche unbekannt. Eine spezifische Erfassung und Analyse dieser könnte wichtige Hinweise zum Potential möglicher Geschäftsmodelle liefern.

Für die weitere Entwicklung von Anwendungen der Extrakte bis hin zur Industriereife bedarf es neuer Pilotanlageninfrastruktur, die Extrakte aus Schweizer Holz in ausreichender Menge, unter geeigneten Prozessbedingungen und unter Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Konversionsschritte erzeugen kann. Eine solche Infrastruktur existiert innerhalb der Schweiz und der angrenzenden Nachbarländer noch nicht, würde jedoch einen massgeblichen Beitrag für die Absenkung der bestehenden Hürden auf dem Weg zu einer grossmassstäblichen Umsetzung von Extraktionsprozessen leisten können.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1 : Vorgehensweise im Projekt | 7 |
| Abbildung 2: Beispiele für Stoffgruppen, Substanzen und Strukturformeln | 9 |
| Abbildung 3: Verbreitung der Weisstanne 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 19 |
| Abbildung 4: Zukünftig erwartete Verbreitung der Weisstanne (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 19 |
| Abbildung 5: Verbreitung der Lärche Jahr 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 19 |
| Abbildung 6: Zukünftig erwartete Verbreitung der Lärche (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 19 |
| Abbildung 7: Verbreitung der Fichte 2018_(Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 20 |
| Abbildung 8: Zukünftig erwartete Verbreitung der Fichte (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 20 |
| Abbildung 9: Verbreitung der Arve 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 20 |
| Abbildung 10: Zukünftig erwartete Verbreitung der Arve (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 20 |
| Abbildung 11: Verbreitung der Waldkiefer 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 21 |
| Abbildung 12: Zukünftig erwartete Verbreitung der Waldkiefer (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 21 |
| Abbildung 13: Verbreitung der Edelkastanie 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 21 |
| Abbildung 14: Zukünftig erwartete Verbreitung der Edelkastanie (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 21 |
| Abbildung 15: Verbreitung der Buche 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 22 |
| Abbildung 16: Zukünftig erwartete Verbreitung der Buche (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 22 |
| Abbildung 17: Verbreitung der Stieleiche 2018 (Schweizerisches Landesforstinventar, 2019) | 22 |
| Abbildung 18: Zukünftig erwartete Verbreitung der Stieleiche (Niklaus E. Zimmermann, 2014) | 22 |
| Abbildung 19: Materialfluss von Holz durch die Volkswirtschaft (Quelle: Fachbuch Springer Energie aus Biomasse S. 282) | 24 |
| Abbildung 20: Prozessdarstellung des Einschnitts und der Weiterverarbeitung von Stammholz mit den anfallenden Reststoffen und der Möglichkeit der Extraktstoffgewinnung | 25 |
| Abbildung 21: Prozessdarstellung der Energie- und Industrieholzherstellung mit der Möglichkeit der Extraktstoffgewinnung | 27 |
| Abbildung 22: Holzernte 2017 (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018) | 32 |
| Abbildung 23: Veränderung der Holzernte 2016-2017 (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018) | 32 |
| Abbildung 24: Nadelholzsägewerke (Mitglieder) des Verbands Holzindustrie Schweiz (Holzindustrie Schweiz, 2017) | 38 |
| Abbildung 25: Übersicht zur Methodik der Charakterisierung der Extrakte | 40 |
| Abbildung 26: Gewebearten mit einer Gesamtextraktausbeute von mehr als 20% | 42 |
| Abbildung 27: Monoterpengehalt unterschiedlicher Gewebearten. Darstellung umfasst Gewebearten mit einem Terpenegehalt von mehr als 0.3% | 43 |
| Abbildung 28: Fettsäuregehalt von mehr als 0.8 % in unterschiedlichen Gewebetypen | 43 |
| Abbildung 29: Harzsäuregehalt (Diterpene) von mehr als 1.5% in unterschiedlichen Gewebetypen | 44 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 30: Gehalt an phenolischen Verbindungen (TPC, Total Phenolic Compounds) von mehr als 10.0% in unterschiedlichen Gewebearten | 45 |
|---|----|

8 Diagrammverzeichnis

| | |
|--|----|
| Diagramm 1: Zuwachs, Nutzung und Mortalität nach Regionen LFI3-LFI4 (LFI4 (09/13) bezieht sich auf 5/9 des Stichprobennetzes), (Quelle: BAFU, Jahrbuch Wald und Holz 2018, Schweizerisches Landesforstinventar (LFI3 04/06 0- LFI4 09/13), WSL) | 17 |
| Diagramm 2: Zuwachs, Nutzung, Mortalität nach Baumarten LFI3-LFI4, (LFI4 (09/13) bezieht sich auf 5/9 des Stichprobennetzes), (Quelle: BAFU, Jahrbuch Wald und Holz 2018, Schweizerisches Landesforstinventar (LFI3 04/06 0- LFI4 09/13), WSL) | 17 |
| Diagramm 3: Produzentenpreise für Nadelholz-Waldhackschnitzel 2017, gewogene Durchschnitts-Verkaufspreise von inländischem Rohholz, ab mit Lastwagen befahrbaren Waldstrassen (Quelle: Jahrbuch Wald und Holz (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2018)) | 28 |
| Diagramm 4: Holzernte 2017 (Quelle: BFS – Schweizerische Forststatistik, 2018) | 30 |
| Diagramm 5 : Restholzverwertung in Prozent in den Sägereien, 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.03) | 35 |
| Diagramm 6 : Industrieholz- und Energieholz-Ernte nach Kanton 2017, in Fm (Datenquelle: Schweizerische Forststatistik, Jahrbuch Wald & Holz 2018 (BAFU)) | 36 |
| Diagramm 7 : Anzahl Sägereien nach Kantonen (Datenquelle: (STAT-TAB – interaktive Tabellen (BFS), 2017)) | 37 |

9 Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Beispielhafte Auflistung ätherischer Öle als Stoffgemisch, deren Eigenschaften wesentlich durch ihren Gehalt an Terpenen bestimmt werden. Diese Öle werden als Kuppelprodukt der Zellstoffherstellung oder durch eigenständige Extraktion aus pflanzlichen Rohstoffen gewonnen. (Verändert entnommen aus Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley 2000) | 12 |
| Tabelle 2: Tanninproduktion und -mengen pro Jahr (Quelle: Silvateam, mündliche Kommunikation) | 13 |
| Tabelle 3: Anwendungsgebiete von Tannin | 14 |
| Tabelle 4: Veränderung des Vorrats ausgewählter Baumarten für die fünf Produktionsregionen der Schweiz (Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 201807: Vorrat, Veränderung LFI3 04/06 – LFI4 09/13) | 18 |
| Tabelle 5 : Holzsortimente der einzelnen Anbietergruppen der Schweizer Holzwirtschaft (In Anlehnung an (Hartmann, Kaltschmitt, & Hofbauer, 2016)) | 29 |
| Tabelle 6: Holzsortiment 2017 in m ³ (Quelle: BFS - Schweizerische Forststatistik, 2018) | 31 |
| Tabelle 7: Gesamte Holzernte nach Sortiment 2017 (Jahrbuch Wald und Holz 2018 (BAFU), Tabelle 4.4) | 33 |
| Tabelle 8: Jährliche Holznutzung nach Baumart (Schweizerisches Landesforstinventar - Ergebnistabelle Nr. 199803: Nutzung, LFI3 04/06 und LFI4 09/13) | 34 |
| Tabelle 9: Rundholzeinschnitt in den Sägereien 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.01) | 35 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 10: Restholzverwertung in den Sägereien, 2017 (Bundesamt für Statistik - Eidg. Holzverarbeitungserhebung 2017, Tabelle T 07.03.05.03) | 36 |
| Tabelle 11 : Überblick über die Reststoff-Sortimente und die jeweiligen Extraktstoffe | 48 |
| Tabelle 12: Geschäftsmodellanalyse "Grosses Sägewerk" | 50 |
| Tabelle 13: Geschäftsmodellanalyse "Kleineres Sägewerk" | 52 |
| Tabelle 14: Geschäftsmodellanalyse "Energieerzeugungsanlage" | 54 |
| Tabelle 15: Geschäftsmodellanalyse "Extraktionsanlage" | 55 |

10 Literaturverzeichnis

Anttila, A.-K., Pirtilä, A., Häggman, H., Harju, A., Venäläinen, M., Haapala, A., Holmbom, B., et al. (2013). Condensed conifer tannins as antifungal agents in liquid culture. *Holzforschung*, 67(7), 825-832.

Argueta-Solis, M. G.-I.-G.-M.-P.-B.-Q. (2018). Inhibition of lipid oxidation and related phenolic constituents in the wood and bark of three oak species. *Agrociencia*, 52, 757-766

Bacelo, H., Vieira, B., Santos, S., Boaventura, R., & Botelho, C. (2018). Recovery and valorization of tannins from a forest waste as an adsorbent for antimony uptake. *Journal of Cleaner Production*.

Bajaj, Y.P.S. (Hrsg.): Medicinal and Aromatic Plants V. Vol. 24 in der Reihe Biotechnology in Agriculture and Forestry. Springer 1993. S. 208.

Bertaud, F. C. (2017). Volatile terpene extraction of spruce fir and pine wood supercritical CO₂ extraction compared to classical solvent extraction and steam distillation. *Holzforschung*, 71, 667-673.

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2018). *Jahrbuch Wald und Holz*. Bern.

Chan, J., Day, P., Feely, J., Thompson, R., Little, K. M., & Norris, C. H. (2015). Acacia mearnsii industry overview: current status, key research and development issues. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 77(1), 19-30.

Constabel, P. C., Yoshida, K., & Walker, V. (2014). Recent Advances in Polyphenol Research, Volume 4, 115-142.

Delgado-Sánchez, C., Letellier, M., Fierro, V., Chapuis, H., Gérardin, C., Pizzi, A., & Celzard, A. (2016). Hydrophobisation of tannin-based foams by covalent grafting of silanes. *Industrial Crops and Products*, 92, 116-126.

Dixon, R. A., Liu, C., & Jun, J. (2013). Metabolic engineering of anthocyanins and condensed tannins in plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 24(2), 329-335.

Elsmore, R. (2004). The Biocides Business: Regulation, Safety and Applications, 233-250.

Eriksson, D., Weiland, F., Hedman, H., Stenberg, M., Öhrman, O., Lestander, T. A., Bergsten, U., et al. (2012). Characterization of Scots pine stump-root biomass as feed-stock for gasification. *Bioresource Technology*, 104, 729-736.

Fang, W. W. (2013). Evaluation of selective extraction methods for recovery of polyphenols from pine. *Holzforschung*, 67, 843-851.

Gabaston, J., Leborgne, C., Valls, J., Renouf, E., Richard, T., Waffo-Teguo, P., & Mérillon, J.-M. (2018). Subcritical water extraction of stilbenes from grapevine by-products: A new green chemistry approach. *Industrial Crops and Products*, 126, 272-279.

Garcia, D., Glasser, W., & Pizzi, A. (2016). Modification of condensed tannins: from polyphenol chemistry to materials engineering. *New Journal of*.

García-Estévez, I., Alcalde-Eon, C., Puente, V., & Escribano-Bailón, T. M. (2017). Enological Tannin Effect on Red Wine Color and Pigment Composition and Relevance of the Yeast Fermentation Products. *Molecules*, 22(12), 2046.

Girard, A. L., Bean, S. R., Tilley, M., Adrianos, S. L., & Awika, J. M. (2018). Interaction mechanisms of condensed tannins (proanthocyanidins) with wheat gluten proteins. *Food Chemistry*, 245, 1154-1162.

Harborne, J. B. (1989). Flavonoids.

Hartmann, H., Kaltschmitt, M., & Hofbauer, H. (2016). *Energie aus Biomasse*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.

Hegnauer, R. (1994). Chemotaxonomie der Pflanzen. Basel: Birkhäuser Basel.

Hillis, W. E. (1971). *Distribution, properties and formation of some wood extractives*. *Wood Science and Technology*, 5(4), 272-289.

Hochberg, R. Persönliche Kommunikation am 18.10.2019.

Holzindustrie Schweiz. (2017). Von Holzindustrie Schweiz: <http://www.holz-bois.ch> abgerufen

Hu, J., Thevenon, M.-F., Palanti, S., & Tondi, G. (2017). Tannin-caprolactam and Tannin-PEG formulations as outdoor wood preservatives: biological properties. *Annals of Forest Science*, 74(1), 18.

Jahanshahi, S., Pizzi, A., Abdulkhani, A., & Shakeri, A. (2016). Analysis and testing of bisphenol A-Free bio-based tannin epoxy-acrylic adhesives. *Polymers*.

de Jesus, N., de Falcão, H., Gomes, I., de Leite, T., de Lima, G., Barbosa-Filho, J., Tavares, J., et al. (2012). Tannins, Peptic Ulcers and Related Mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(3), 3203-3228.

Kakavas, K. V., Chavenetidou, M., & Birbilis, D. (2018). Chemical Properties of Greek Stump Chestnut (*Castanea sativa* Mill.). *Natural Products Chemistry & Research*, 06(04). <https://doi.org/10.4172/2329-6836.1000331>

Kellomäki, S., & Verkasalo, E. (2009). *Forest resources and sustainable management*.

Langenberg, V. K., Grigsby, W., & Ryan, G. (2010). Green Adhesives: Options for the Australian industry – summary of recent research into green adhesives from renewable materials and identification of those that are closest to commercial uptake.

Latva-Mäenpää, H., Laakso, T., Sarjala, T., Wähälä, K., & Saranpää, P. (2014). Root neck of Norway spruce as a source of bioactive lignans and stilbenes. *Holzforschung*, 68(1), 1-7.

Lehner, L. (2018). Bioproduktewerk Schweiz, Übersicht zu Anforderungen und Voraussetzungen für eine Machbarkeitsprüfung. Schlussbericht 49O2018011, Aktionsplan Holz, Bundesamt für Umwelt

Loewus, F. (2012). The structure, biosynthesis, and degradation of wood.

Lyman, T. D., Provenza, F. D., & Villalba, J. J. (2008). Sheep foraging behavior in response to interactions among alkaloids, tannins and saponins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88(5), 824-831.

Mannila, E., & Talvitie, A. (1992). Stilbenes from *Picea abies* bark. *Phytochemistry*, 31(9), 3288-3289.

Martin, P. (2004). The Biocides Business: Regulation, Safety and Applications, 27-44.

Matamala, G., Smeltzer, W., & Drogue, G. (2000). Comparison of steel anticorrosive protection formulated with natural tannins extracted from acacia and from pine bark. *Corrosion Science*, 42(8), 1351-1362.

Missio, A. L., Tischer, B., dos Santos, P., Codevilla, C., de Menezes, C. R., Barin, J. S., Haselein, C. R., et al. (2017). Analytical characterization of purified mimosa (*Acacia mearnsii*) industrial tannin extract: Single and sequential fractionation. *Separation and Purification Technology*, 186, 218-225.

Niklaus E. Zimmermann, S. N. (16. September 2014). *PorTree Final Report & Appendix*. Birmensdorf: Swiss Federal Research Institute WSL.

Ouyang, H., Hou, K., Ge, S., Deng, H., & Peng, W. (2017). Antimicrobial activities of flavonoids against bamboo-destroying fungi and molds. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 01-14.
Pratima Bajpai, in Biermann's Handbook of Pulp and Paper (Third Edition), 2018

Piccand, M., Bianchi, S., Halaburt, E. I., & Mayer, I. (2019) Characterization of extractives from biomasses of the Alpine forests and antioxidative efficacy of the thereof extracts. *Industrial Crops and Products*.

Picariello, L., Gambuti, A., Petracca, F., Rinaldi, A., & Moio, L. (2018). Enological tannins affect acetaldehyde evolution, colour stability and tannin reactivity during forced oxidation of red wine. *International Journal of Food Science & Technology*, 53(1), 228-236.

Pizzi, A. (2019). Tannins: Prospectives and Actual Industrial Applications. *Biomolecules*, 9(8).

Pizzi, A. (2016). Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science*, 73(1), 185-203.

Pro Natura Zürich. (11. 07 2019). *Bäume zur richtigen Zeit fällen*. Von Pro Natura: <https://www.pronatura-zh.ch/de/baeume-zur-richtigen-zeit-faellen> abgerufen

Route, J., Brännström, H., Anttila, P., Mäkinen, M., Jänis, J., & Asikainen, A. (2017). *Wood extractives of Finnish pine, spruce and birch – availability and optimal sources of compounds*.

Royer, M., Houde, R., Viano, Y., & Stevanovic, T. (2012). Non-wood Forest Products Based on Extractives - A New Opportunity for the Canadian Forest Industry Part 1: Hardwood Forest Species. *Journal of Food Research*, 1(3), 8. <https://doi.org/10.5539/jfr.v1n3p8>

Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft (SHL), Waldwirtschaft Schweiz (WVS), Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2010). *Kooperationen in der Schweizer Waldwirtschaft*. Von www.waldschweiz.ch: https://www.waldschweiz.ch/fileadmin/user_upload/user_upload/Verband/Infomaterial_Deutsch/kooerationen_waldwirtschaft_de.pdf abgerufen

Schweizerisches Landesforstinventar, B. f. (10. Juli 2019). *Gehölzportraits*. Von Schweizerisches Landesforstinventar: <https://www.lfi.ch/resultate/baumarten.php> abgerufen

Shirmohammadi, Y., Efhamisisi, D., & Pizzi, A. (2018). Tannins as a sustainable raw material for green chemistry: A review. 126, 316-332. doi:10.1016/j.indcrop.2018.10.034

Silvateam (2018, 21. Juni). Persönliches Interview mit Samuele Giovando, Silvateam S.p.A. San Michele Mondovì (Cuneo), Italien.

E. Stahl, W. Schild: Isolierung und Charakterisierung von Naturstoffen. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart 1986.

STAT-TAB – interaktive Tabellen (BFS). (2017). Von STAT-TAB – interaktive Tabellen (BFS): https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0602010000_105/px-x-0602010000_105/px-x-0602010000_105.px?rxid=b599deed-b353-4c2b-b894-9a1627bf0d19 abgerufen

Tondi, Gianluca, Palanti, S., Wieland, S., Thevenon, M.-F., Petutschnigg, A., & Schnabel, T. (2012). DURABILITY OF TANNIN-BORON-TREATED TIMBER. *BioResources*, 7(4), 5138-5151.

Tondi, G., & Pizzi, A. (2009). Tannin-based rigid foams: Characterization and modification. *Industrial Crops and Products*, 29(2-3), 356-363.

Venla, H., Trischler, J., & Sandberg, D. (2013). Bio-Based Adhesives for the Wood Industry - An Opportunity for the Future? *Pro Ligno*, 9, 118-125.

Wiley-VCH, (Ed.). (2000). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley.

Zelinka, S., & Stone, D. (2011). The effect of tannins and pH on the corrosion of steel in wood extracts. *Materials and Corrosion*, 62(8), 739-744.

Zobel, B. J., & van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood Variation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5>

Anhang

Tabellen Extraktionsergebnisse

| | Material | MC (%) | Hexan (%) | Methanol (%) | Wasser (%) | Gesamt-ausbeute (%) |
|----|------------------------|-------------|-----------|--------------|------------|---------------------|
| 1 | Arvenkernholz | 34.0 ± 7.1 | 4.0 ± 0.2 | 2.9 ± 0.3 | 2.6 ± 0.3 | 9.5 ± 0.6 |
| 2 | Lärchenkernholz | 25.1 ± 2.8 | 0.8 ± 0.2 | 2.4 ± 0.3 | 7.7 ± 0.1 | 10.9 ± 0.2 |
| 3 | Eichenkernholz | 42.4 ± 3.6 | 0.3 ± 0.1 | 8.1 ± 1.1 | 3.0 ± 0.2 | 11.4 ± 1.3 |
| 4 | Kiefernholz | 21.5 ± 2.8 | 3.7 ± 0.1 | 2.5 ± 0.1 | 1.4 ± 0.2 | 7.6 ± 0.3 |
| 5 | Buchenholz | 43.6 ± 3.2 | 0.5 ± 0.1 | 4.0 ± 0.2 | 1.3 ± 0.0 | 5.8 ± 0.2 |
| 6 | Tannenholz | 59.3 ± 1.8 | 0.4 ± 0.2 | 3.1 ± 1.7 | 1.3 ± 0.2 | 4.8 ± 2.0 |
| 7 | Fichtenholz | 42.0 ± 13.0 | 1.7 ± 0.1 | 4.4 ± 0.5 | 1.9 ± 0.2 | 8.0 ± 0.4 |
| 8 | Lärchensplintholz | 53.5 ± 3.9 | 0.8 ± 0.2 | 1.8 ± 0.2 | 2.6 ± 0.2 | 5.2 ± 0.6 |
| 9 | Eichensplintholz | 44.8 ± 3.0 | 0.5 ± 0.1 | 4.9 ± 0.4 | 2.1 ± 0.1 | 7.5 ± 0.4 |
| 10 | Kiefersplintholz | 61.4 ± 2.4 | 2.8 ± 0.2 | 1.1 ± 0.1 | 1.4 ± 0.2 | 5.3 ± 0.1 |
| 11 | Arvenrinde | 44.6 ± 8.1 | 6.8 ± 0.3 | 25.1 ± 2.1 | 7.1 ± 0.5 | 39.0 ± 2.4 |
| 12 | Buchenrinde | 43.2 ± 9.7 | 1.5 ± 0.2 | 13.4 ± 0.2 | 3.7 ± 0.1 | 18.6 ± 0.1 |
| 13 | Lärchenrinde | 44.6 ± 3.0 | 2.0 ± 0.2 | 11.9 ± 0.1 | 6.2 ± 0.7 | 20.1 ± 0.7 |
| 14 | Eichenrinde | 43.7 ± 6.4 | 1.5 ± 0.1 | 15.5 ± 0.4 | 5.6 ± 0.4 | 22.6 ± 0.8 |
| 15 | Kiefernrinde | 70.2 ± 7.2 | 4.3 ± 0.4 | 20.4 ± 0.7 | 9.1 ± 0.4 | 33.8 ± 1.3 |
| 16 | Tannenrinde | 48.2 ± 1.9 | 6.9 ± 0.1 | 14.6 ± 0.7 | 6.5 ± 0.1 | 28.0 ± 0.6 |
| 17 | Fichtenrinde | 55.3 ± 6.7 | 4.3 ± 0.2 | 25.8 ± 1.6 | 8.9 ± 1.3 | 39.0 ± 3.1 |
| 18 | Arven - Astknotenholz | 17.1* | 7.9 ± 0.7 | 13.5 ± 0.9 | 1.7 ± 0.3 | 23.1 ± 1.7 |
| 19 | Buchen - Astknotenholz | 37.1* | 0.5 ± 0.1 | 3.4 ± 0.3 | 2.3 ± 0.3 | 6.2 ± 0.7 |
| 20 | Lärchen- Astknotenholz | 27.9* | 1.1 ± 0.1 | 6.3 ± 0.2 | 14.8 ± 0.1 | 22.2 ± 0.1 |
| 21 | Kiefern- Astknotenholz | 42.6* | 5.4 ± 0.2 | 2.9 ± 0.3 | 1.4 ± 0.2 | 9.7 ± 0.6 |
| 22 | Tannen- Astknotenholz | 23.8* | 2.0 ± 0.2 | 13.0 ± 0.7 | 2.4 ± 0.4 | 17.4 ± 1.3 |
| 23 | Fichten- Astknotenholz | 35.4* | 1.0 ± 0.1 | 6.1 ± 0.6 | 1.7 ± 0.2 | 8.8 ± 0.6 |
| 24 | Kiefern- Feinäste | 40.4* | 5.8 ± 0.3 | 11.0 ± 3.2 | 6.2 ± 0.2 | 23.0 ± 3.0 |
| 25 | Tannen- Feinäste | 47.2* | 2.4 ± 0.4 | 9.0 ± 0.7 | 6.1 ± 0.5 | 17.5 ± 1.3 |
| 26 | Fichten- Feinäste | 33.3* | 4.9 ± 0.4 | 6.4 ± 0.2 | 6.7 ± 1.1 | 17.4 ± 1.6 |
| 27 | Kiefernadeln | 21.6* | 8.0 ± 0.4 | 18.6 ± 0.7 | 5.9 ± 0.2 | 32.5 ± 0.6 |
| 28 | Tannenadeln | 39.4* | 4.6 ± 0.1 | 23.2 ± 0.9 | 7.5 ± 0.3 | 35.3 ± 0.5 |
| 29 | Fichtennadeln | 33.6* | 2.2 ± 0.3 | 24.2 ± 3.9 | 4.0 ± 0.5 | 30.4 ± 4.2 |

Tabelle 1: Anfangsfeuchtegehalt (MC) und Ausbeute aufeinanderfolgender Extraktionsschritte bei Einsatz unterschiedlicher Lösemittel (basierend auf trockenem Holz, n=3)

Table 1: Ergebnisse der Messungen der Stoffgruppen in den verschiedenen Arten und Geweben

| Art | Gewebe | Terpene | Fettsäuren | Harzsäuren | Total Säuren | TPC |
|------------|------------|---------|------------|------------|--------------|-------|
| Arve | Kernholz | 0.055 | 1.55 | 0.92 | 2.47 | 4.03 |
| Lärche | Kernholz | 0.024 | 0.08 | 0.1 | 0.18 | 15.4 |
| Eiche | Kernholz | 0.004 | 0.12 | 0 | 0.12 | 12.04 |
| Waldkiefer | Kernholz | 0.063 | 0.72 | 2.56 | 3.28 | 8.98 |
| Buche | Holz | 0.006 | 0.19 | 0 | 0.19 | 1.37 |
| Weisstanne | Holz | 0.005 | 0.09 | 0.01 | 0.1 | 2.1 |
| Fichte | Holz | 0.13 | 0.17 | 0.6 | 0.77 | 5.55 |
| Lärche | Splintholz | 0.018 | 0.07 | 0.24 | 0.31 | 4.19 |
| Eiche | Splintholz | 0.003 | 0.3 | 0 | 0.3 | 2.47 |
| Waldkiefer | Splintholz | 0.046 | 0.32 | 0.91 | 1.23 | 1.02 |
| Arve | Rinde | 0.327 | 1.07 | 4.47 | 5.54 | 36.1 |
| Buche | Rinde | 0.005 | 0.13 | 0.02 | 0.15 | 10.59 |
| Lärche | Rinde | 0.047 | 0.22 | 0.33 | 0.55 | 10.87 |
| Eiche | Rinde | 0.007 | 0.44 | 0 | 0.44 | 13.23 |
| Waldkiefer | Rinde | 0.192 | 0.75 | 1.03 | 1.78 | 8.38 |
| Weisstanne | Rinde | 0.446 | 0.87 | 1.9 | 2.77 | 4.83 |
| Fichte | Rinde | 0.284 | 1.15 | 1.4 | 2.55 | 17.01 |
| Arve | Astknoten | 0.283 | 0.99 | 1.96 | 2.95 | 15.72 |
| Buche | Astknoten | 0.006 | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 1.94 |
| Lärche | Astknoten | 0.013 | 0.29 | 0.12 | 0.41 | 4.82 |
| Kiefer | Astknoten | 0.505 | 0.13 | 2.79 | 2.92 | 5.01 |
| Weisstanne | Astknoten | 0.181 | 0.58 | 0.76 | 1.34 | 14.14 |
| Fichte | Astknoten | 0.027 | 0.24 | 0.14 | 0.38 | 6.89 |
| Waldkiefer | Feinäste | 0.525 | 0.69 | 1.21 | 1.9 | 4.38 |
| Weisstanne | Feinäste | 0.136 | 1.01 | 0.12 | 1.13 | 4.52 |
| Fichte | Feinäste | 0.57 | 0.36 | 1.84 | 2.2 | 3.83 |
| Waldkiefer | Nadeln | 0.21 | 0.31 | 0.08 | 0.39 | 9.96 |
| Weisstanne | Nadeln | 0.311 | 0.35 | 0.04 | 0.39 | 11.24 |
| Fichte | Nadeln | 0.101 | 0.28 | 0.05 | 0.33 | 13.49 |

Bestimmungen zum vorliegenden Bericht

Dieser Bericht darf nicht ohne Genehmigung der Berner Fachhochschule, Architektur, Holz und Bau auszugsweise vervielfältigt werden. Jegliche Veröffentlichung des Berichts oder von Teilen davon bedarf der schriftlichen Zustimmung der Fachhochschule. Ein Original dieses Berichts wird für 5 Jahre aufbewahrt. Dieser Bericht ist nur mit den Unterschriften des Institutsleiters für und des Projektverantwortlichen gültig.