



## Vorwort

Unser Wirtschaftssystem braucht tagtäglich Ressourcen, also Rohstoffe und Produktionsmittel, um vielfältige Leistungen für die Bevölkerung bereit zu stellen. Doch wichtige Ressourcen sind – zumindest in Relation zur Geschwindigkeit ihres Verbrauchs – endlich und/oder belasten bei ihrer Nutzung die Umwelt, so zum Beispiel Erdöl.

Das Konzept der Bioökonomie zielt daher auf die vermehrte Nutzung von nachhaltig erzeugten biologischen Rohstoffen und Reststoffen ab. Die bayerische Staatsregierung hat bereits entscheidende Weichen gestellt, um einen strukturellen und gesellschaftlichen Wandel in Richtung einer nachhaltigen Bioökonomie einzuleiten und verfolgt diesen Weg weiterhin zielgerichtet.

Ein wichtiges Ziel der Bioökonomie ist die Substitution von Produkten auf Basis fossiler Rohstoffe durch Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen. In Bayern spielt Holz eine besondere Rolle, da es der am besten nachhaltig verfügbare nachwachsende Rohstoff ist. Zudem sind seine Einsatzmöglichkeiten vielfältig.

Höherwertige Sortimente finden bereits seit langem im Baubereich – tragend und Innenausbau inkl. Möblierung –, in der Holzwerkstoff- und Papierindustrie oder für Transportverpackungen Verwendung. Und während geringwertigere oder schwierig absetzbare Sortimente in der Vergangenheit häufig primär energetisch genutzt wurden, stehen dank intensiver Forschung und Entwicklung an Hochschulen und in Industrie-Unternehmen stetig mehr Verfahren und Produkte zu deren effizienter Nutzung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft bereit. Dadurch wird eine bestmögliche Ausnutzung des Rohstoffs Holz gewährleistet, klimaschädliches CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre über längere Zeiträume gebunden und zusätzlich das Potenzial der Bereitstellung von klimaneutraler Energie gewahrt. Durch die stoffliche und energetische Nutzung von Holz werden so derzeit ca. 25 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen Bayerns kompensiert (Clusterstudie Forst und Holz, 2016).

Die vorliegende Broschüre liefert schlaglichtartig einen Einblick in die holzbasierte Bioökonomie und zeigt, dass das nächste, moderne Holz-Zeitalter bereits angebrochen ist.

*Das Konzept der „Bioökonomie“ beschreibt eine auf der effizienten und nachhaltigen Nutzung von biologischen Ressourcen wie Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen basierende Wirtschaftsweise. Die Transformation zu einer Bioökonomie erfordert u. a. Maßnahmen beim Rohstoffeinsatz, den Produktionsmitteln, Produktionstechnologien und industriellen Prozessen. Die Umsetzung einer Bioökonomie nutzt Produkte der traditionellen Forst- und Landwirtschaft ebenso wie neue und moderne Anwendungen von natürlichen Ressourcen im chemischen und technischen Bereich, um die derzeitige erdölbasierte Wirtschaftsweise abzulösen. Die holzbasierte Bioökonomie befasst sich mit der Nutzung des Rohstoffs Holz. Neben „etablierten“ Anwendungen, etwa im Holzbau oder für Papier und Zellstoff, die bereits Elemente einer Bioökonomie sind, werden in der „modernen“ holzbasierten Bioökonomie mehr und mehr neue Produkte entwickelt, etwa Textilfasern oder Basis-Chemikalien.*

## Definition und Bedeutung

**Interview mit Prof. Dr. Klaus Richter, Lehrstuhl für Holzwissenschaft an der Technischen Universität München und Mitglied des Sachverständigenrats Bioökonomie Bayern**

*Sehr geehrter Herr Prof. Richter, seit geraumer Zeit ist das Thema „Bioökonomie“ ein Top-Thema auch in der Politik. Was heißt das für unsere heimische Forst- und Holzwirtschaft?*

In der Tat haben die aktuellen Diskussionen um den Klimawandel weltweit dem Thema „Bioökonomie“ einen starken Schub gegeben. Gerade für Holz bieten sich hier vielfältige Chancen, ohne eine Tank-Teller-Diskussion vom Zaun zu brechen. Nach Definition sind alle Teilbranchen des gesamten Clusters Forst und Holz der Bioökonomie zuzuordnen, angefangen von der Forstwirtschaft über das Bauen mit Holz und Holzwerkstoffen und den Innenausbau bis zur Papier- und Zellstoffproduktion. Aber natürlich setzen wir nach unserem Verständnis einer modernen holzbasierten Bioökonomie den Schwerpunkt bei der Entwicklung von neuen, innovativen Produkten und Verfahren basierend auf Holz, Rinde oder deren molekularen Bausteinen. Das kann das Thema Plattformchemikalien auf Holzbasis sein, neue Wirkstoffe für die Pharmazie oder neue Werkstoffe oder Produkte für Verpackungslösungen. Die Anwendung von Bioökonomie-Technologien im industriellen Maßstab ist aber derzeit noch unzureichend. Unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten müssen daher um Maßnahmen zur Innovationsförderung ergänzt und mit diesen kombiniert werden.

*Wie beurteilen Sie die derzeitigen Ansätze für eine holzbasierte Bioökonomie in Bayern?*

Bayern mit einer starken Agrar- und Forstwirtschaft und seiner guten Forschungs- und Industrie-Infrastruktur kann ein wichtiger Player in der Bioökonomie werden. Allerdings braucht es, ähnlich wie in Skandinavien, neben der starken öffentlichen Forschung auch eine höhere Innovationstätigkeit der Unternehmen, abgestützt auf verlässliche Planungsgrundlagen in Bezug auf die Verfügbarkeit und Qualität der nutzbaren Roh- und Reststoffe. Die Politik muss zudem mit den entsprechenden Rahmenbedingungen die Weichen stellen für eine nachhaltigere Zukunft. Konkrete Pläne für Demonstrationsanlagen, in denen holzhaltige Biomasse zu unterschiedlichsten Endprodukten verarbeitet werden kann, finden sich aktuell für Straubing in Verbindung mit dem dort ansässigen BioCampus und sind geplant in Waldkraiburg in Verbindung mit der Technischen Hochschule Rosenheim. Ich rufe alle interessierten

Akteure aus Industrie und Wirtschaft auf, diese Aktivitäten bei der Umsetzung zu unterstützen und anschließend diese Anlagen für die eigene Innovationsentwicklung systematisch zu nutzen. Meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Holzforschung der Technischen Universität München und die Kolleginnen und Kollegen der fachspezifischen Hochschul- und Forschungsinstitute stehen hierzu gerne unterstützend zur Verfügung.

*Was müssen wir jetzt tun, um – auch mit Blick auf die hohen Schadholzmengen aus der Forstwirtschaft – neue Absatzwege für Holz zu entwickeln?*

Der erste Schritt ist sicher die Kommunikation der Potenziale einer nachhaltigen Holznutzung generell: Wir müssen der Gesellschaft verdeutlichen, dass wir unsere heimischen Wälder nachhaltig und auf möglichst gesamter Fläche nutzen müssen. Denn Holzverwendung ist aktiver Klimaschutz und vereinbart ökonomische, ökologische und soziale Aspekte wie in keiner anderen Branche. Es muss untersucht und belegt werden, dass die bayerische Strategie des „Nutzen und Schützen auf gleicher Fläche“ die vielfältigen Funktionen des Waldes am besten bedient.

Dann müssen wir Innovationen weiter vorantreiben. Dazu braucht es eine weitere Förderung der Grundlagen- wie auch der angewandten Forschung. Letztere ist ein wichtiges Bindeglied von der Überführung neuer Erkenntnisse in eine tatsächliche Nutzung und industrielle Anwendung. Und unsere Unternehmen müssen Chancen und Potenziale für die Bioökonomie proaktiv annehmen und nicht erst dann agieren, wenn die fossilen Rohstoffe in ihrer Verfügbarkeit wirklich erschöpft sind. Dazu braucht es Informationen und Austausch zwischen den Branchen. Hier kommen die bayerischen Cluster ins Spiel, die eine wichtige Rolle bei der Vernetzung von gesamten Branchen, so zum Beispiel der Chemie mit der Forst- und Holzwirtschaft spielen. So können ganz neue Netzwerke in der Industrie entstehen. Und nicht zuletzt müssen wir die Frage der richtigen Skalierung beleuchten: Liegt die Zukunft in wenigen großen Produktionsstandorten oder sind kleine und mittlere sogenannte Bioproduktewerke möglicherweise besser in unsere bayerische Unternehmenslandschaft zu integrieren?

# Chancen einer holzbasierten Bioökonomie

**Vorwort** Seite 2

**Definition und Bedeutung** Seite 3

**Forstwirtschaft** Seite 6

**Bauholz und Holzwerkstoffe** Seite 8

**Bioraffinerien** Seite 10

**Verpackung** Seite 12

**Cellulose und Nanocellulose** Seite 14

**Treibstoffe** Seite 16

**Chemikalien** Seite 18

**Lignin** Seite 20

**Handlungsempfehlungen für eine Stärkung der holzbasierten Bioökonomie in Bayern** Seite 22

Impressum

Herausgeber:  
Cluster-Initiative Forst und Holz in Bayern gGmbH  
Am Zentrum Wald-Forst-Holz Weihenstephan  
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1  
D-85354 Freising  
E-Mail: [post@cluster-forstholzbayern.de](mailto:post@cluster-forstholzbayern.de)  
Internet: [www.cluster-forstholzbayern.de](http://www.cluster-forstholzbayern.de)  
Vertreten durch / verantwortlich: Geschäftsführer Dr. Jürgen Bauer  
Bearbeitung: Dr. Jürgen Bauer, Johannes Rahm, Stefan Torno  
Partner: Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern, C.A.R.M.E.N. e. V.  
Realisierung: KOLLAXO Markt und Medien GmbH  
Internet: [www.kollaxo.com](http://www.kollaxo.com)  
Gestaltung: Die Werkstatt Medien-Produktion GmbH  
Titelfoto: nach einer Vorlage von Ralf Rosin  
1. Auflage im Februar 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. Die Broschüre wurde auf PEFC-zertifiziertem Papier in einer PEFC-zertifizierten Druckerei gedruckt. Auf Anfrage sind Quellen sowie weitere Literatur vom Verfasser beziehbar. Die Erstellung der Broschüre wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten und das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert.

## Forstwirtschaft

In Bayern sind 2,6 Millionen Hektar mit Wald bedeckt. Über ein Drittel der Fläche Bayerns ist bewaldet. Nachhaltige Forstwirtschaft schützt das Ökosystem Wald. Zudem trägt sie zur Erfüllung der gesellschaftlichen Nutzungs- und Funktionsansprüche an den Wald bei.

Seit 30 Jahren nimmt die Waldfläche in Bayern kontinuierlich zu. In Bayerns Wäldern sind 62 verschiedene Baumarten zu finden. Rund ein Drittel der Wälder sind Laub- oder Mischbestände.

Der Wald in Bayern hat einen jährlichen Zuwachs von circa 31 Millionen Festmeter. Davon verbleiben etwa 10 Millionen Festmeter im Wald.

Unter den 700.000 Waldbesitzern Bayerns sind auch 1.800 Kommunen. Kennzeichnend für die Besitzerstruktur des Waldes in Bayern ist der hohe Anteil von Klein- und Kleinstwaldbesitzern. So verschieden die Besitzarten auch sind, eint sie die Verbundenheit mit dem Wald.

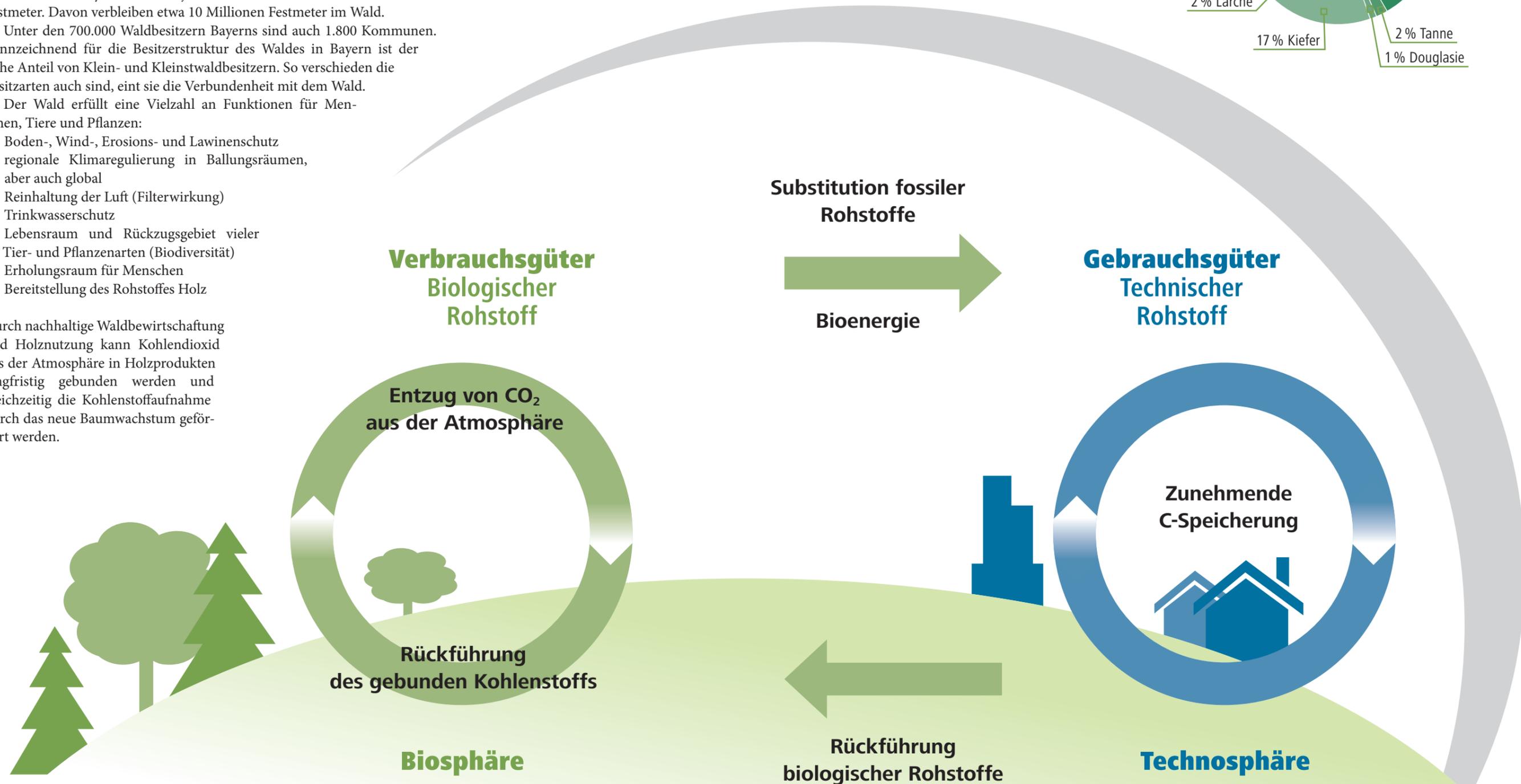
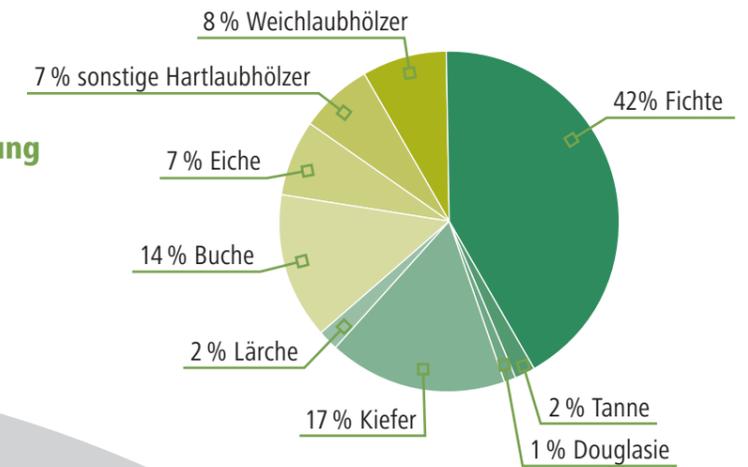
Der Wald erfüllt eine Vielzahl an Funktionen für Menschen, Tiere und Pflanzen:

- Boden-, Wind-, Erosions- und Lawinenschutz
- regionale Klimaregulierung in Ballungsräumen, aber auch global
- Reinhaltung der Luft (Filterwirkung)
- Trinkwasserschutz
- Lebensraum und Rückzugsgebiet vieler Tier- und Pflanzenarten (Biodiversität)
- Erholungsraum für Menschen
- Bereitstellung des Rohstoffes Holz

Durch nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holznutzung kann Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Holzprodukten langfristig gebunden werden und gleichzeitig die Kohlenstoffaufnahme durch das neue Baumwachstum gefördert werden.

### Baumartenzusammensetzung in Bayern

- Nadelbäume 64 %
- Laubbäume 36 %



## Bauholz und Holzwerkstoffe

Ein wichtiges Produkt einer multifunktionalen Forstwirtschaft ist der Rohstoff Holz, der als wichtige Basis einer regionalen Holzwirtschaft nachhaltig Wohlstand und Arbeitsplätze vor allem im ländlichen Raum bietet. In der Säge- und Furnierindustrie wird aus Rundholz Schnittholz (Bauholz, Balken und Bretter) oder Furnier hergestellt. Die Holzwerkstoffindustrie verarbeitet Industrieholz zu Produkten wie Span- und Faserplatten.

### Holzbau

Rund die Hälfte der in Deutschland genutzten Rohstoffe wird für den Bau oder den Betrieb von Gebäuden verwendet. Durch den hohen Rohstoffbedarf in der Baubranche ist es besonders wichtig, neben der technischen Eignung die ökologischen Eigenschaften der verwendeten Materialien zu beachten.

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit (circa 0,13 Watt/Quadratmeter \* Kelvin) dämmt der Werkstoff Holz ganz natürlich. Zudem kann die natürliche Wärmedämmung durch Dämmplatten aus Holzfaser ergänzt und weiter verbessert werden. Durch seine Fähigkeit zur Feuchtigkeitsregulation schafft Holz ein angenehmes Innenraumklima.

Da Wände in Holzbauweise eine geringere Stärke haben, kann auf gleicher Grundfläche bis zu zehn Prozent mehr Wohnfläche erzielt werden.

Verglichen mit anderen Materialien ist das Abbrandverhalten von Massivholz mit circa 0,7 Millimeter pro Minute gut berechenbar. Konstruktiver Holzschutz verstärkt die Dauerhaftigkeit von Holzbauten.

Der Rohstoff Holz zeichnet sich im Bauwesen nicht nur durch seine hervorragenden ökologischen Eigenschaften aus. Die geringe Rohdichte des Holzes (Nadelholz circa 450 Kilogramm/Kubikmeter) erleichtert die Herstellung und den Bau von Tragwerksstrukturen. Holz hat als biologischer Rohstoff ein sehr gutes Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht.

Holz ist als biogener Rohstoff mit nur sehr geringem Energieeinsatz zu be- und verarbeiten. Der ökologische Fußabdruck der meisten Holzprodukte ist vergleichsweise klein. Dadurch lassen sich auch die Maßnahmen zu Erstellung, Betreuung, Erneuerung, Umnutzung und Rückbau von Gebäuden aus Holz mit geringem Aufwand umsetzen, sodass der Energieeinsatz und die CO<sub>2</sub>-Emissionen von Holzgebäuden über die gesamte Nutzungszeit reduziert werden.

### Holzwerkstoffe

Holzwerkstoffe sind bereits seit mehr als einem Jahrhundert bewährte Beispiele für die holzbasierte Bioökonomie. Die Herstellungsverfahren nutzen Sekundär-, Rest- und Abfallstoffe der Forstwirtschaft und Sägeindustrie und führen sie einer stofflichen Nutzung zu. Die Eigenschaften von Holzwerkstoffen werden dabei stark von der Größe und Form der verwendeten Holzpartikel beeinflusst. Allgemein nehmen die Homogenität und die Dämmeigenschaften des Materials mit steigendem „Zerkleinerungsgrad“ zu, während proportional die Festigkeit der Produkte gegenüber fehlerfreiem Massivholz sinkt.

Zu den Holzwerkstoffen zählen Holzfaserplatten, Spanplatten, OSB-Platten, Massivholzplatten sowie Furnierwerkstoffe und Sperrholz. Circa zehn Prozent des Holzes in Deutschland werden für die Produktion von Holzwerkstoffen verwendet.

Holzwerkstoffe werden vor allem in der Bau- und Möbelindustrie eingesetzt. Etwa die Hälfte der in Deutschland produzierten Spanplatten werden in der Möbelindustrie verarbeitet. Ebenso werden Holzwerkstoffe im Fahrzeugbau und als Verpackungsmaterial → [Seite 12] verwendet.



## Bioraffinerien

In einer Bioraffinerie werden aus Biomasse verschiedene Zwischen- und Endprodukte wie Chemikalien, Werkstoffe und Bioenergie nachhaltig erzeugt. Ziel ist es, möglichst vollständig alle Rohstoffkomponenten zu verwerten. Es können als Nebenprodukte auch Lebens- und Futtermittel entstehen. Wichtig für die Wirtschaftlichkeit ist, dass einer Bioraffinerie ein zugrunde liegendes ganzheitliches Konzept und die Integration verschiedener Verfahren und Technologien vorliegen.

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

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

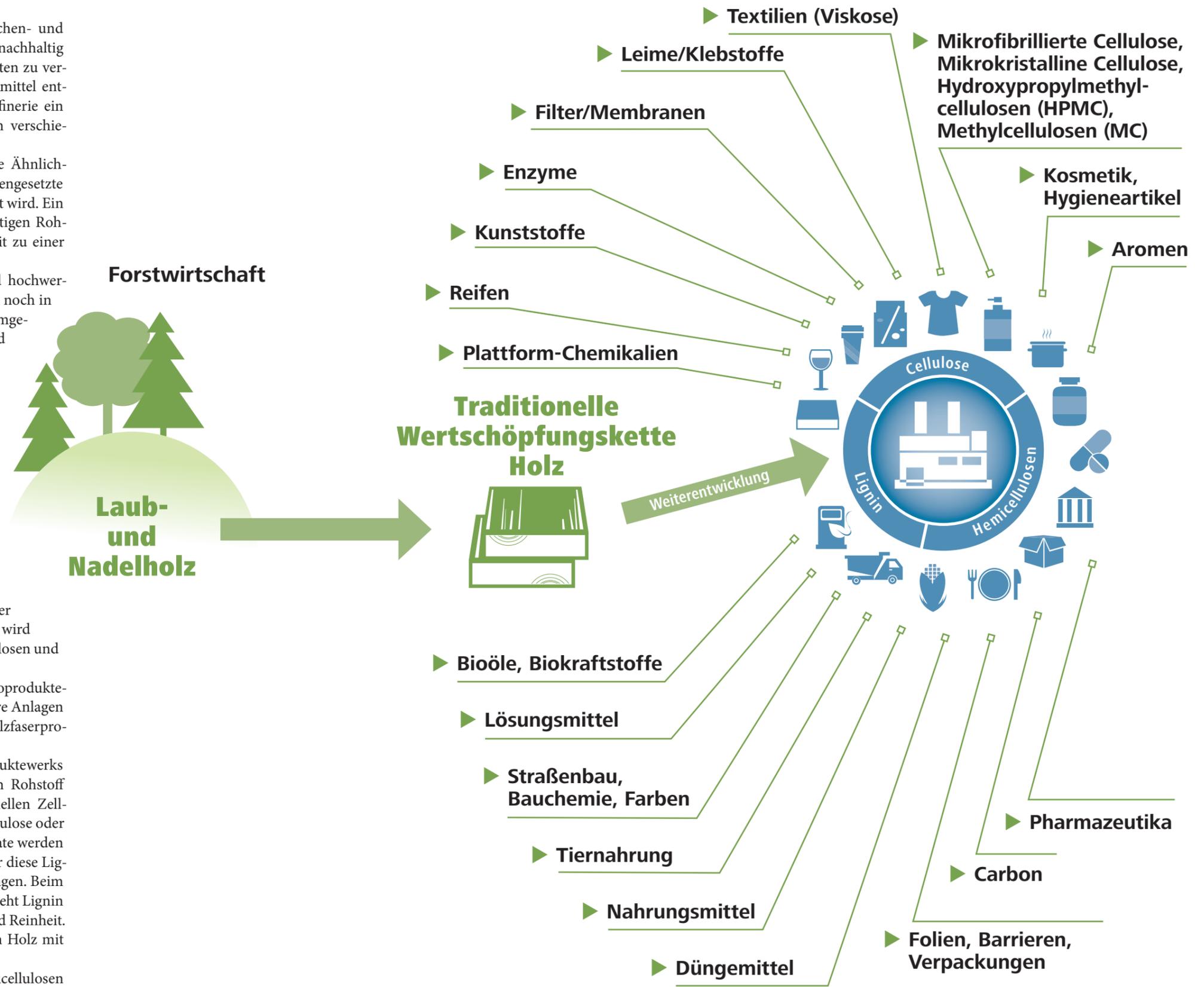
So wird zum Beispiel in der Bioraffinerie der Firma Borregaard in Snapsborg (Norwegen) aus Fichte nicht nur Cellulose, Bioethanol → [Seite 16] und Grundlagenchemikalien hergestellt, sondern auch Vanillin für die Lebensmittelproduktion. Zudem wird seit 2016 auch Microfibrillierte Zellulose (MFC) → [Seite 14] für Anwendungen in der Kosmetik-, Dünger- oder Lebensmittelindustrie hergestellt.

Unter den Bioraffineriekonzepten haben sich verschiedene Pfade herauskristallisiert, die sich vor allem durch die verarbeiteten Biomassen unterscheiden. So werden in Zucker- bzw. Stärke-Bioraffinerie als auch in Pflanzenöl-Bioraffinerie überwiegend landwirtschaftliche Produkte genutzt. Darüber hinaus gibt es noch Synthesegas- und Biogas-Bioraffinerien. Holz wird dagegen überwiegend in der Lignocellulose (Cellulose, Hemicellulosen und Lignin)-Bioraffinerie bzw. Grünen Bioraffinerie genutzt.

Einige Experten sprechen neben Bioraffinerien auch von Bioproduktewerken, wenn es hinsichtlich des Maßstabs um kleinere bis mittlere Anlagen geht, die neben Plattformchemikalien auch Massivholz- oder Holzfaserverprodukte erzeugen.

Die Leistungsfähigkeit einer Bioraffinerie bzw. eines Bioproduktewerks hängt dabei insbesondere vom Holzaufschlussprozess und vom Rohstoff ab: Beim Sulfat-Aufschluss werden die so hergestellten, sehr hellen Zellstoffe heute fast ausschließlich für die Herstellung von Chemiecellulose oder Papier verwendet. Die als Nebenprodukt gebildeten Ligninsulfonate werden entweder kommerziell verwertet oder noch 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. Bioproduktewerke versprechen so große Chancen für Klimaschutz, Wertschöpfung und Ressourceneffizienz.



Quelle: .bwc management consulting, Abensberg; verändert

## Verpackung

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.

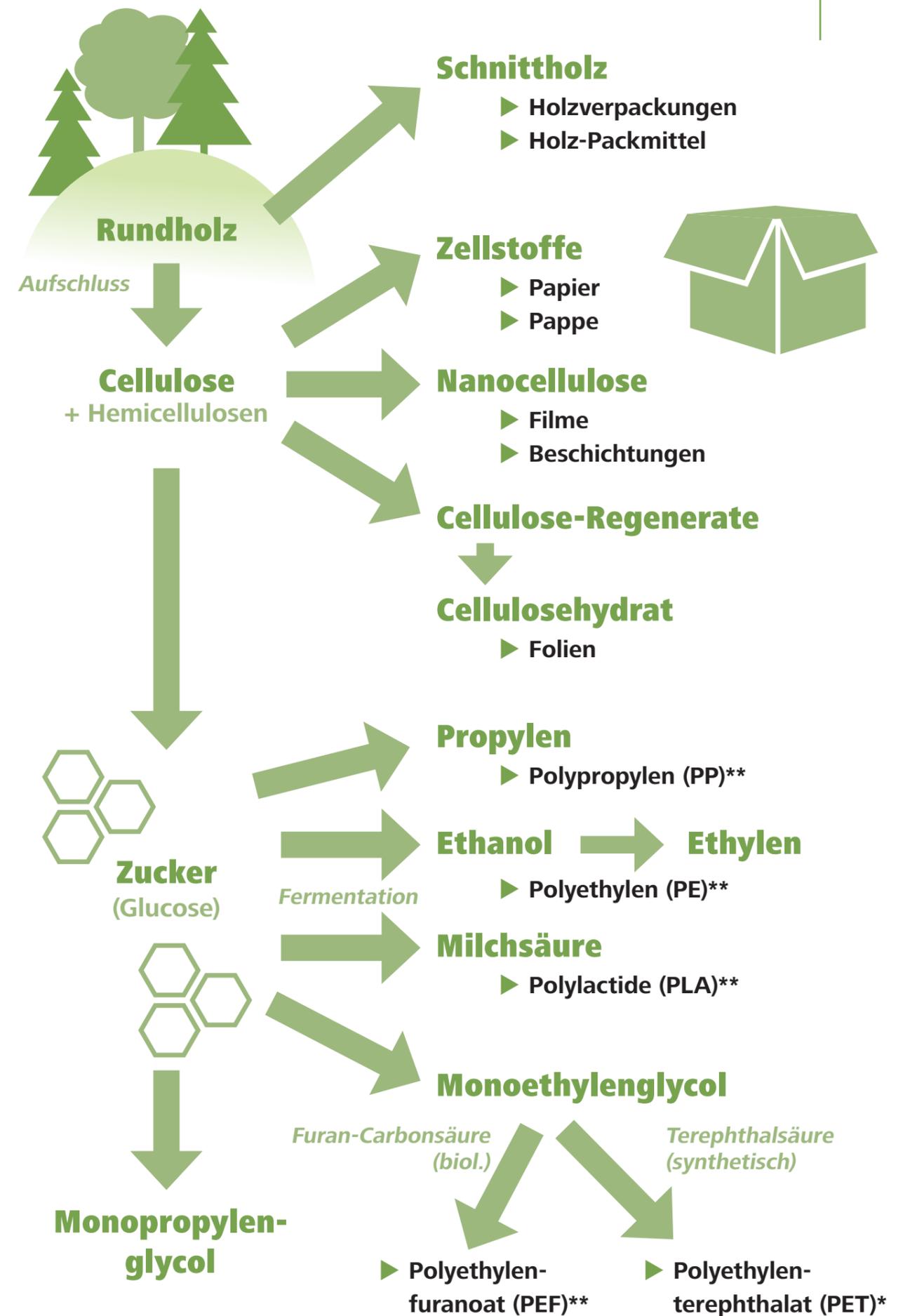
Neben dem Einsatz alternativer, nachwachsender Rohstoffe müssen Verpackungen demnach gut recyclingfähig und im besten Fall zusätzlich unschädlich biologisch abbaubar sein. Holz kann alle dieser Anforderungen erfüllen: Es wächst in ausreichender Menge nach und ist biologisch abbaubar. Herkömmliche Verpackungsmaterialien 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 ihrer Gebrauchszyklen Weiterverwertung in Holzwerkstoffen oder als Energiesortimente.

Auch für Verpackungen mit höheren Anforderungen, zum Beispiel für Lebensmittel, bietet Holz Lösungen. Aus Cellulose und Hemicellulosen, 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 Polyethylenfuranoat 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 Mikro-fibrillierte Cellulose → [Seite 14]. 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 Abbauprozesses. 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.



\* teil-biobasiert \*\* biobasiert

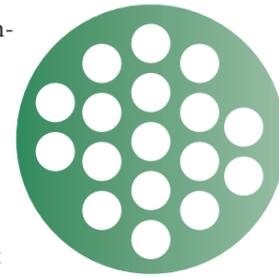
## Cellulose und Nanocellulose

Cellulose ist der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände. Damit ist es das häufigste Biomolekül. 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 - 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

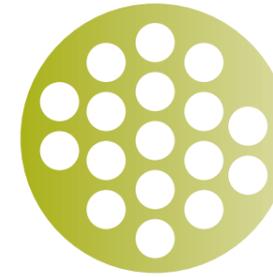
Der Durchmesser von NCC liegt zwischen 5 und 20 Nanometern. NCC besitzt besondere flüssigkristalline Eigenschaften. Besonders für die Branchen Papierindustrie, Verpackungsindustrie oder Beschichtungsunternehmen ist Nanokristalline Cellulose ein vielversprechendes Produkt.

#### Mikrokristalline Cellulose, MCC

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

## Cellulose-Regeneratfasern

Sowohl Bio- als auch konventionell produzierte Baumwolle hat einen enorm hohen Wasserverbrauch. Für ein Kilo Baumwolle werden im Durchschnitt circa 11.000 Liter Wasser benötigt. Für Holzfasern 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 die durch den Transport entstehenden Umweltauswirkungen um ein Vielfaches verringert werden.



#### Viskosefasern

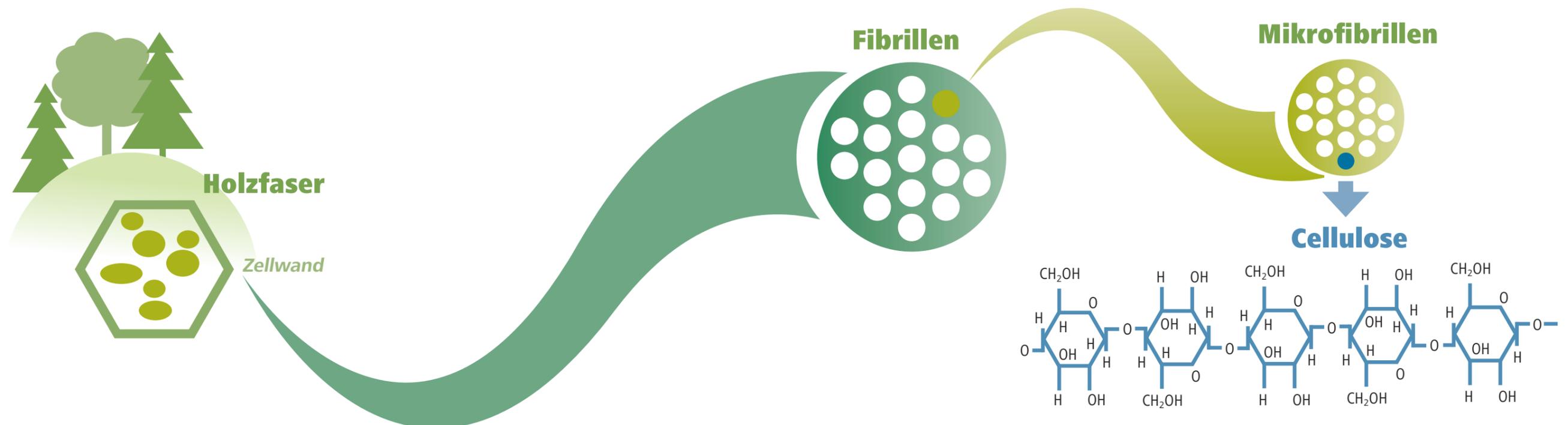
Als Viskosefasern bezeichnet man Chemiefasern aus Cellulose. Regenerierte Cellulose ist chemisch identisch mit der nativen Cellulose. Viskosefasern sind also chemisch identisch zu Baumwollfasern. Als Ausgangsrohstoff zur Viskoseproduktion dienen Holz (Fichte, Buche, Eukalyptus-, Kiefernarten) sowie Bambus.

#### 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 durch eine höhere Festigkeit, verglichen mit Normalviskosefasern, 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 Wasserstoff als hochwertige regenerative Energieträger herstellen. Das synthetische Methangas entspricht in seiner Energieleistung und Qualität ungefähr dem Erdgas. Allerdings benötigt man für eine wirtschaftliche Produktion relativ große Holz Mengen sowie günstige Holzsortimente. Sowohl Waldholzsortimente von minderer Qualität als auch zum Beispiel Altholz aus dem Baurecycling kommen hierfür in Frage. Die Holzvergasung zur Stromerzeugung mit Kraft-Wärmekopplung könnte zukünftig auch in kleineren Anlagen eine wichtige Nische darstellen. Zusätzlich bietet die Holzvergasung die Möglichkeit zur Erzeugung von biogenem Wasserstoff als Basis einer CO<sub>2</sub>-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 in 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. Die wichtigsten Schritte im Herstellungsverfahren sind 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 beispielsweise weitere cellulosereiche Biomasse wie Stroh genutzt werden.

### **Biodiesel-Produktion in Lappeenranta**

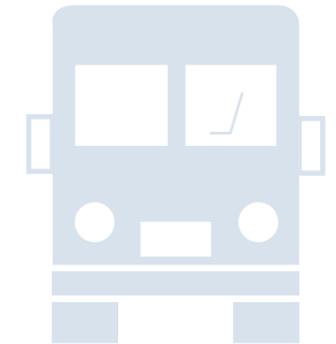
*Die Bioraffinerie der Firma UPM in Lappeenranta/ Finnland ist die weltweit erste Anlage, die kommerziell erneuerbaren Diesel und Naphtha aus Holz erzeugt. Dabei wird das in der Zellstoffproduktion aus Kiefernholz anfallende Tallöl genutzt. Unter Tallöl versteht man die bei der Zellstoffkochung frei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



### **Methangas**



### **biogener Wasserstoff**



### **Bioethanol**

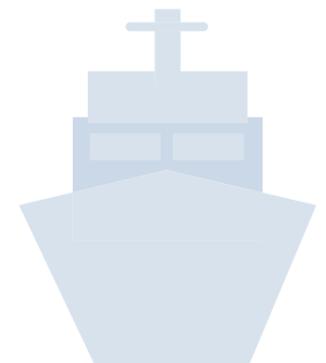
### **BtL-Kraftstoffe**



### **Synthesegas**



### **Biodiesel**



## 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 → [Seite 16].

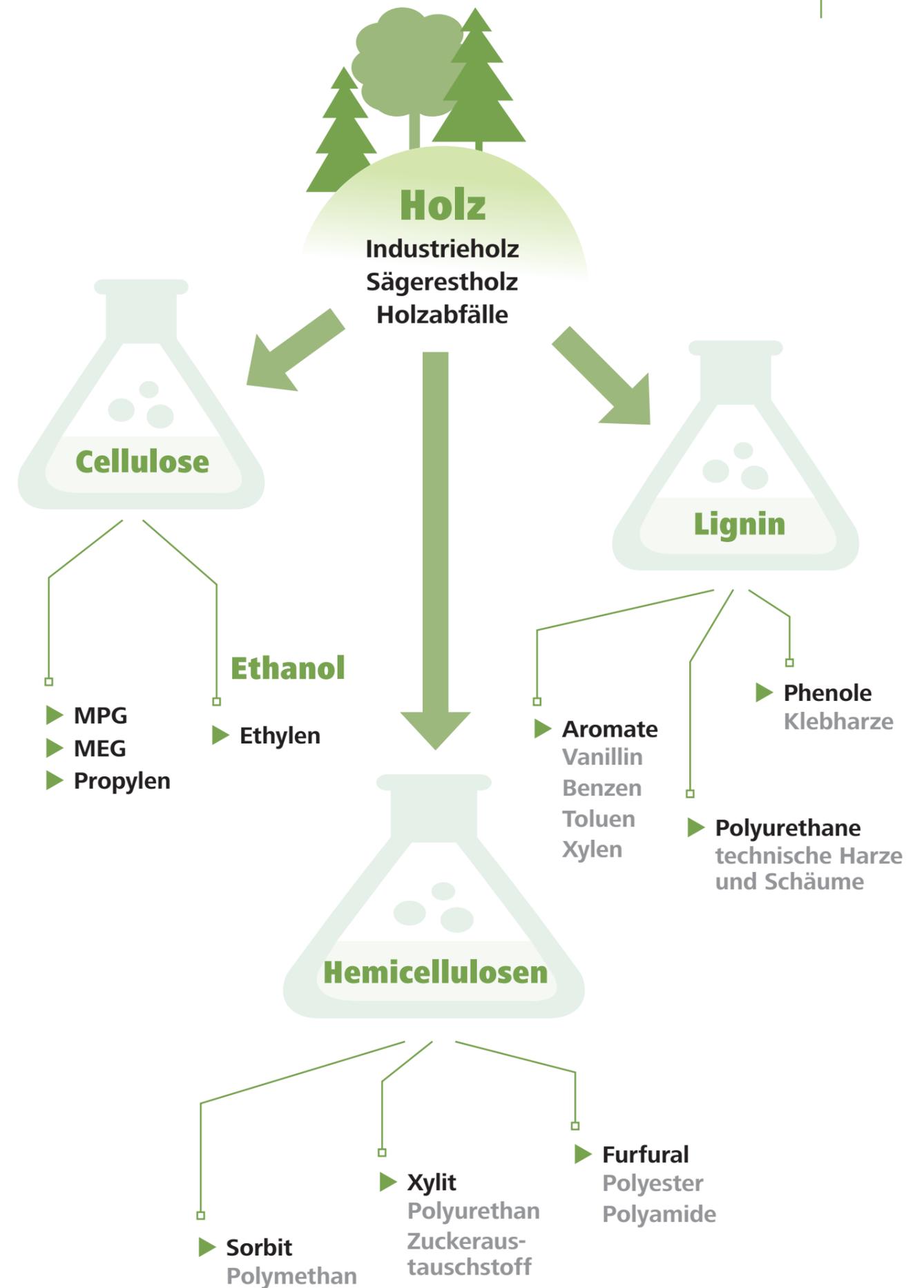
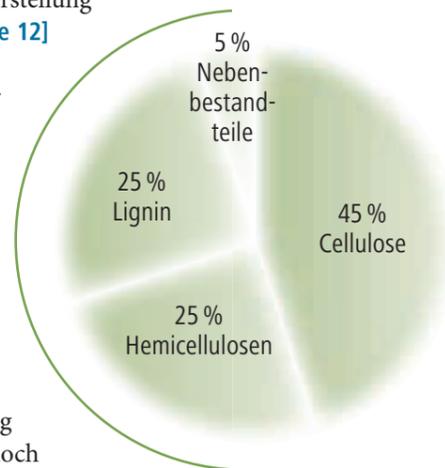
Cellulose, der Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände, ist das am häufigsten vorkommende und das wichtigste industriell genutzte nachwachsende Biopolymer. Die jährlich anfallende Menge beträgt circa 100 Milliarden Tonnen. Neben der Nutzung der „Faserstruktur“ lässt sich Cellulose in ihre chemischen 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 Kunststoffverpackungen → [Seite 12] 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 Arzneimitteln 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 → [Seite 12] untersucht.

Lignin → [Seite 20] 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. Um eine Herauslösung, Trennung, Reinigung und weitere Funktionalisierung im industriellen Maßstab zu ermöglichen, müssen noch geeignete Verfahren entwickelt werden.



## 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 Sulfitverfahren) als Koppelprodukt bei der Papier- und Zellstoffproduktion an (jährlicher Anfall weltweit circa 50 Millionen Tonnen) und kann aus den Ablaugen 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.

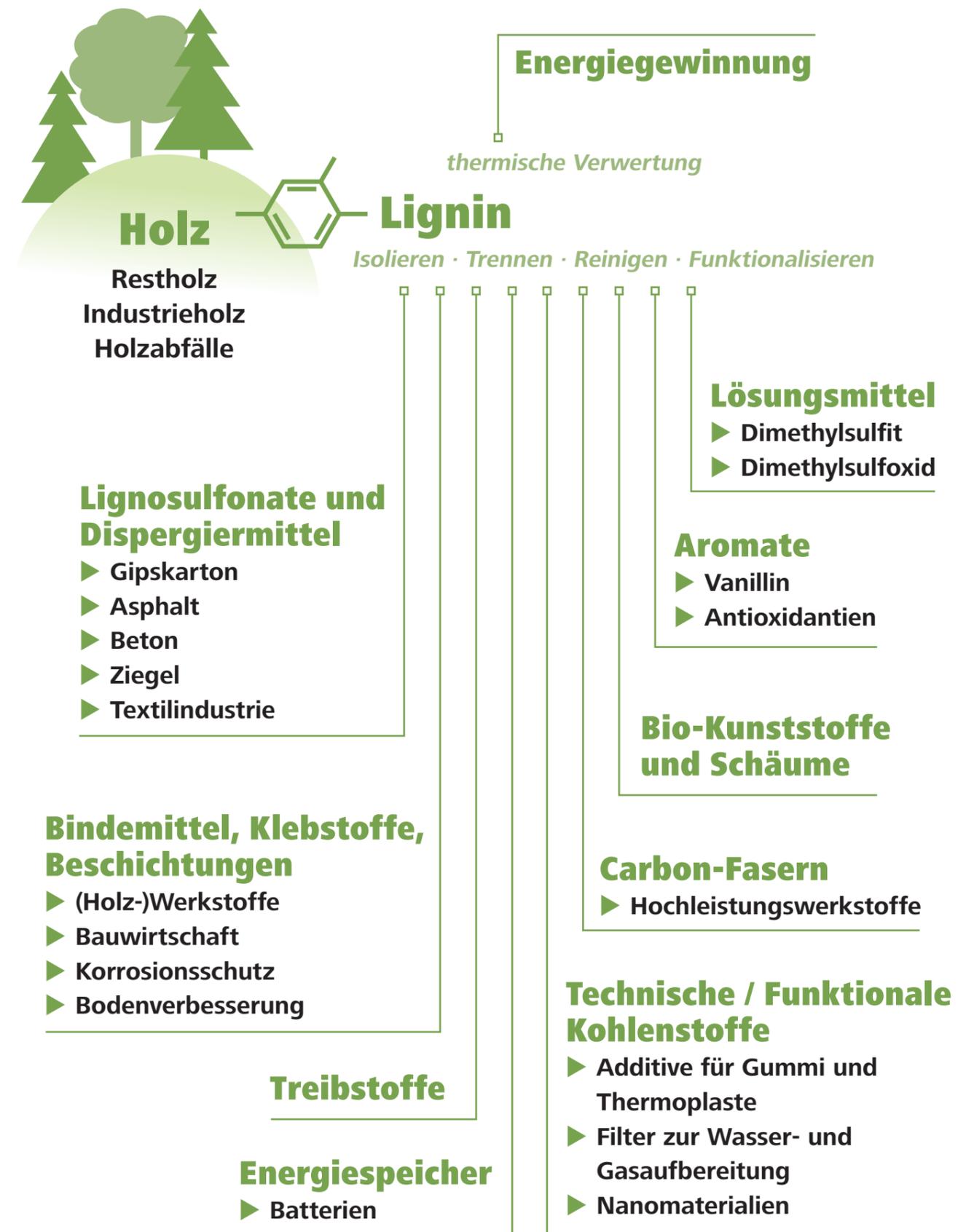
Durch eine Weiterverarbeitung kann eine Vielzahl weiterer, spezifischer Produkte hergestellt werden. Dazu gehören das aus der Lebensmittelindustrie bekannte Vanillin (Aromastoff), Dimethylsulfid und Dimethylsulfoxid (wichtige organische Lösemittel) oder Ethanol (durch Fermentierung der enthaltenen Hexosen). 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.*



# Handlungsempfehlungen für eine Stärkung der holzbasierten Bioökonomie in Bayern



## 1. Weiterer Ausbau eines Bioökonomie-Netzwerks in der bayerischen Hochschullandschaft

Die Vernetzung unterschiedlicher Fachbereiche mit Holzbezug an den bayerischen Hochschulen und Forschungseinrichtungen wird vom bayerischen Cluster Forst und Holz seit Ende 2017 betrieben. Im nächsten Schritt muss dieses Netzwerk weiter ausgebaut und gestärkt werden. Dazu müssen nach und nach sowohl der bundesweite und internationale Austausch mit Wissenschaftlern mit zunächst Schwerpunkt Europa als auch die Vernetzung von Forschenden aus dem Holzbereich mit denen aus den Bereichen Chemie, Ernährung, Neue Werkstoffe und Biotechnologie intensiviert werden. Der Aufbau beziehungsweise Ausbau eines solchen umfassenden Netzwerks stellt die Basis für eine effektive und effiziente Innovationsentwicklung dar.

## 2. Kommunikation holzbasierter Bioökonomie auf politischer Ebene

Die Analyse des politischen Status quo hat gezeigt, dass in den bisherigen Bioökonomiestrategien auf Landes- und Bundesebene die Landwirtschaft im Mittelpunkt steht. Auch das „Gesamtkonzept für die Forschungs-, Technologie- und Innovationspolitik der Bayerischen Staatsregierung“ enthält die Transformation des Wirtschaftsprozesses hin zur Nutzung erneuerbarer Rohstoffe nur in untergeordneter Form. Insbesondere die enormen Holzvorräte in Bayern können jedoch einen entscheidenden Beitrag dazu leisten.

## 3. Verbesserung der Infrastruktur der Förderung

Für Bayern ist die Verbesserung der Förderinfrastruktur notwendig, um innovative Projekte zur Entwicklung und Umsetzung der Bioökonomie vom Forschungslabor bis zur Produktion im industriellen Maßstab finanziell zu unterstützen. Dazu sollten zum einen bereits installierte Programme – zum Beispiel das Bayerische Technologieförderprogramm plus (BayTP+) und das Förderprogramm Neue Werkstoffe (BayNW) – mit einem höheren Budget ausgestattet werden. Zum anderen sollten durch eine verstärkte öffentlichkeitswirksame „Bewerbung“ dieser Programme deren Wahrnehmung und Nutzung bei den potenziellen Akteuren aus dem Bereich der Bioökonomie gesteigert werden.

## 4. Cross-Clustering

Die Clustereinrichtungen des Freistaats Bayern sitzen an der Schnittstelle zwischen Forschung, Wirtschaft und Politik. Aus diesem Grund kennen sie den Bedarf und die spezifischen Herausforderungen der unterschiedlichen Interessengruppen. Ziel eines verstärkten „Cross-Clustering“, also der bereichsübergreifenden Zusammenarbeit auf Landes-, Bundes- und europäischer Ebene ist es, die unterschiedlichen Branchen besser zu vernetzen und frühzeitig in die Entwicklung einzubeziehen. Dadurch sollen sowohl die Chancen als auch die Herausforderungen, die eine holzbasierte Bioökonomie nicht nur für die Forst- und Holzwirtschaft mit sich bringt, frühzeitig identifiziert werden.

## 5. Länderübergreifende Zusammenarbeit/ Internationalisierung

Im Zuge der überregionalen Vernetzung wird in einem ersten Schritt eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Bayern und angrenzenden Regionen wie Baden-Württemberg, Oberösterreich und Salzburger Land angestrebt. International soll der Schwerpunkt auf Kooperationen mit Akteuren aus den skandinavischen Ländern liegen. Die Initiierung von Kooperationsprojekten soll vor allem zu einer internationalen Innovationserfassung und aktiven Weiterentwicklung im Bereich der holzbasierten Bioökonomie führen.

## 6. Innovationsmanagement und Potenzial-Analysen

Der Fokus des Innovationsmanagements liegt auf der Stärkung der Innovationskraft aller Akteure entlang der Wertschöpfungskette Forst und Holz. Dabei sollen einerseits kleine und mittelständische Unternehmen einbezogen werden, andererseits aber auch gezielt wichtige Kernakteure und Anwender neuartiger Technologien. Ziel ist die Entwicklung von systematischen Werkzeugen zur Initiierung von Innovationen, zum Beispiel durch die Umsetzung eines europaweiten, webbasierten „Forschungs-Kompasses“ zum Thema „Holzbasierte Bioökonomie“ oder die Weiterentwicklung von Trend- und Technologieradaren in Zusammenarbeit mit Bayern Innovativ. Für die umfassende Bewertung technischer Innovationen (Produkte und Technologien) werden weiterhin fundierte Informationen wie zum Beispiel Potenzial-Analysen über mögliche aktuelle sowie zukünftige Märkte benötigt. Dazu arbeitet das bayerische Cluster Forst und Holz bereits eng mit Bayern Innovativ zusammen. In ersten Projekten werden gemeinsam Trendradare und Technologie-Roadmaps entwickelt.



