

Holzbasierte Bioraffinerie

Status Quo und Chancen



Erdöl ist der derzeit dominierende Ausgangsrohstoff für chemische Produkte auf dem Weltmarkt. In einer Raffinerie wird der Rohstoff Erdöl durch Reinigung und Destillation in höherwertige Produkte umgewandelt. Dazu zählen zum Beispiel Erzeugnisse wie Kraftstoff, Heizöl und Kerosin oder auch Ausgangsprodukte für unterschiedlichste Kunststoffe.

Nachwachsende Rohstoffe aus der Land- und Forstwirtschaft stellen sowohl stofflich als auch energetisch eine Alternative zum Erdöl dar. Diese Biomasse ist sehr komplex zusammengesetzt. Den größten Anteil haben Verbindungen, die den Fetten, Kohlenhydraten oder Proteinen zuzuordnen sind. Dadurch eignet sie sich als Grundlage für chemische Produkte.

Das Prinzip der Bioraffinerie hat bis auf die Rohstoffe viele Ähnlichkeiten mit dem der Erdölraffinerie, in welcher der komplex zusammengesetzte Rohstoff Erdöl in einzelne Fraktionen oder Komponenten getrennt wird. Ein wichtiges Ziel des Konzepts „Bioraffinerie“ ist es, Erdöl als bislang dominierenden Rohstoff der chemischen Industrie langfristig zu ersetzen, und somit zu einer biobasierten Industrie zu gelangen.

Unter den Bioraffineriekonzepten haben sich verschiedene Pfade herauskristallisiert, die sich vor allem durch die verarbeiteten Biomassen unterscheiden. So werden sowohl in der Zucker- bzw. Stärke-Bioraffinerie als auch in der Pflanzenöl-Bioraffinerie überwiegend landwirtschaftliche Rohstoffe genutzt. In der Lignocellulose-Bioraffinerie bzw. Grünen Bioraffinerie wird dagegen überwiegend Holz eingesetzt.

In einer Bioraffinerie werden aus Biomasse verschiedene Zwischen- und Endprodukte wie Chemikalien, Werkstoffe und Bioenergie nachhaltig erzeugt. Konzepte, bei denen die werkstofflichen Eigenschaften der Rohstoffe im Vordergrund stehen, werden auch als „Bioproduktwerke“ bezeichnet. Ziel ist es, dabei alle Rohstoffkomponenten möglichst vollständig zu verwerten. Wichtig für die Wirtschaftlichkeit ist, dass einer Bioraffinerie ein ganzheitliches Konzept und die Integration effizienter Verfahren und Technologien zugrunde liegen.

Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch die Verfahrensschritte Primär- und Sekundärraffination aus. In der Primärraffination erfolgt durch eine Vorbehandlung und Konditionierung eine Aufspaltung der Biomasse in Zwischenprodukte. Diese Zwischenprodukte, auch Intermediate genannt, sind beim Holz zum Beispiel Rohfasern, Cellulose oder Lignin. Die daraufhin folgende Konversion und Veredelung der Intermediate wird als Sekundärraffination bezeichnet.

Eine moderne Bioraffinerie zeichnet sich durch die Kopplung von stofflichen und energetischen Produktpfaden aus. Dabei können nicht marktfähige Reststoffe zur integrierten energetischen Nutzung zur Eigenversorgung oder Vermarktung von Strom und Wärme verwendet werden. Damit leisten Bioraffinerien nicht nur einen positiven Beitrag zur Rohstoffwende, sondern auch zur Energiewende und zum Klimaschutz.

„Eine Bioraffinerie zeichnet sich durch ein explizit integratives, multifunktionelles Gesamtkonzept aus, das Biomasse als vielfältige Rohstoffquelle für die nachhaltige Erzeugung eines Spektrums unterschiedlicher Zwischenprodukte und Produkte [...] unter möglichst vollständiger Verwendung aller Rohstoffkomponenten nutzt; als Koppelprodukte können zusätzlich auch Nahrungs- und/oder Futtermittel anfallen. Hierfür erfolgt die Integration unterschiedlicher Verfahren und Technologien.“

Quelle: Roadmap Bioraffinerien



Je nach Konzeption einer Bioraffinerie unterscheidet man zwischen dem „*bottom-up*“- und dem „*top-down*“-Ansatz. Der „*bottom-up*“-Ansatz beschreibt die Erweiterung einer bereits vorhandenen Biomasseverwertungsanlage. In der holzbasierten Bioökonomie sind das insbesondere Zellstoffwerke. Neue und hoch integrierte Anlagen fallen meist unter den „*top-down*“-Ansatz. Diese Anlagen haben das Ziel, aus einem bestimmten Rohstoff eine Vielzahl an Produkten für verschiedenste Märkte abfallfrei zu produzieren. Wichtigstes Unterscheidungsmerkmal ist, dass hier keine bestehende Anlage ausgebaut wird, sondern die Anlagen für Primär- und Sekundärraffination eigens errichtet werden.

Holz als Rohstoff für Bioraffinerien

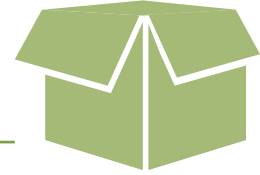
Das Konzept der Bioraffinerie mit einer ganzheitlichen und hochwertigen Nutzung von Holz befindet sich zum Großteil noch in der Entwicklung. In Ansätzen ist es aber bereits umgesetzt, zum Beispiel bei der Herstellung von Zucker, Bioethanol und Biodiesel, wo versucht wird, auch die Neben- bzw. Koppelprodukte hochwertig zu nutzen.

So werden zum Beispiel in der Bioraffinerie der Firma Borregaard in Snapsborg, Norwegen aus Fichte nicht nur Cellulose, Bioethanol und Grundlagenchemikalien hergestellt, sondern auch Vanillin für die Lebensmittelproduktion. Zudem wird seit 2016 auch mikrofibrillierte Cellulose (MFC) für Anwendungen in der Kosmetik-, Dünger- oder Lebensmittelindustrie hergestellt.

Die Leistungsfähigkeit einer holzbasierten Bioraffinerie hängt insbesondere vom Holzaufschlussprozess und vom Rohstoff ab: Beim Sulfit-Aufschluss werden die sehr hellen Zellstoffe heute fast ausschließlich für die Herstellung von Chemiecellulose oder Papier verwendet. Die als Nebenprodukt gebildeten Ligninsulfonate werden bisher entweder kommerziell verwertet oder verbrannt. Gerade für diese Lignine entstehen Potenziale für vielfältige Produkte und Verwendungen. Beim Prozess der Steam Explosion beziehungsweise der Hydrolyse entsteht Lignin hoch kondensiert und mit im Vergleich niedrigerer Reaktivität und Reinheit. Aktuell wird in Demonstrationsanlagen auch der Aufschluss von Holz mit Enzymen erforscht.

Grundsätzlich sollen die aus Holz gewonnene Cellulose, Hemicellulosen und das Lignin in höherwertige Anwendungen gebracht werden. Bioraffinerien, bzw. Bioproduktwerke sind zentrale Komponenten für die Transformation der Wirtschaft zu einer Bioökonomie.

Verpackung und Materialien Seite 5



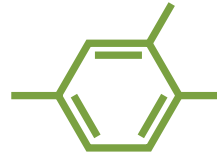
Cellulose und Nanocellulose Seite 8

Treibstoffe Seite 10



Chemikalien Seite 11

Lignin Seite 14



SWOT-Analyse „holzbasierter Bioraffinerie“ Seite 16

Beispiele für holzbasierte Bioraffinerien in Europa und Deutschland Seite 18

Handlungsempfehlungen für eine Stärkung der holzbasierten Bioraffinerie in Bayern Seite 20



Für weitere Informationen zur holzbasierten Bioökonomie wird auf die Clusterbroschüre „Holzbasierte Bioökonomie“ verwiesen.



Impressum

Herausgeber:
Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH
Am Zentrum Wald-Forst-Holz Weißenstephan
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1
D-85354 Freising
E-Mail: post@cluster-forstholzbayern.de
Internet: www.cluster-forstholzbayern.de

Vertreten durch / verantwortlich: Geschäftsführer Dr. Jürgen Bauer

Bearbeitung: Dr. Jürgen Bauer, Johannes Rahm, Prof. Dr. Hubert Röder, Stefan Torno

Partner: Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern

Realisierung: KOLLAXO Markt und Medien GmbH
Internet: www.kollaxo.com

Gestaltung: Die Werkstatt Medien-Produktion GmbH

Quelle für Titelabbildung: .bwc management consulting GmbH, Abensberg; verändert
2. Auflage im Mai 2020

Alle Texte und Abbildungen unterliegen urheberrechtlichem Schutz und dürfen nur mit Genehmigung weiterverwendet werden. Alle Angaben nach bestem Wissen und Gewissen; für die Vollständigkeit und mögliche Fehler können wir keine Garantie und Haftung übernehmen.

Auf Anfrage sind Quellen sowie weitere Literatur vom Verfasser beziehbar. Die Erstellung der Schrift wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert.

Die vorliegende Broschüre basiert auf Recherchen und Expertengesprächen und erhebt keinen Anspruch auf Richtigkeit oder Vollständigkeit.

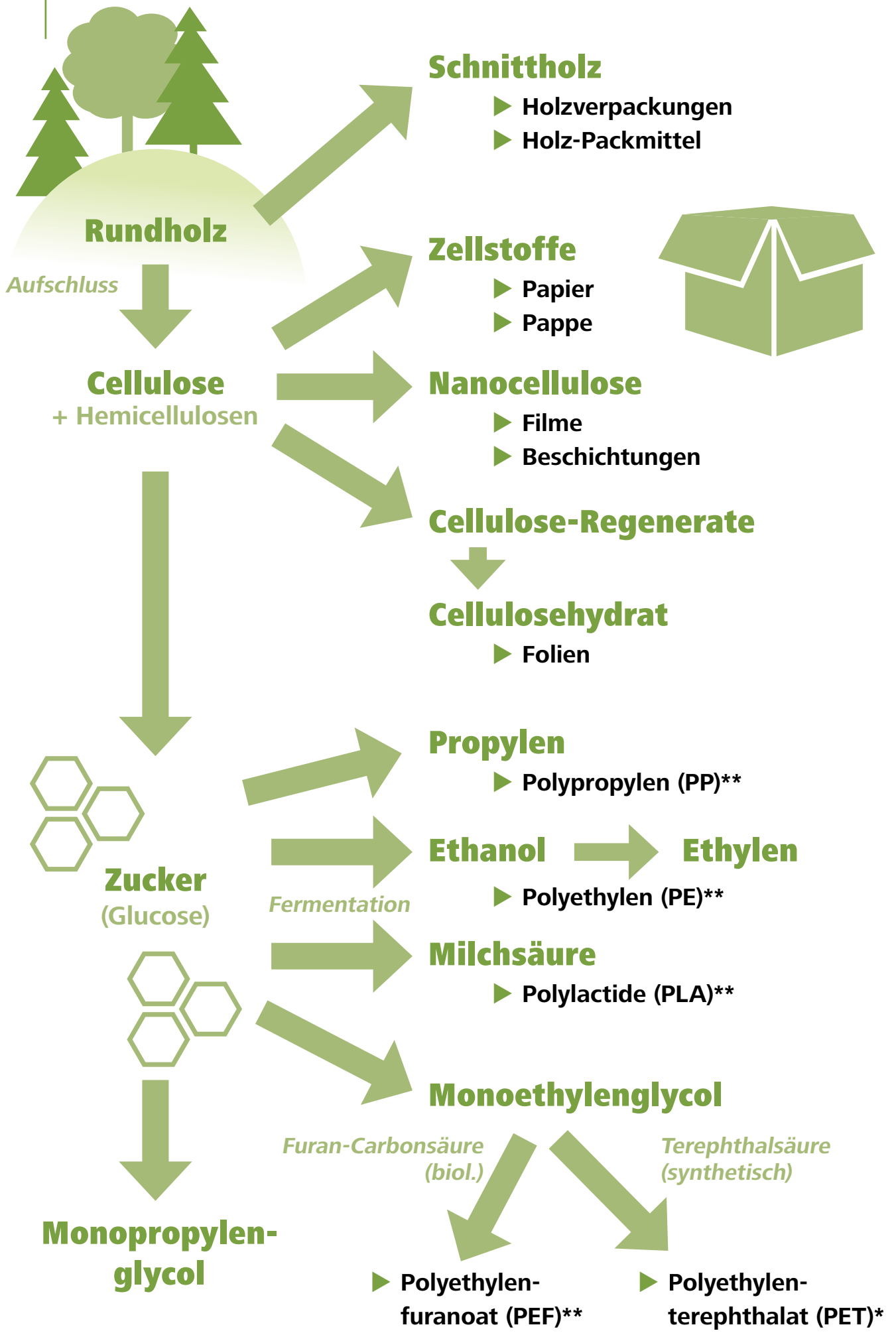
Verpackung und Materialien

Deutschland hat ein Verpackungsproblem. Nach Meldungen des Umweltbundesamtes fallen durchschnittlich pro Jahr und Kopf mehr als 200 Kilogramm Verpackungsabfall an (Statistik für 2016). Einen großen Teil davon machen Verpackungsabfälle aus Kunststoff aus, die jedoch nur unzureichend stofflich recycelt werden: Schätzungen zufolge verbleiben nur fünf Prozent des Verpackungsmaterials in der Wirtschaft, der Rest geht nach einer sehr kurzen Erstanwendung verloren und wird in der Regel einer energetischen Verwertung zugeführt, sprich verbrannt. Dieses Vorgehen verursacht schätzungsweise jährliche Kosten von bis zu 100 Millionen Euro und belastet darüber hinaus die Umwelt, da Kunststoffe auf Erdölbasis nicht biologisch abbaubar sind. Zu diesen Belastungen zählt Mikroplastik mit bislang noch unbekanntem Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen, die Flora und Fauna und somit die gesamte Umwelt.

Neben dem Einsatz alternativer, nachwachsender Rohstoffe müssen Verpackungen demnach gut recyclingfähig und im besten Fall zusätzlich unschädlich biologisch abbaubar sein. Holz kann alle dieser Anforderungen erfüllen: Es wächst nachhaltig in ausreichender Menge nach und ist biologisch abbaubar. Herkömmliche Verpackungsmaterialien wie Papier und Pappe können ausgezeichnet recycelt werden – die Quote ist sehr hoch. Gleiches gilt für Holzpackmittel, also Paletten, Kisten, Schachteln. Sie können mehrfach verwendet werden und finden am Ende ihres Lebenszyklus Weiterverwertung in Holzwerkstoffen oder als Energiesortimente. Auch für Verpackungen mit höheren Anforderungen, zum Beispiel für Lebensmittel, bietet Holz Lösungen. Aus Cellulose und Hemicellulose, den Polymeren des Holzes, lassen sich Ethylen und Propylen synthetisieren und daraus wiederum Kunststoffverpackungen (Polyethylen PE, Polypropylen PP, Polyethylenterephthalat PET) herstellen, welche die gleichen Eigenschaften wie konventionelle, erdölbasierte Produkte besitzen. Sie sind damit biobasiert, jedoch ebenfalls nicht biologisch abbaubar (siehe Infobox). Diese Anforderung erfüllen chemisch neuartige biobasierte Kunststoffe, wie beispielsweise Polymilchsäure PLA und Polyethylenfuranat PEF. Alternativ bieten sich Lösungen an, welche ebenfalls auf Cellulose basieren, jedoch deren Struktur und Eigenschaften weitgehend beibehalten. Über thermo-mechanische Prozesse, also ohne Zugabe von Chemikalien, lassen sich viskoseähnliche Folien (Zellophan) oder auch Nanocellulosen erzeugen, zum Beispiel Mikrofibrillierte Zellulose. Die Folien lassen sich beschichten, um zum Beispiel die Wasserdampfdurchlässigkeit zu erhöhen. Nanocellulosen lassen sich mit weiteren Bio-Molekülen „funktionalisieren“, sodass sich ebenfalls Filme oder Beschichtungen mit hoher Undurchlässigkeit für Wasserdampf, Sauerstoff und Bakterien herstellen lassen – wichtig für Lebensmittel oder auch Hygiene- und Medizin-Produkte.

Biobasierte, bioabbaubare bzw. kompostierbare Kunststoffe/Verpackungen

Biobasierte Kunststoffe oder Verpackungen bestehen aus nachwachsenden Rohstoffen, sind jedoch nicht zwangsläufig gleichzeitig biologisch abbaubar (was für die Mehrheit zutrifft). Beim biologischen Abbau werden die organischen Bestandteile eines Kunststoffs vollständig zu den Stoffwechselprodukten Wasser und Kohlenstoffdioxid abgebaut, ungeachtet der Zeitdauer des Abbauvorgangs. Der sehr allgemeine Begriff „bioabbaubar“ muss jedoch vor allem mit Bezug auf die Umgebung und den Zeitraum betrachtet werden. Unter „normalen“ Umweltbedingungen benötigen manche Kunststoffe mehrere hundert bis tausend Jahre für den vollständigen Abbau. Die industrielle Kompostierung verkürzt durch Kontrolle von Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoffgehalt den Zeitraum des Abbaus, reicht jedoch ebenfalls für einige „bioabbaubare“ Produkte nicht aus.



VERPACKUNG UND MATERIALIEN

Folgende Abbildung zeigt für diesen Bereich mögliche Produkte und Nutzungspfade, den geschätzten TRL sowie ausgewählte Unternehmen bzw. F&E-Organisationen an, die sich aktuell damit beschäftigen:

Produkte / Nutzungspfade	TRL	Ausgewählte Unternehmen / F&E-Organisationen
WPC	9	Evonik Industries (D) NATURinFORM (D) REHAU AG etc. (D)
Neue Materialien zum Ersetzen von auf Plastik basierenden Fasern	6-9	Lenzing (A) VTT Paptic (FIN) Stora Enso (FIN, S) Super Seven (D) Biofibre GmbH (D) August Köhler (D) Sappi (S, D)
Additive Fertigung – 3D-Druck	3-6	EMPA (CH)
Nanocellulose für Verpackung	6-8	Stora Enso (FIN) Mid Sweden + RISE-Projekt PlastiCel (S)
Monoethylenglycol (MEG)	4-7	UPM Leuna (D)
Biowerkstoffe - Leichtbau	4-9	UPM BioFormo (FIN) Metsä (FIN) Purcell-Denkendorf (D) Arboform Fa. Tecnaro (D) BioGrada UPM (FIN) Lightweight Solutions (D) Ikea weltweit

TRL

TRL ist eine Abkürzung für Technology Readiness Level (zu Deutsch Technologie-Reifegrad). Auf einer Skala von 1-9 gibt dieser an, wie weit eine Technologie entwickelt ist. Die Stufe TRL 9 beschreibt eine Technologie, welche nachweislich erfolgreich eingesetzt wird. TRL 1 steht für grundlegende Forschungen zum Funktionsprinzip.

Cellulose und Nanocellulose

Cellulose ist der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Damit ist es das am häufigsten vorkommende Biomolekül der Erde. Die im Folgenden thematisierte Nanocellulose sowie Cellulose-Regeneratfasern sind nur zwei Beispiele dafür, wie durch innovative Verfahren Cellulose jenseits der Papierherstellung im Sinne des Bioökonomie-Konzepts genutzt werden kann.

Cellulose-Fasern

Nanocellulose

Die Fibrillen und Kristalle der Cellulose haben hervorragende Eigenschaften, welche in verschiedensten Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Es ist möglich, Cellulose mit Dimensionen im Nanometerbereich aus dem Holz zu isolieren. Diese Cellulose bezeichnet man als Nanocellulose.

Mikrofibrillierte Cellulose, MFC

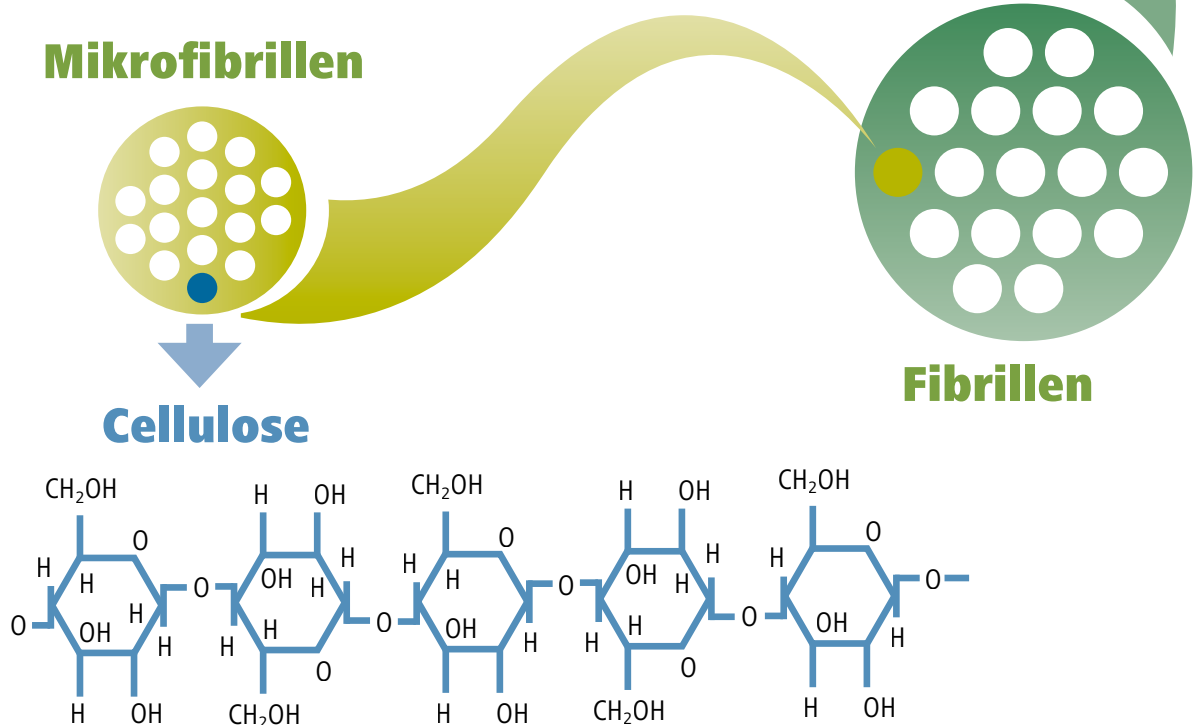
MFC hat einen Durchmesser von circa 5 bis 100 Nanometer. Verwendet wird Mikrofibrillierte Cellulose in verschiedenen Verpackungsmaterialien, Nanokompositen, Emulsions- und Dispergiermitteln sowie im Lebensmittelbereich. Auch in medizinischen, kosmetischen und pharmazeutischen Produkten wird MFC eingesetzt.

Nanokristalline Cellulose, NCC

Der Durchmesser von NCC liegt zwischen 5 und 20 Nanometern. NCC besitzt besondere flüssigkristalline Eigenschaften. Besonders für die Branchen Papierindustrie, Verpackungsindustrie oder Beschichtungsunternehmen ist Nanokristalline Cellulose ein vielversprechendes Produkt.

Mikrokristalline Cellulose, MCC

MCC ist weiße, freifließende Cellulose. In der Pharma- und Lebensmittelindustrie wird MCC als Ballaststoff, Trennmittel oder Trägerstoff verwendet.



CELLULOSE UND NANOCELLULOSE

Folgende Abbildung zeigt für diesen Bereich mögliche Produkte und Nutzungspfade, den geschätzten TRL sowie ausgewählte Unternehmen bzw. F&E-Organisationen an, die sich aktuell damit beschäftigen:

Produkte / Nutzungspfade	TRL	Ausgewählte Unternehmen / F&E-Organisationen
Monokristalline Cellulose (MCC) im Pharmabereich	7-9	HARKE Pharma GmbH (D)
Regeneratfasern (Viskose, Modal, Lyocell) u.a. für Textilien	7-9	Lenzing (A) Kelheim Fibres (A) Spinnova (FIN); Metsä (FIN) Enka (D) Austrocell (A) Spin-Dye (S)
Mikrofibrillierte Cellulose (MFC)	6-7	Weidmann, (CH) Borregard, Snapsborg (N) JeNaCell Zelfa-Technologie (D); Fiberline (D) Wood Science Center (S)
Wood to food	2-3	VTT Helsinki (FIN) Norwegen RISE+Oslo Uni Boregaard (N)
Carbonfasern (Lignin, Cellulose) für Werkstoffe	3-5	TU Dresden + Leibniz-Institut für Polymerforschung (D); Laubholztechnikum BaWü (D); SGL Carbon (D) Fraunhofer IAB; Wallenberg Wood Science Center (S)

Cellulose-Regeneratfasern

Regeneratfasern aus Holz zeichnen sich durch eine wesentlich bessere Ökobilanz als Baumwolle aus. Sowohl Bio- als auch konventionell produzierte Baumwolle haben einen enorm hohen Wasserverbrauch. Für ein Kilo Baumwolle werden im Durchschnitt circa 11.000 Liter Wasser benötigt. Für holzbasierte Regeneratfasern wird nur ein Zwanzigstel des Wassers gebraucht. Zudem wird bei der Holzproduktion düngemittel- und pestizidfrei gearbeitet. Dadurch, dass die Ressource Holz auch in Europa vorhanden ist, können auch die durch den Transport entstehenden Umweltauswirkungen um ein Vielfaches verringert werden.

Viskosefasern

Als Viskosefasern bezeichnet man Chemiefasern aus Cellulose. Regenerierte Cellulose ist chemisch identisch mit der nativen Cellulose. Viskosefasern sind also chemisch identisch zu Baumwollfasern. Als Ausgangsrohstoff zur Viskoseproduktion dienen Holz (Fichte, Buche, Eukalyptus-, Kiefernarten) sowie Bambus.

Modalfasern

Als Modalfaser bezeichnet man eine strukturmodifizierte Viskosefaser, welche einen höheren Polymerisationsgrad besitzt. Der Unterschied zur Viskose entsteht durch veränderte Spinnbedingungen, veränderte Fällbäder und die Zugabe von Spinnhilfsmitteln. Modalfasern zeichnen sich, verglichen mit Normalviskosefasern, durch eine höhere Festigkeit aus. Modalfaser wird hauptsächlich aus Buchenholz gewonnen.

Lyocellfasern

Lyocellfasern zeichnen sich durch ihre hohe Trocken- und Nassfestigkeit aus. Lyocellfasern werden nach dem sogenannten Direkt-Lösemittelverfahren hergestellt. Dieser Prozess ermöglicht unter anderem auch die Zugabe von Additiven in die Spinnlösung. Somit können bioaktive, absorbierende und thermoregulierende Fasern erzeugt werden.

Treibstoffe

Holz rückt auch als Rohstoff für gasförmige und flüssige Kraftstoffe international immer mehr in den Vordergrund. Bereits zu Beginn des letzten Jahrhunderts war die Nutzung von Holzvergaser-Fahrzeugen in breiter Verwendung. Aus Holz lässt sich zum Beispiel Methangas und damit ein hochwertiger regenerativer Energieträger herstellen. Das synthetische Gas entspricht in seiner Energieleistung und Qualität ungefähr dem Erdgas. Allerdings benötigt man für eine wirtschaftliche Produktion relativ große Holzmen gen sowie günstige Holzsortimente. Sowohl Waldholzsortimente von minderer Qualität als auch zum Beispiel Altholz aus dem Baurecycling könnten hierfür in Frage kommen. Die Holzvergasung zur Stromerzeugung mit Kraft-Wärmekopplung könnte zukünftig auch in kleineren Anlagen eine wichtige Nische darstellen. Zusätzlich bietet die Holzvergasung auch die Möglichkeit zur Erzeugung von biogenem Wasserstoff als Basis einer CO₂-freien Energieversorgung und Mobilität. Der weltweit aktuell meistproduzierte Biokraftstoff, Ethanol, enthält im Vergleich zu Benzin und Diesel verhältnismäßig wenig Energie. Ein großer Teil Energie geht zudem in der Produktion verloren: In der Praxis muss die Cellulose aus Holz zunächst in Einfach-Zucker „zerlegt“ werden. Erst dann kann man diese über weitere Zwischenschritte (Fermentierung) in Ethanol umwandeln. Auch die in Hemicellulosen enthaltenen Pentosen lassen sich zu Bioethanol für Kraftstoffe fermentieren. Allerdings werden hierfür – im Gegensatz zur Cellulose-Verarbeitung – spezielle Hefen benötigt, welche diese Zucker verstoffwechseln können. Dazu gibt es derzeit mehrere Forschungsansätze. Trotz jahrzehntelanger Forschungstätigkeit bleibt zumindest der Holzaufschluss für Bioethanol schwierig, teuer und energieintensiv, sodass die Technologie – zumindest für Deutschland – aktuell nicht wettbewerbsfähig ist. BtL-Kraftstoffe (englisch: biomass to liquid = „Biomasseverflüssigung“) sind dagegen synthetische Kraftstoffe, die durch thermo-chemische Umwandlung aus Biomasse hergestellt werden. Die Verfahren sind noch in der Entwicklung und bei den aktuellen Ölpreisen nicht konkurrenzfähig. Der wichtigste Schritt im Herstellungsverfahren ist die Vergasung der Biomasse, bei der das sogenannte Synthesegas erzeugt wird. Anschließend folgt die Synthese mit dem Fischer-Tropsch-Verfahren oder dem Methanol-to-Gasoline-Verfahren (MtG). Als Endprodukt fallen Kraftstoffe an, die problemlos in Otto- oder Dieselmotoren verwendet werden können. BtL-Kraftstoffe sind sogenannte Biokraftstoffe der zweiten Generation, das heißt, dass sie ein breiteres Rohstoffspektrum besitzen als zum Beispiel Bioethanol. Statt Holz kann so auch weitere cellulosereiche Biomasse wie Stroh genutzt werden.



Biodiesel-Produktion in Lappeenranta

Die Bioraffinerie der Firma UPM in Lappeenranta/ Finnland ist die weltweit erste Anlage, die kommerziell erneuerbaren Diesel und Naphtha aus Holz erzeugt. Dabei wird das in der Zellstoffproduktion aus Kiefernholz anfallende Tallöl genutzt. Unter Tallöl versteht man die bei der Zellstoffkochung freiwerdenden Extraktstoffe und Harze des Holzes.

TREIBSTOFFE

Folgende Abbildung zeigt für diesen Bereich mögliche Produkte und Nutzungspfade, den geschätzten TRL sowie ausgewählte Unternehmen bzw. F&E-Organisationen an, die sich aktuell damit beschäftigen:

Produkte / Nutzungspfade	TRL	Ausgewählte Unternehmen / F&E-Organisationen
Ethanol	5-9	ST1-North European Bio Tech Oy (FIN); Clairant (D) Fortum (FIN) Neste (FIN)
Biokraftstoff für Transport	4-8	UPM Lapeenranta (FIN) VTT (FIN) Güssing (A) Demoanlage im Fischer-Tropsch-Verfahren
Schnell-Pyrolyse	4-7	VTT Helsinki (FIN)

Chemikalien

Holz besteht, je nach Holzart, zu etwa 45 Prozent aus Cellulose, 25 Prozent aus Hemicellulosen, zu 25 Prozent aus Lignin und fünf Prozent Nebenbestandteilen.

Cellulose, der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände, ist das global am häufigsten vorkommende und das wichtigste industriell genutzte nachwachsende Biopolymer. Die jährlich anfallende Menge beträgt circa 100 Milliarden Tonnen. Neben der Nutzung der „Faserstruktur“ lässt sich Cellulose in ihre chemischen Bausteine aufspalten. Diese industriellen Zucker (Glucose) lassen sich zu Chemikalien weiterverarbeiten, welche auf fossilen Rohstoffen basierende Chemikalien eins zu eins ersetzen können. Dies erleichtert die Umstellung einer erdölbasierten Wirtschaftsweise hin zur Bioökonomie erheblich, da die Verarbeitungsverfahren und -technologien nicht verändert werden müssen und auch eine „Vermischung“ möglich ist. Beispiele dafür sind Ethylen und Propylen, welche unter anderem für biobasierte Kunststoff-Verpackungen verwendet werden können. *Hemicellulosen* sind – im Gegensatz zur Cellulose – ein Gemisch unterschiedlicher Polysaccharide (Mehrfachzucker) in verschiedenen Zusammensetzungen. Beispiele für Polysaccharide sind Xylane, Mannane und Galactane. Polysaccharide sind wiederum aus Monosacchariden (Einfachzuckern) aufgebaut, häufig finden sich Pentosen (Xylose, Arabinose) und Hexosen (Mannose, Glucose, Galactose). Industriell bedeutsam sind derzeit v. a. die Xylane. Sie dienen der Gewinnung von Xylose als Basis zur Herstellung von Xylit (Zuckeraustauschstoff für diabetische bzw. zuckerreduzierte Lebensmittel), sulfonierten Xylooligomeren (Anwendungen in der Medizin) und Furfural. Letzteres ist eine bedeutsame Plattformchemikalie für die Herstellung von Arznei- und Lösungsmitteln für die chemische Industrie. Auch die Abkömmlinge von Furfural werden vielfältig eingesetzt. Furfurylalkohol dient zur Herstellung von Furanharzen, welche als Spezialkunststoffe verwendet werden, als Lösungsmittel und für die chemische Holzmodifikation (Reduzierung der Wasseraufnahmefähigkeit von Holz), Furan dient als Vorstufe für Tetrahydrofuran, welches als Lösungsmittel eingesetzt wird. Insgesamt gibt es – in Relation zu den vielen unterschiedlichen Bausteinen – für Hemicellulosen bisher noch wenige kommerzielle Anwendungen – das Potenzial ist entsprechend hoch. Unter anderem wird für Xylane der Einsatz als Papieradditiv und die Herstellung von Folien für den Verpackungsbereich untersucht.

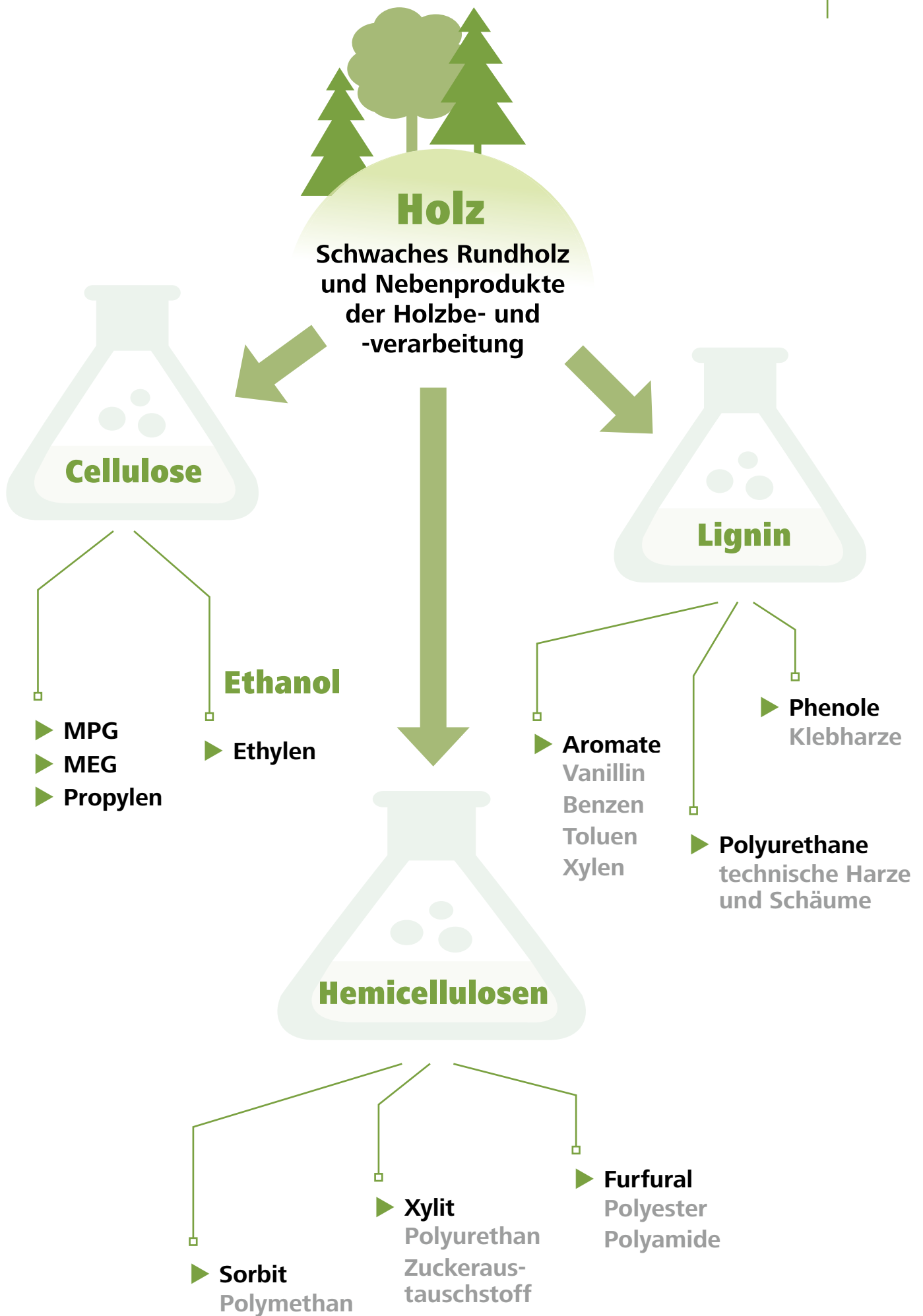


Lignin eignet sich aufgrund seiner einzigartigen und chemisch mannigfaltigen Struktur vor allem für die Herstellung von Spezial-Chemikalien. Dabei ist es wichtig, dass während des „Herauslösungs-Prozesses“ die ursprüngliche Struktur möglichst erhalten bleibt. Lignin-Anwendungen weisen ein hohes Innovations- und Wertschöpfungspotenzial auf, insbesondere für spezifische und hochwertige Anwendungen, welches noch nicht ausgeschöpft ist. Dafür müssen jedoch noch geeignete Verfahren entwickelt werden, um eine Herauslösung, Trennung, Reinigung und weitere Funktionalisierung zu gewährleisten.

CHEMIKALIEN

Folgende Abbildung zeigt für diesen Bereich mögliche Produkte und Nutzungspfade, den geschätzten TRL sowie ausgewählte Unternehmen bzw. F&E-Organisationen an, die sich aktuell damit beschäftigen:

Produkte / Nutzungspfade	TRL	Ausgewählte Unternehmen / F&E-Organisationen
Aromate (z. B. Vanillin, Xylen)	6-9	Borregard (N)
Auf Lignin basierende Phenole für Klebstoffe, Lacke	6-9	UPM (FIN) Kronospan (D) XLP Group (D)
Hemicellulosen (Sorbit, Xylit, Furfural)	4-9	Xylose to value added chemicals: VTT Helsinki (FIN) RISE (S)
Ligninprodukte zum landwirtschaftlichen Düngen	7-9	Borregard, Snapsborg (N) Domtar (USA) NOVIHUM (D)
Auf Holz basierende Schäume (Polyurethane) für Werkstoffe	5-7	TUM Straubing (D) VTT Projekt (FIN) Odenwald Chemie (D) Wood Science Center (S)
Grundlagenchemikalien	5-9	UPM (FIN) Fortum
Extraktstoffe, z. B. Tannine, Terpene	4-7	VTT Helsinki (FIN) UPM (F)
Enzymaufschlussverfahren	3-4	TUM (D)
Schnell-Pyrolyse für chemische Grundstoffe	3-4	VTT Helsinki (FIN) RISE (S)



Lignin

Neben Cellulose und Hemicellulosen besteht Holz zu etwa 20 bis 30 Prozent aus Lignin („Holzstoff“). Es fällt vor allem in Form von Kraft-Lignin (Sulfataufschluss) und Lignosulfonaten (Salze der Ligninsulfonsäure aus dem Sulfatverfahren) als Koppelprodukt bei der Papier- und Zellstoffproduktion an (jährlich weltweit circa 50 Mio. Tonnen) und kann aus den Abläugen extrahiert werden. Lignine sind aufgrund ihrer sehr komplexen Struktur und der damit verbundenen Inhomogenität und des zum Teil hohen Schwefelanteils von geringer „Reinheit“ und daher für die direkte Anwendung als Rohstoff weitgehend unbrauchbar. Daher und aufgrund des hohen Energiegehalts wurden bzw. werden die Lignine häufig zur Energieerzeugung direkt in den Zellstoffwerken verwendet. Lignosulfonate werden darüber hinaus als relativ unspezifische Dispergiermittel (zum Beispiel Beton-, Ziegel- und Textilindustrie, Produktion von Gipskarton) und Bindemittel (zum Beispiel Ersatz phenolischer Komponenten in der Holzwerkstoffindustrie) verwendet. Durch eine Weiterverarbeitung kann jedoch auch eine Vielzahl weiterer, spezifischer Produkte hergestellt werden. Dazu gehören das aus der Lebensmittelindustrie bekannte Vanillin (Aromastoff), Dimethylsulfid und Dimethylsulfoxid (wichtige organische Lösungsmittel) oder Ethanol (durch Fermentierung der enthaltenen Hexosen). Durch Pyrolyse lassen sich – je nach Temperatur – Phenole, Methan, Kohlenmonoxid, Aktivkohle, Synthesegas, Ethen, Benzol oder Acetylen gewinnen, bei der Hydrogenolyse entstehen Phenole, Teer, Benzol und Öle. Neueste Forschungen zielen auf den Einsatz von Lignin in metallfreien Redox-Flow-Batterien zur Energiespeicherung sowie als Präkursor (Vorstufe) für die Erzeugung von Bio-Carbonfasern ab. Am Potsdamer Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP) ermöglicht ein neuartiges Herstellungsverfahren bei Temperaturen von bis zu 2900 Grad Celsius die Herstellung biobasierter Carbonfasern, deren Eigenschaften teilweise die von herkömmlichen, erdölbasierten Carbonfasern erreichen – ein wichtiger Meilenstein in der Lignin-Forschung. Weitere Anwendungen, an denen geforscht wird, sind die Erzeugung von Plattformchemikalien für die chemische Industrie (Nutzung der aromatischen Verbindungen), die Entwicklung umweltfreundlicher und gesundheitlich unbedenklicher Klebstoffe (Polyurethane, Epoxide, Phenol-Formaldehyd-Harze) und ligninbasierte Kunststoffe und Werkstoffe (zum Beispiel Schäume).

Lignin

Lignin – bzw. genauer Lignine – bilden eine Gruppe phenolischer Makromoleküle, die aus verschiedenen Monomeren aufgebaut sind. Lignin ist das einzige bekannte natürliche, biologische, aromatische Polymer, weshalb es im Rahmen einer biobasierten Wirtschaft eine große Rolle spielen könnte. Herausfordernd sind die unterschiedlichen Aufschlussverfahren von Holz, welche sich unter anderem auf die Struktur und die Eigenschaften der gewonnenen Lignine auswirken. Je nach Verfahren weisen letztere eine andere Zusammensetzung auf und unterscheiden sich von den ursprünglich im Holz vorhandenen Ligninen.



Holz

Nebenprodukt
der Cellulose-
Herstellung

Lignosulfonate und Dispergiermittel

- ▶ Gipskarton
- ▶ Asphalt
- ▶ Beton
- ▶ Ziegel
- ▶ Textilindustrie

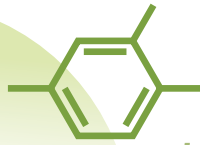
Bindemittel, Klebstoffe, Beschichtungen

- ▶ (Holz-)Werkstoffe
- ▶ Bauwirtschaft
- ▶ Korrosionsschutz
- ▶ Bodenverbesserung

Treibstoffe

Energiespeicher

- ▶ Batterien



Lignin

Isolieren · Trennen · Reinigen · Funktionalisieren

Energiegewinnung

thermische Verwertung

Lösungsmittel

- ▶ Dimethylsulfit
- ▶ Dimethylsulfoxid

Aromate

- ▶ Vanillin
- ▶ Antioxidantien

Bio-Kunststoffe und Schäume

Carbon-Fasern

- ▶ Hochleistungswerkstoffe

Technische / Funktionale Kohlenstoffe

- ▶ Additive für Gummi und Thermoplaste
- ▶ Filter zur Wasser- und Gasaufbereitung
- ▶ Nanomaterialien

SWOT-Analyse „holzasierte Bioraffinerie“

Stärken von holzasierten Bioraffinerien

- Innovative Chemie- und Biotechnologieunternehmen sind etabliert; es kann auf bereits bestehende Strukturen der industriellen Biotechnologie aufgebaut werden
- Regional sehr gut entwickelte Zellstoffindustrie mit unterschiedlicher Ausrichtung
- Starker deutscher Maschinen- und Anlagenbau
- Keine unmittelbare Rohstoffkonkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion bei Nutzung von Holz
- Starke Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der chemischen und biotechnologischen Konversion von Kohlenhydraten und deren Weiterveredlung vorhanden
- Rohstoffpotenzial: Rohstoffe in Deutschland, Europa und global prinzipiell verfügbar sowie nicht genutztes Potenzial forstwirtschaftlicher lignocelluloseischer Reststoffe vorhanden
- Erste Pilot- und Demonstrationsanlagen von Lignocellulose-Bioraffinerien sind in Deutschland in Betrieb oder im Aufbau (Leuna, Straubing, Waldkraiburg)

Schwächen von holzasierten Bioraffinerien

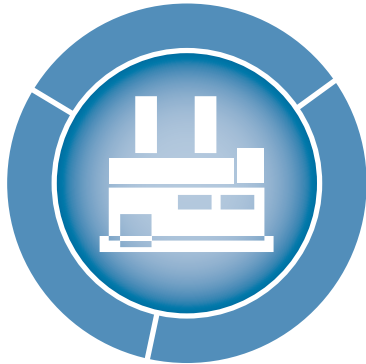
- Konkurrenzsituation bei der Nutzung von einheimischem Waldholz unter Berücksichtigung der multi-funktionalen Ansprüche an den Wald können das Rohstoffangebot einschränken
- Synthesegas- und Lignocellulose-Bioraffinerie nutzen gleiche Rohstoffbasis
- Ligninverwertung ist im Hinblick auf Produkte mit hoher Wertschöpfung noch unterentwickelt
- Verwertung der Pentosen aus den Hemicellulosen bislang technologisch nicht ausgereift
- Aktivitäten zu Bioraffineriekonzepten für die deutsche Zellstoffindustrie unterdurchschnittlich entwickelt
- Integration der einzelnen Elemente der Lignocellulose-Bioraffinerie und deren Validierung im Zusammenwirken noch unausgereift
- Demonstration der Technologien im Einsatz in einem Industriemaßstab steht zumindest in Mitteleuropa noch aus
- Existierende Vorteile für den Klimaschutz nicht ausreichend dokumentiert

Chancen von holzbasierten Bioraffinerien

- Verknüpfung mit der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie noch unterentwickelt, jedoch mit hohem Potenzial
- Entwicklung neuer Wachstumsmärkte über ein „Top-down“-Entwicklungsszenario vorstellbar
- Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und Weiterentwicklung bestehender Standorte der Zellstoffindustrie durch Diversifizierung und neue Produkte über ein „Bottom-up“-Entwicklungsszenario
- Exportmöglichkeiten von deutschen Technologien und Anlagen basierend auf Lignocellulose zur Errichtung von Lignocellulose-Bioraffinerien im Ausland
- Erschließung neuer Quellen sowie Märkte für fermentierbare Kohlenhydrate
- Wesentlicher Beitrag zu Klimaschutz und regionaler Wertschöpfung

Risiken von holzbasierten Bioraffinerien

- Konkurrierende Nutzungsoptionen für lignocellulosische Biomasse
- Aktive Forstwirtschaft mit Rohstoffbereitstellung stark abhängig von Klimawandel und Politik (v. a. bei hohen Staatswaldanteilen, Förderung Privatwald, Unter-Schutzstellungen etc.)
- Starke, kompetitive Forschung und Entwicklung außerhalb von Deutschland (u. a. Skandinavien, USA)



In Anlehnung an „Roadmap Bioraffinerien“ der Bundesregierung von 2012; Neue Wege zur holzbasierten Bioökonomie; Nationales Forschungsprogramm der Schweiz von 2016 und Bioproduktewerk Schweiz im Auftrag des Bundesamts für Umwelt Schweiz von 2010-2018

Äänekoski Metsä (Äänekoski, Finnland)

Metsä hat sich der Entwicklung profitabler Stoffströme verschrieben. Durch die Inklusion neuer Prozesse entstehen Synergieeffekte. Es findet eine Kooperation mit der Stadt Äänekoski in der Fernwärmeproduktion statt. Unter anderem wird aus der Rinde extrahiertes Gas zur Energieversorgung der Anlage produziert. Dadurch werden 45.000m³ fossiler Treibstoff substituiert.

Borregaard (Sarpsborg, Norway)

In der Bioraffinerie in Sarpsborg werden vor allem Cellulose, Lignin, Lignosulphonate, bioethanol und verschiedene Hefen hergestellt. Daneben werden aber auch Vanillin sowie diverse Spezialchemikalien erzeugt. Diese Produkte können durch ihre Substitutionswirkung den Treibhausgasausstoß verringern.

UPM Lappeenranta (Lappeenranta, Finnland)

In dieser Bioraffinerie werden jährlich 100.000t erneuerbarer Diesel produziert. Die Anlage leistet dadurch einen Beitrag von circa 25% beim Erreichen von Finnlands Biotreibstoffziel 2020. Durch die Substitution von fossilem Treibstoff kann durch den Einsatz von Biodiesel 80% der CO₂-Emissionen gespart werden.

Beispiele für holzbasierte Bioraffinerien in Europa und Deutschland

Fraunhofer CBP (Leuna, Deutschland)

Das Fraunhofer CBP gibt Partnern aus Forschung und Industrie die Möglichkeit biotechnologische und chemische bis in produktrelevante Dimensionen zu skalieren und entwickeln. Mit dem flexibel einsetzbaren Bioraffineriekonzept können Rohstoffe wie Öle, Cellulose, Stärke oder Zucker aufbereitet und zu chemischen Produkten umgesetzt werden.

Lenzing Gruppe (Lenzing, Österreich)

Der Weltfaserverbrauch stieg im Jahr 2018 auf 106 Mio. Tonnen an. Es wird erwartet, dass die Nachfrage insgesamt und dabei insbesondere diejenige nach holzbasierten Cellulosefasern weiter steigt. Am Lenzing-Standort in Österreich werden jährlich 358.000t Fasern aus Buchenholz produziert.

Handlungsempfehlungen für eine Stärkung der holzbasierten Bioraffinerie in Bayern



- 1.** Aufbau einer spezialisierten Arbeitsgruppe innerhalb des Bioökonomie-Netzwerks in der bayerischen Hochschullandschaft
- 2.** Verbesserung der Infrastruktur in der Förderung
- 3.** Verstärkte Kommunikation der Bedeutung und Chancen holzbasierter Bioraffinerie-Konzepte auf politischer Ebene und in die Gesellschaft
- 4.** Cross-Clustering-Aktivitäten relevanter Einrichtungen (Cluster Forst und Holz, Chemie, Umwelt, Neue Werkstoffe etc.) ausbauen
- 5.** Stärkung der Bayerischen Cluster-Organisationen für zukünftige vermehrte Betreuung von Start-ups und Unternehmensgründungen
- 6.** Stärkung der länderübergreifenden Zusammenarbeit/ Internationalisierung
- 7.** Beantragte Pilot-Demoanlagen in Waldkraiburg und Straubing ausbauen
- 8.** Analyse/Prüfung von Standorten in Bayern inklusive Rohstoffversorgung zur möglichen Ansiedlung von Bioraffinerien