

# 1 Einleitung

Pflanzen bilden häufig ein mehr oder weniger verholztes Hartgewebe (Xylem) aus. Dieses verleiht den tragenden Pflanzenteilen (Stamm, Stängel, Äste) ihre Festigkeit. Solche Hartgewebe sind faserverstärkte Materialien. Sie können Fasern enthalten, die bis zu einem Meter lang sind, häufiger aber handelt es sich um kurze Faser von 1 bis 3 mm Länge. Diese Fasern entstehen aus speziellen Pflanzenzellen mit sehr robuster Zellwand. Für uns sind die isolierten Holzfasern, die nach ihrer Herkunft als „Zellstoff“ bezeichnet werden, sehr wertvolle Rohstoffe. Zellstoff, der chemisch überwiegend aus Cellulose besteht, dient zum einen als chemischer Rohstoff zur Herstellung von Kunststoffen, zum weitaus überwiegenden Teil heute als Ausgangsprodukt für Papier.

## 1.1 Faserstoffe für Papier

Das tragende Gerüst des Papiers sind die Fasern. Diese Faserstoffe werden heutzutage weit überwiegend aus Holz hergestellt, und zwar durch mechanische und chemische Behandlung des Holzes. Das Holz besteht, wie viele natürliche Stoffe aus Fasern, die allerdings fest miteinander verbunden sind, und für die Verwendung zur Papierherstellung erst aus dem Holz und voneinander isoliert werden müssen.



Der Faserstoff, der im Wesentlichen durch mechanisches Zerschneiden des Holzes hergestellt wird, nennt sich einfach „Holzstoff“, zerfasert man das Holz überwiegend durch Kochen in bestimmten Chemikalien, erhält man einen sehr reinen Faserstoff, den „Zellstoff“.

Zusätzlich zu den natürlichen Faserstoffen werden bei Papierherstellung in heute noch begrenztem Umfang synthetische Faserstoffe verwendet. Diese werden durch rein chemische Methoden aus petrochemischen Grundstoffen gewonnen.



In diesem Buch werden die Grundlagen behandelt, die der Papiermacher über die Zellstoffherstellung wissen sollte. Das Internetangebot soll aber auch anderen Interessierten einen leichten Zugang zu diesem Thema bereitstellen, weil kaum deutschsprachige Literatur für Nicht-Fachleute zur Verfügung steht.

Zunächst befassen wir uns mit den Rohstoffen. Dabei geht es um die Rohmaterialien pflanzlicher Herkunft, den Aufbau der Pflanzenstützgewebe die die Grundlage für den Faserstoff bilden, schließlich um den morphologischen Aufbau dieser Gewebe insbesondere den des Holzes. Dann beschäftigen wir uns mit dem Aufbau von Hölzern und

bzw. der chemischen Zusammensetzung anderer Pflanzenstoffe.

Den Hauptteil dieser Texte wird die Behandlung der Chemie und der Technologie der Ausschlussverfahren einnehmen. Es werden die bei uns gebräuchlichen Ausschlussverfahren besprochen. Außerdem werden die verschiedenen Bleich-Verfahren behandelt. Dabei unterscheidet man zwischen oxidativen und reduktiven Verfahren.

Für den Papiermacher ist es auch wichtig, zu wissen, wie er die Qualität der Faserstoffe kontrollieren und beurteilen kann. Daher wird auch noch die Analytik der physikalischen und chemischen Fasereigenschaften behandelt.

## 1.2 Ausflug in die zweite Dimension (Papier als flächiges Produkt)

Dass man Schnüre aus Fasern herstellt ist bekannt, aber eigentlich ist es nicht selbstverständlich, dass wir Papier aus Fasern machen. Papier ist ja ein flächiges Gebilde.

In der Natur finden sich aber normalerweise keine oder kaum Stoffe, die sich als Nutzflächen eignen. Die Blätter der Pflanzen können wohl eine große Fläche einnehmen, aber diese sind nicht dauerhaft. Bei der Rinde von Hölzern haben wir es auch mit flächigen Stoffen zu tun, die sich aber wegen ihrer uneinheitlichen Struktur und der Tatsache, dass sie nicht leicht unbeschädigt gewonnen werden können, auch nicht für die Zwecke eignen, für die normalerweise Papier benutzt wird.

Dagegen eignen sich die von künstlichen Hüllenschreibstoffen (Pergament).  
tem Ausmaß verfügbar und  
Wenn man genauer hin  
aus (mikroskopisch feinen)



Häute größerer Tiere zur Herstellung (z.B. Bekleidung) oder von Bettierhäute sind aber nur in beschränkter Menge daher ein teures Rohmaterial. sieht, merkt man, dass Leder auch Fasern (Kollagenfasern) besteht.

Der Mensch hat schon früh gelernt, brauchbare flächige Gebilde zu produzieren, vor allem dadurch, dass er Pflanzenfasern benutzt hat, um Gewirke und Gewebe für Bekleidungs-Zwecke zu produzieren. Dazu braucht man aber sehr lange Fasern. Aus kürzeren Fasern, beispielsweise dem Haar von Schafen muss man zuerst durch für Verspinnen (enges Verdrillen) ein langes Garn erzeugen.



Papier ist ein flächiges Produkt. Wozu braucht der Mensch so etwas? Nun, ein solches Gebilde zeichnet sich durch drei Besonderheiten aus:

- Es kann als Trennfläche wirken (Schutz, Umhüllung, Verpackung).
- Es kann als Informationsträger dienen.  
Unsere optische Welt ist eigentlich die Projektion der Außenwelt auf die Netzhaut, daher sind wir es gewohnt, alle Information in einer zweidimensionalen Darstellung zu verschlüsseln. Flächig ausgebreitet, können diese Informationshieroglyphen direkt gelesen werden
- Man kann aus einem zweidimensionalen Produkt leicht ein eindimensionales (z.B. eine Papierschnur) oder ein dreidimensionales (Origami-) Objekt machen.



*Papierschnüre*



*Origami-Schwan*

Papier dient daher vor allem als Packmittel und Informationsträger, es hat aber auch ein noch kaum genutztes Potential als Konstruktions- und Baumaterial.

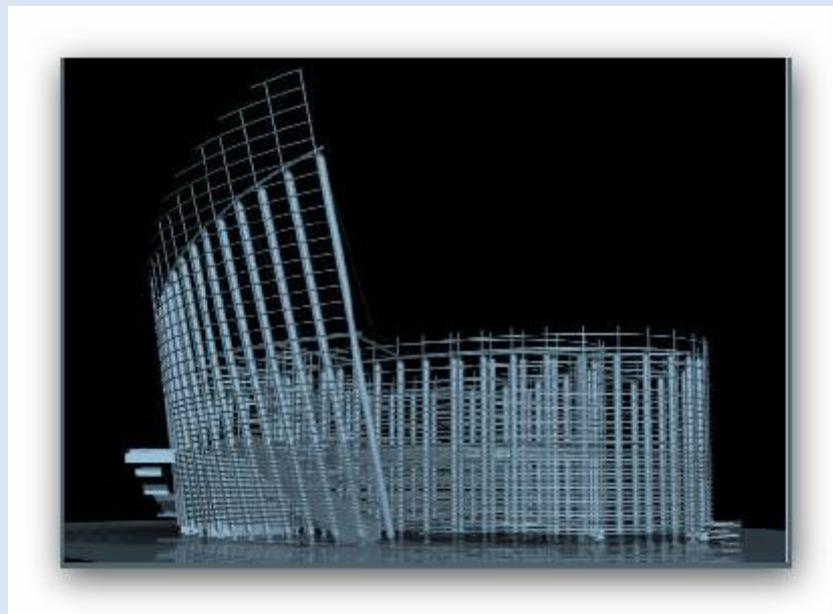
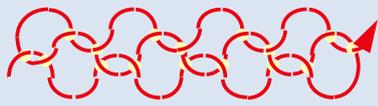
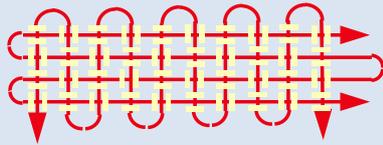


Abbildung 1: Gerüst eines Ausstellungspavillons aus Papier (Entwurf: Gumuchdjian+Spence mit Shigeru Ban)

Die Natur baut in der Regel keine flächigen Gebilde direkt auf, sondern erzeugt diese aus Fäden oder Fasern. Auch die entsprechenden menschlichen Produkte sind so aufgebaut (Abbildung 2):

Abbildung 2: Künstliche flächige Produkte

Produktklasse	Aufbau	Struktur
Gewirke	bestehen aus einzelnen, langen, verschlungenen Fäden	
Gewebe	bestehen aus mehreren kreuzweise verwebten langen Fäden	
Filze	bestehen aus vielen verfilzten langen Einzelfasern	
Vliesstoffe	bestehen aus vielen relativ kurzen Einzelfasern	
Folien	bestehen aus verschlungenen Molekülketten	

Jeder dieser technischen Produktklassen entspricht eine eigene Herstellungstechnologie. Während man ursprünglich nur lange Fäden zu Geweben verarbeiten konnte, hat man langsam gelernt, auch aus Kurzfasern direkt einen Flächenstoff zu schaffen, indem die Fasern verfilzt wurden.

Filz und Loden stellt man dadurch her, dass kurze Wollfasern in Wasser in einem Brei gewalkt und geklopft werden. Die Wollhaare spreizen durch die Einwirkung von Wasser (und Seife) ihre Schuppen, die sich durch das Walken innig ineinander verkeilen. Nach Abpressen des Wassers und Trocknen entstehend der Filz, der auch reißfest und robust, teilweise sogar wasserdicht, ist. Filze, die nur so dick wären wie ein Blatt Papier, wären allerdings zu weich und lappig als Beschreibstoff,



Jurte mit Filz bespannt

Eine besondere Form flächiger Gebilde sind Kunststofffolien, denen man ihren fibrillären Aufbau nicht anmerkt. Diese bestehen nämlich auch aus lauter Fäden, bei denen es sich allerdings um Makromoleküle handelt, die praktisch nichts anderes darstellen als Molekülfäden. Diese sind aber so dünn, dass sie mit freiem Auge, ja nicht einmal mit einem normalen, hoch auflösenden Mikroskop zu erkennen sind. Je nach der Glasktemperatur des Polymeren sind solche Folien steif und brüchig wie Cellophan oder weich und biegsam wie zum Beispiel Polyethylen.

Tabelle 1: Herstellungstechnologien für flächige Produkte

<b>Produktklasse</b>	<b>Herstelltechnologien</b>	<b>Art der Formung</b>
<b>Gewirke</b>	Wirken, Stricken	trocken
<b>Gewebe</b>	Weben, Flechten	trocken
<b>Filze</b>	Walken, Nadeln	aus wässrigem Brei
<b>Vliesstoffe, Papier</b>	Schöpfen, Siebformen	aus wässriger Suspension
<b>Folien</b>	Extrudieren, Gießen	aus Lösung oder Schmelze

Es handelt sich dabei um Verfahren, die mechanische und im weitesten Sinne chemische Aspekte vereinen, wobei die Mithilfe der Chemie umso wichtiger wird, je geringer die Dimensionen der beteiligten Fasern sind. Chemie ist dazu für die Gewinnung des Faserstoffs, z.T. für die Produktformung und vorwiegend für die Faser/Faser - Bindung verantwortlich.

Diese Beispiele erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die einzelnen Faktoren werden in den folgenden Kapiteln genauer besprochen.

\* Kurzfasern können mit Hilfe eines Trägermediums (meist Wasser) zu flächigen Produkten verarbeitet werden

Die Eigenschaften solcher Stoffe hängen sowohl von denen der beteiligten Fasern als auch der Art des Verbundes ab. Insbesondere sind folgende Parameter für die mechanischen Eigenschaften des Produkts entscheidend.

Tabelle 2: Faktoren, die für die Eigenschaften von flächigen Produkten verantwortlich sind

Festigkeit der beteiligten Fasern (bzw. Fäden)
Flexibilität / Steifigkeit der beteiligten Fasern (bzw. Fäden)
Festigkeit der Faser/Faser - Bindungen
Anzahl der Faser/Faser - Bindungen pro Faser
Anzahl der Faser/Faser - Bindungen insgesamt

Neben den mechanischen, spielen auch noch die im weitesten Sinne chemischen Eigenschaften eine wichtige Rolle. Darunter fallen die Beständigkeiten gegen Flüssigkeiten (Wasser, Lösungsmittel), die Witterungs-, Temperatur- und Alterungsbeständigkeit und auch die ästhetischen Eigenschaften (Farbe und Glanz). Alle diese Faktoren können nur durch bestimmte chemische Zusatzstoffe beeinflusst werden.

Damit hat die Chemie für das Produkt Papier, mit dem wir uns hier vor allem beschäftigen, eine große Bedeutung.

### 1.3 Historische Versuche, aus Pflanzenmaterial Papier zu machen

Papier und papierähnliche Stoffe wurden schon immer aus Materialien gemacht, die aus Pflanzen stammten. Dies gilt für Papyrus und für die verschiedenen Stoffe, die aus Rinde bzw. Rindenbast in den alten Kulturen gefertigt wurden (*Tapa* bei den Polynesiern, *Huun* bei den Mayas, *Amatl* bei den Azteken).

Als Rohstoff für das eigentliche, ursprünglich aus China stammende Papier dienten allerdings Textilfasern (Hanf und Leinen), die aus Textilabfällen (Lumpen) gewonnen wurden. Papier war schon immer ein Pionier bei der Veredlung von Abfällen. Das Pergament aus Tierhäuten und Beschreibfolien fallen nicht unter diese Gruppe von papierähnlichen Stoffen.

Als man nach der Erfindung des Buchdrucks immer mehr Papier brauchte, reichten die Lumpen nicht mehr aus und viele erfinderische Geister versuchten, direkt aus Pflanzenmaterial Papier zu machen.



*Papyrus*



*Waben eines Wespennestes aus Papier*

Das musste doch möglich sein, schließlich hingen in den alten Häusern unter den steilen Dächern überall natürliche Papierprodukte, nämlich die Wespennester. Auch der Würzburger Theologe Jakob Christian Schäfer, ein Universalgenie, versuchte Papier aus folgenden Pflanzenstoffen zu machen:

Pappelwolle, Moos, Flechten, Hopfen, Weinreben, Disteln, Feldmelde, Beifuß, Mais, Brennesseln, Aloe, Stroh, Rohrkolben, Kohlstrunke, Graswolle, Maiblümchen, Torf, Seidenpflanzen, Ginster, Hanfschäben, Kartoffelpflanzen, Torf, Waldreben, Tannenzapfen, Weiden- und Espenholz, Sägespäne und Dachschildeln.

Er beschrieb seine Versuche akribisch in sechs Bänden: *Versuche und Muster, ohne alle Lumpen oder doch mit einem geringen Zusatze derselben, Papier zu machen.*

Wie andere hatte er trotzdem keinen Erfolg, weil das erzielte Papier zu nichts taugte. Es fehlte ihm einfach an einer geeigneten Technik, das Pflanzenmaterial sauber zu zerfasern und zu binden. Er hatte eben keinen Wespenspeichel und keine Raspelzunge.

Für die Zerfaserung von Holz hat fünfzig Jahre später Friedrich Gottlob Keller einen Weg gefunden, indem er Holzstäbe tangential auf einem Messerer-Schleifstein abrieb.

Auch der braune Holzschliff war anfangs nicht geeignet ein Papier zu erzeugen, das annähernd die Qualität von Lumpenpapier erreichte.

Erst durch Behandlung mit starken, ätzenden und bleichenden Chemikalien konnten schön weiße Fasern gewonnen werden, aus denen man hochwertiges Papier machen konnte. Aus diesen Anfängen entwickelten sich die heute benutzten Aufschlussverfahren von Holz, mit denen man Zellstoff erzeugt.

## 1.4 Ohne Chemie geht es nicht (chemische Aspekte der Papierherstellung)

### 1.4.1 Was heißt chemisch?

Wenn wir in diesem Zusammenhang von einem chemischen Verfahrensschritt sprechen, meinen wir, dass in diesem Prozess eine stoffliche Veränderung erfolgt. Dadurch unterscheidet sich die chemische von der mechanischen Technologie. Bei dieser wird nur die Form der beteiligten Materialien verändert.

Tabelle 3: Unterschiede zwischen chemischer und mechanischer Technologie

	<i>mechanische Technologie</i>	<i>chemische Technologie</i>
<i>verändert</i>	die Form	den Stoff
<i>Grundoperationen</i>	spanen und fügen (druckformen)	lösen und synthetisieren
<i>Aggregatzustand</i>	fest (zähflüssig)	flüssig oder gasförmig
<i>Aggregate</i>	Maschinen	chem. Apparate (z.B. Kessel)
<i>vorwiegend benutzte Energieform</i>	mechanisch	thermisch

Charakteristisch für einen chemischen Prozess ist, dass sich dabei die beteiligten Stoffe nicht nur in ihrer Form, sondern ihrer Zusammensetzung verändern. Damit das geschehen kann, müssen chemische Bindungen gelöst werden, die den beteiligten Stoff im Inneren zusammenhalten.

Ein Reinstoff besteht aus gleichartigen Molekülen, die sich aus durch chemische Bindungen „Valenzen“ zusammengehaltenen Atomen aufbauen. Ein Stoffgemisch dagegen besteht aus Reinstoffen, die durch mehr oder weniger starke physikalische Kräfte „Nebenvalenzen“ verbunden sind. „Stoffliche Veränderung“ bei einem Prozess heißt daher, dass dabei bestimmte Bindungen auf atomar/molekularer Ebene gelöst und andere neu geknüpft werden.

➔ Bei chemischen Verfahren werden chemische Bindungen gelöst und neue geknüpft. Dadurch verändert sich die stoffliche Zusammensetzung

Genau genommen ist der Unterschied zwischen chemischen und mechanischen Verfahren nicht so fundamental, weil auch bei mechanischen Verfahren in geringem Ausmaß chemische Bindungen gelöst werden müssen (z.B. an der Schnittkante beim Schneiden), entscheidend jedoch ist, dass dabei die allermeisten Bindungen erhalten bleiben.

### 1.4.2 Chemische Faktoren in der Technologie des Zellstoffs und Papiers

Chemische Faktoren findet man überall dort, wo bei einzelnen Prozess-Schritten chemische Bindungen gelöst oder gebildet werden. Der höchste Anteil der Chemie tritt natürlich bei der Herstellung der Rohstoffe und Hilfsmittel auf.

Bei diesen Verfahren werden tatsächlich stabile Moleküle abgebaut und starke chemische Bindungen gelöst. Gleichzeitig werden andere chemische Bindungen zwischen neuen Partnern aufgebaut.

Bei der Papierherstellung finden die folgenden chemischen Prozesse vor allem für die Erzeugung der Rohstoffe Anwendung:

Tabelle 4: Chemische Schritte für die Gewinnung von Papierrohstoffen

<i>Verfahrensschritt für die Papiergewinnung</i>	<i>Chemisches Grundverfahren</i>
<i>Synthese des Rohstoffs (Holz-, Pflanzenfasern)</i>	Photosynthese
<i>Isolierung der Fasern</i>	Aufschluss
<i>Aufbereitung von Altstoff</i>	Deinking
<i>Erzielung der Weiße</i>	Bleiche

Dagegen haben wir es bei der Papierherstellung selbst vorwiegend mit schwachen und mittelstarken chemischen Kräften zu tun. Die wichtigste Rolle spielen hier die Wasserstoff - Brücken - Bindungen, die in der Faser - Suspension für die Hydratisierung der Fasern und im Papier für die Faser/Faser - Bindungen verantwortlich sind.

→ Für die Gewinnung der Papierfasern spielt die chemische Verfahrenstechnik eine entscheidende Rolle

Daneben spielt die gesamte Palette der kolloidchemischen Wechselwirkungen bei der Papierbildung und -veredlung eine ganz wichtige Rolle.

Tabelle 5: Chemische Faktoren bei der Papierherstellung und -veredlung

<i>Verfahrensschritt für die Papiergewinnung</i>	<i>Chemisches Grundverfahren</i>
<i>Herstellung von Stoffsuspensionen (Fasern, Füllstoffe) in</i>	Dispergierung
<i>Blattbildung</i>	Retention, Entwässerung
<i>Ausbildung der Blattfestigkeit</i>	Wasserstoff-Brücken - Bildung; Masseleimung
<i>Ausbildung der Nassfestigkeit</i>	Nassfestleimung
<i>Hydrophobierung</i>	Leimung
<i>Erzielung der optischen Eigenschaften</i>	Färbung, Nuancierung
<i>Oberflächenleimung</i>	Stärkeaufbereitung
<i>Streichfarbenzubereitung</i>	Formulierung

## 1.5 Faserquellen für Papier

Das Papier ist im Wesentlichen ein Faservlies. Sein tragendes Gerüst wird von den Fasern gebildet, die früher vorwiegend aus textilen Faserabfällen (Lumpen), heute zum weit überwiegenden Teil aus Holz hergestellt werden.

### 1.5.3 Primär- und Sekundärfaserrohstoffe

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt anhand der Stoffflüsse in der deutschen Papierwirtschaft, dass der größte Teil des Faserstoffs durch Altpapier bestritten wird. Daneben sind aber aus Qualitätsgründen die Primärfaserstoffe unverzichtbar. Durch mehrfaches Nutzung-Recycling sinkt die Faserqualität (wobei gleichzeitig die am stärksten geschädigte Faserfraktion mit dem Abfall ausgeschleust wird). Mit dem importierten Papier werden Qualitäten dem nationalen Papier-Kreislauf zugefügt, die einen relativ hohen Anteil an Frischfasern enthalten, während mit der Exportware ein hoher Anteil an Recyclingfasern aus dem Kreislauf ausgeschleust wird. Dies kommt der Qualität des hier erzeugten Papiers zugute.

Sobald Deutschlands Handelspartner eine vergleichbar hohe Recyclingquote erreicht haben werden, wird diese „Blutaufrischung“ ausbleiben, so dass auch hierzulande wieder etwas mehr Primärfaser eingesetzt werden muss. Zumindest ist hier keine wesentliche Steigerung des Sekundärfaseranteils mehr zu erwarten. Das Verhältnis von Holz- zu Zellstoff wird aber auch wesentlich von ökonomischen Faktoren, vor allem vom Verhältnis des Holzpreises zu den Energiekosten, abhängen. Zellstoff braucht sehr viel weniger Energie (es wird im Gegenteil Energie aus Biomasse erzeugt), aber die Faserstoffausbeute (gemessen am Gewicht) ist hier viel niedriger.

Welche Rolle die Faserstoffe im Papier spielen und woher diese stammen wird deutlich, wenn man die Haupt-Stoffflüsse betrachtet, wie sie am Beispiel der europäischen Papierindustrie in Abbildung 3 dargestellt sind. Hier wird nicht unterschieden zwischen Zellstoff und Holzstoff, beides zusammengefasst unter dem Begriff „pulp“.

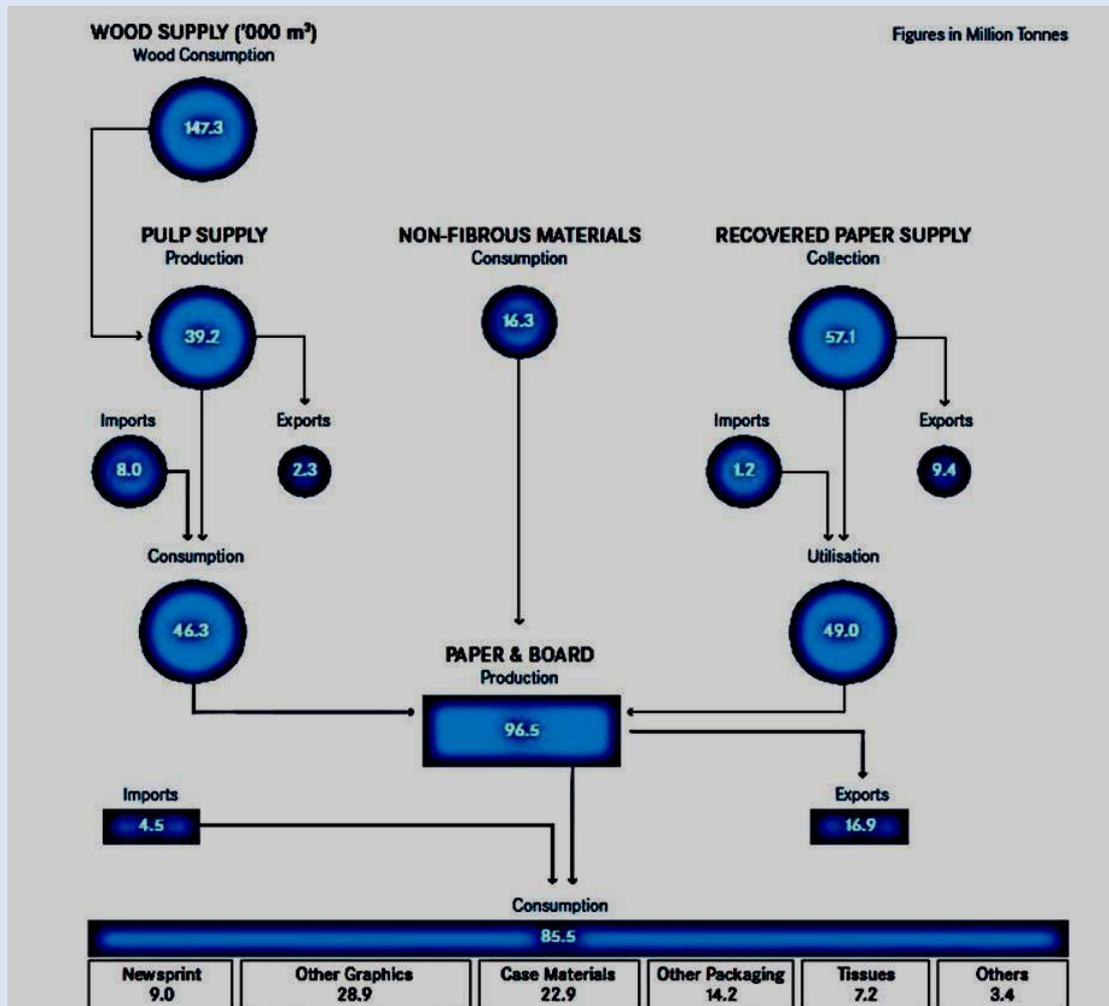


Abbildung 3: Stoffflüsse der Papierindustrie (Pulp beinhaltet Zellstoff und Holzstoff; Quelle CEPI)

Holz- und Zellstoff sind Primärfasern, die aus Holz direkt für die Produktion von Papier hergestellt werden. Zusätzlich werden Sekundärfasern verwendet, die aus der Papierwiederaufbereitung (Recycling) stammen.

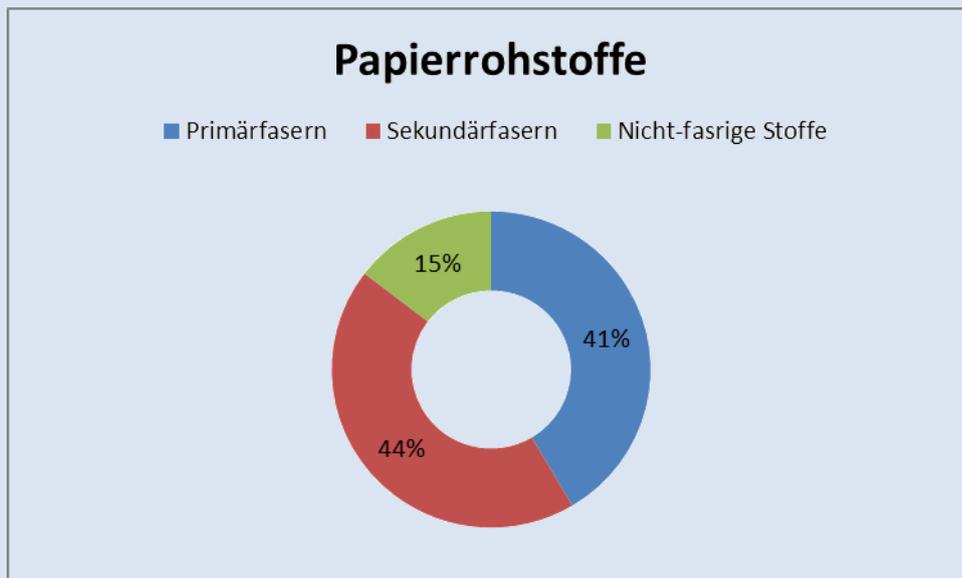


Abbildung 4: Anteile der Papierrohstoffe in Europa (Quelle CEPI)

In den europäischen Staaten hält sich der Einsatz von Primärfasern und Sekundärfaser für Papier annähernd die Waage. Etwa 1/3 der Kosten entfallen auf die Primärfaserstoffe (Abbildung 5)

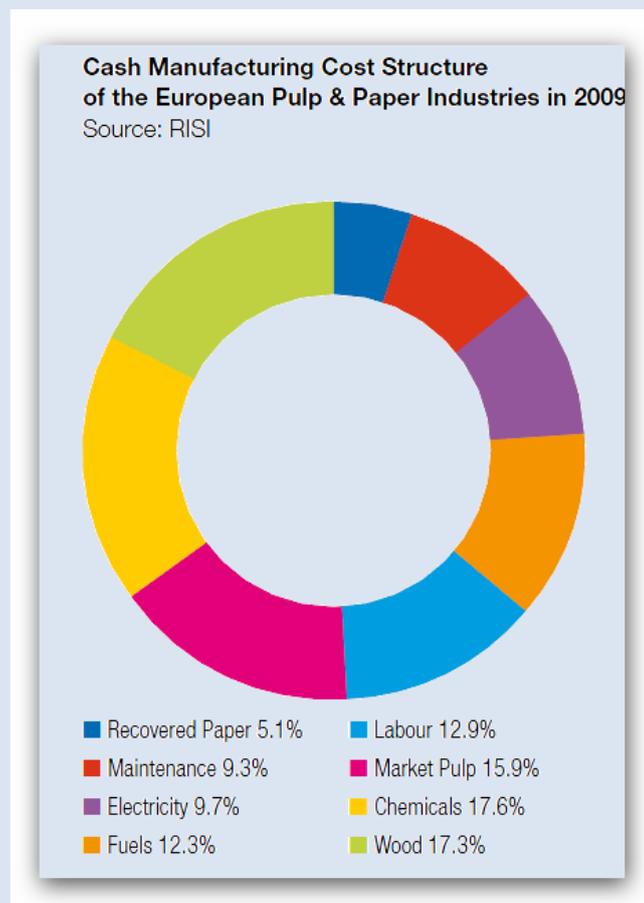


Abbildung 5: Direktkosten-Struktur der Papiererzeugung

Die weltweite Zellstoffproduktion steigt nur schwach an.

Die Produktion von Nadelholzzellstoff und dem Sulfitprozess überwiegt in Mitteleuropa (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) Die größte Menge wird integriert für den eigenen Bedarf von Papierfabriken erzeugt. Der Anteil an Marktzellstoff war rückläufig, erhöht sich aber wieder durch Umstellung von Attisholz und Rosenthal (280 kt/a) sowie den Neubau von Stendal (550 kt/a).

Unter den üblichen Massenfaserstoffen für Papier ist Zellstoff der teuerste.

Wenn eine Papierfabrik auf demselben Gelände eine Anlage zur Zellstoffherstellung besitzt, die überwiegend dazu dient, den selbst benötigten Zellstoff zu produzieren, spricht man von einer „integrierten Zellstoffproduktion“.

Eine solche Anlage hat viele Vorteile, unter anderem:

- Nutzung der Energieproduktion der Zellstoffanlage zur Strom- und Dampferzeugung (Kraft- Wärme-Kopplung)
- Trocknung entfällt (Energieeinsparung)
- Einfacher Transport: der wässrige Faserbrei kann durch Rohrleitungen direkt in die Maschinenbütte gepumpt werden (Kosteneinsparung)
- Maßgeschneiderte Qualität möglich
- Geringeres Preisschwankungsrisiko (meist verhalten sich Papier- und Zellstoff-Preis antizyklisch, d.h. gerade wenn Papier billig ist, ist der Zellstoff teuer, was den Papiermacher in Schwierigkeiten bringt. Ist er auch gleichzeitig Zellstoffproduzent, kann er die geringen Erlöse beim Papier infolge seiner gegenüber dem Marktpreis günstigeren Zellstoffkosten teilweise kompensieren).

Diesen Vorteilen stehen natürlich auch Nachteile gegenüber (ansonsten würden wir wahrscheinlich nur integrierte Anlagen haben). Zu den Nachteilen gehören:

- Sehr geringe Zwischenlager-Möglichkeit (nasser Zellstoff vergammelt)
- Schlechtere Entwässerung des ungetrockneten Zellstoffs bei der Papierherstellung
- Verunreinigung durch Übernahme von gelösten Bestandteilen („carry over“) aus der Zellstoffproduktion, wenn dieser nicht sehr aufwändig gewaschen wird
- Höherer Kapital-, Platz- und qualifizierter Personalbedarf für das Erstellen und Betreiben der Zellstoffanlage.

Für die Zellstoffproduktion ist der größte Kostenblock die Rohstoffkosten für das Holz (Abbildung 6). Diese sind auch im internationalen Vergleich ein wesentlicher Standortfaktor. Dass TMP und Holzschliff kostengünstiger sind, liegt vor allem an der höheren Ausbeute (Menge an Faserstoff, die man aus einer Tonne Holz gewinnen kann).

Allerdings sind die Rohstoffe insgesamt ein Kostenfaktor, der circa die Hälfte der Herstellkosten von Papier ausmacht (In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden hier die Ausgangsmaterialien Holz und Chemikalien berücksichtigt, die auch im Zellstoff stecken) .

Für die Herstellung des Zellstoffs selbst, sind wieder die Holzkosten der entscheidende Kostenfaktor. (Abbildung 6).

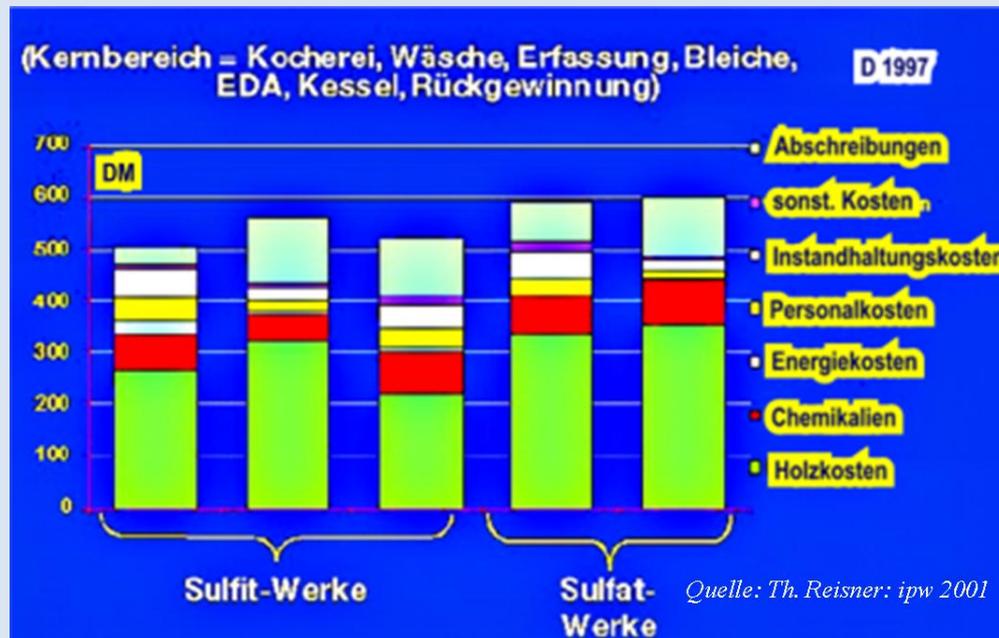


Abbildung 6: Kostenstruktur verschiedener deutscher Zellstoffanlagen (1997)

Neben den Faserstoffen bilden auch mengenmäßig die anorganischen Füllstoffe einen hohen Anteil am Rohstoffeinsatz. Sie werden entweder direkt in die Produktion eingebracht oder indirekt mit dem Altpapier eingeschleust, das neben Fasern auch viel Füllstoff enthält. Quantitativ fallen daneben die chemischen Hilfsmittel (die chemische Industrie spricht lieber von Zusatzstoffen, um nicht so deutlich darauf hinzuweisen, dass sie im Papier nur eine untergeordnete Rolle spielen) kaum ins Gewicht. Als sekundäre Rohstoffquelle spielt in den Industrieländern Altpapier eine erhebliche Rolle

## 2 Holz als Rohstoff und Energieträger

Holz ist das Stützgewebe der ausdauernden Pflanzen und bildet mengenmäßig den Löwenanteil an organischen Stoffen in der Biosphäre. Es wird chemisch aus Cellulose, Lignin und anderen Polysacchariden (Polyosen oder Hemicellulosen) gebildet. Diese Biopolymeren sind daher auch die am weitesten verbreiteten organischen Verbindungen auf der Erde. Abbildung 7 zeigt, wie sich die organische Materie der Erde insgesamt zusammensetzt und welcher Anteil davon auf das Holz entfällt.

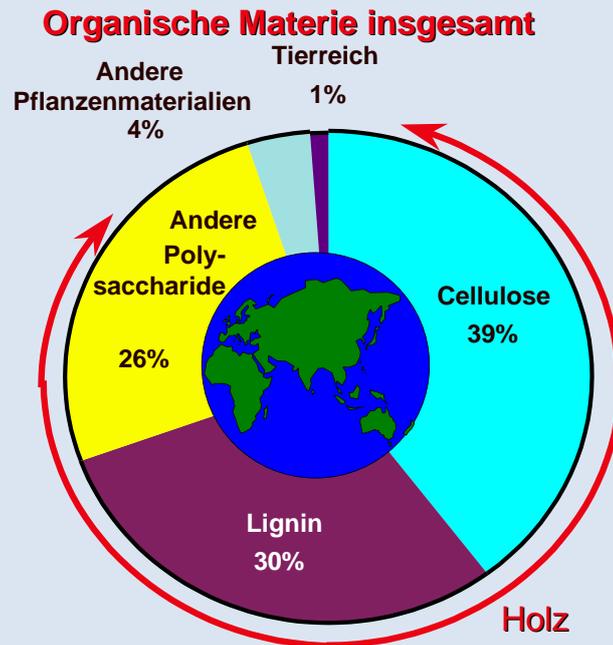


Abbildung 7: Zusammensetzung des organischen Materials auf der Erdoberfläche

Bedenkt man noch, dass Holz ständig nachwächst, so scheint man hier eine unerschöpfliche Rohstoffquelle zur Hand zu haben. Aber Holz ist gleichzeitig auch das wichtigste Baumaterial, ein sehr bedeutender Werkstoff und der wichtigste Energieträger. Daher ist es nicht verwunderlich, dass in Anbetracht der rapide wachsenden Erdbevölkerung auch Holz in nicht allzu ferner Zukunft ein Mangelrohstoff wird. In Abbildung 8 ist zu erkennen, dass der Holzzuwachs weltweit immer geringer wird. Dies beruht vor allem auf der Rodung tropischer Wälder und dem Vordringen der Savanne und der Wüstengürtel durch übermäßige Nutzung. Dieser weltweite Trend kann noch nicht durch eine schwach gegenläufige Entwicklung in den industrialisierten Ländern kompensiert werden. Dort wächst durch eine nachhaltige Forstwirtschaft und die geringe Rolle von Holz als Brennstoff regelmäßig mehr Holz zu als eingeschlagen wird.

## 2.1 Rolle des Holzes in der Biosphäre

Holz ist für die Existenz der Biosphäre in einer für die menschliche Zivilisation günstigen Form unerlässlich. Es ist nicht nur der „Träger“ der Photosyntheseapparate sondern auch die wichtigste Speicherform von nutzbarem Kohlenstoff. Es ist kein Zufall, dass bei den alten Chinesen Holz das fünfte Element bedeutete. Die Existenz der Menschheit hängt jedenfalls davon ab, wie sie mit den Rohstoffen Wasser und Holz umgeht.

Die Weltproduktion an Holz betrug im Jahr 2000:

Rundholz	1588 Mm <sup>3</sup>
Brennholz	1789 Mm <sup>3</sup>
gesamt	3377 Mm <sup>3</sup>

Weltweit wächst an Holz immer noch deutlich mehr zu als durch den Menschen verbraucht wird. Allerdings sinken die Zuwächse, weil immer mehr Waldland, besonders in den semiariden Gebieten der Erde (Desertifikation) verloren geht. Daher schließt sich

langsam die Schere zwischen abnehmenden Zuwächsen und zunehmendem Verbrauch (Abbildung 8)

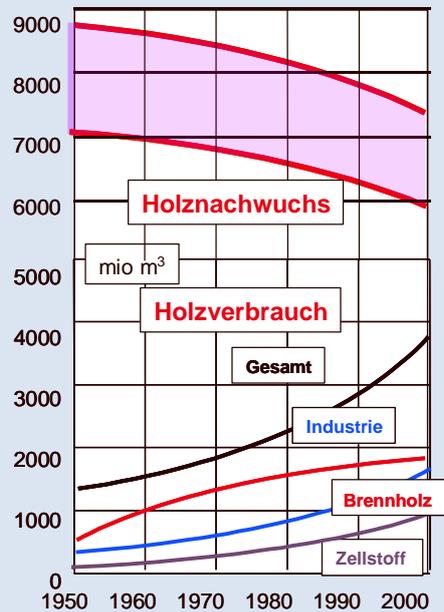


Abbildung 8: Bedeutung des der industriellen Holznutzung

Bei der industriellen Nutzung von Holz spielt quantitativ die Zellstoffherzeugung eine wichtige Rolle. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese in den Industrieländern vor allem Durchforstungsholz und Sägeabfälle nutzt. Die Zellstoff- und Papierindustrie steht als Rohstoffverbraucher in dieser Hinsicht eher im Wettbewerb mit der Verwendung von Holz als Energieträger. Mit dem Knapperwerden der fossilen Brennstoffe wird aber auch hier ein schärferer Wettbewerb erwartet werden können. In jedem Fall muss mit diesem Rohstoff sehr sorgfältig umgegangen werden.

## 2.2 Holz in Deutschland

In Deutschland wächst zurzeit mehr Holz nach als verbraucht wird (Einschlag pro Jahr ca.  $40 \text{ Mm}^3$ ; Nachwuchs ca.  $60 \text{ Mm}^3$ ). 2002 wurden, bedingt durch Sturmschäden etwas mehr als normal eingeschlagen ( $42,2 \text{ Mm}^3$ ). Davon entfielen 57% auf Fichte, Tanne, Douglasie und 22% auf Kiefer und Lärche. Der Anteil an Rotbuche machte 18%, der an Eiche 4% aus.

Trotzdem wurde mehr Holz importiert als exportiert, sodass nur ein rechnerischer Selbstversorgungsgrad von 92% erreicht wurde.

Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Holzwirtschaft in Deutschland ist allerdings insgesamt vergleichsweise gering. Holz macht nur 2% des Handelsvolumens aus. Zum Vergleich: Finnland 36%; Schweden 18%; Österreich 8%.

## 2.3 Rolle des Holzes als Faserstoffquelle für Papier

Am Beispiel Deutschlands sieht man die Bedeutung von Sägeabfall für die Erzeugung von Zellstoff (Abbildung 9). Bei dem zusätzlich eingesetzten Faserholz handelt es sich ausschließlich um Durchforstungsholz oder geschädigtes Holzmaterial

### Herkunft

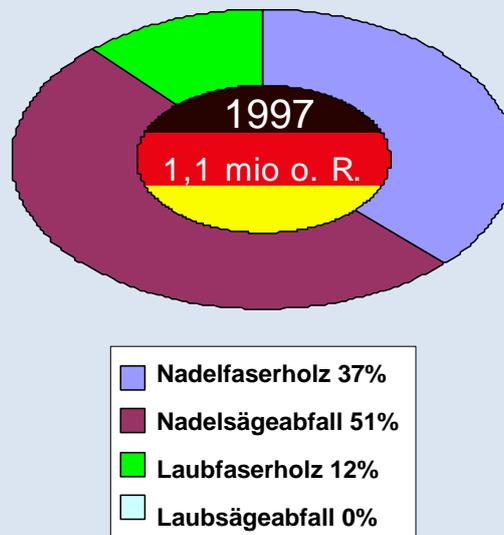


Abbildung 9: Arten des für die Zellstofferzeugung benutzten Holzes

Für die Herstellung von Holzschliff sind Sägeabfälle ungeeignet. Die Schwarten sind für Refinerstoff brauchbar. Insgesamt stellt aber Holzstoff höhere Anforderungen an das Rohmaterial als Zellstoff. Abbildung 10 stellt die Zusammensetzung des Primärfaser- verbrauchs der deutschen Papierindustrie insgesamt dar. Der Anteil an mechanisch ge- wonnenem Holzstoff liegt bei ca. 42%.

### Verarbeitung

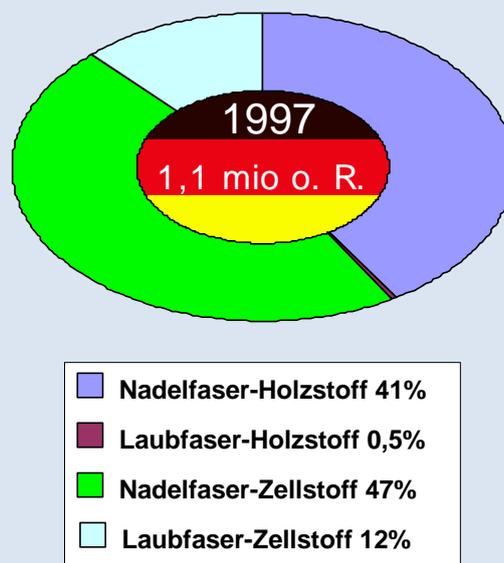


Abbildung 10: Aufgliederung der für die Papiererzeugung benutzten Primärfaserstoffe

Ein Vorteil des Holzstoffs gegenüber dem Zellstoff liegt darin, dass bei jenem kaum Abfall anfällt und fast das gesamte Holzmaterial in Form eines Faserstoffs zur Verfü- gung steht.

Generell ist die Wirtschaftlichkeit der Holznutzung immer im Gesamtzusammenhang zu beurteilen. Idealerweise sollte das Holz zu hundert Prozent genutzt werden, ohne dass Abfall entsteht.

## 2.4 Nutzung nachwachsender Rohstoffe

Papier ist ein Produkt, das überwiegend aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt wird. Insofern ist es ein Produkt, das aus der vorindustriellen Zeit stammt und gleichzeitig schon in die ökoindustrielle Wirtschaftsphase überleitet. In Zukunft werden ja alle organischen Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden müssen, wenn die fossilen Reserven an Kohlenwasserstoffen aufgebraucht sind. Nachwachsende Rohstoffe sind allgemein solche, die durch Organismen gebildet und vom Menschen als Rohstoffe genutzt werden. Für eine nachhaltige Nutzung müssen diese Nutzorganismen durch Land- und Forstwirtschaft, durch Aqua- und Biokultur in gleichem Maß ständig erzeugt in dem sie verbraucht werden.

Bei diesen Rohstoffen handelt sich dabei entweder um die Stoffe, aus denen sich die Körper der Organismen aufbauen (Gerüststoffe), oder um Reservestoffe, die in Speicherorganen (z.B. Knollen) oder in Samen und Früchten gespeichert sind. Quantitativ die geringste Rolle spielen die Wirkstoffe, die besondere Aufgaben im Organismus erfüllen, in relativ kleinen Mengen gebildet werden, aber für den Organismus von grundlegender Bedeutung sind. Dazu gehören die Enzyme, die Erbsubstanz und Stoffe, die auf Feinde giftig wirken und zur Verteidigung (chemische Waffen) dienen.

Abbildung 11 zeigt schematisch diese aus Organismen gewonnenen Stoffe, die stofflich (als Material oder als Nahrung) oder energetisch (zur Erzeugung thermischer Energie durch Verbrennen) genutzt werden. Die Wirkstoffe finden vielfältige Verwendung in der Technik, aber auch in Medizin und Pharmazie.

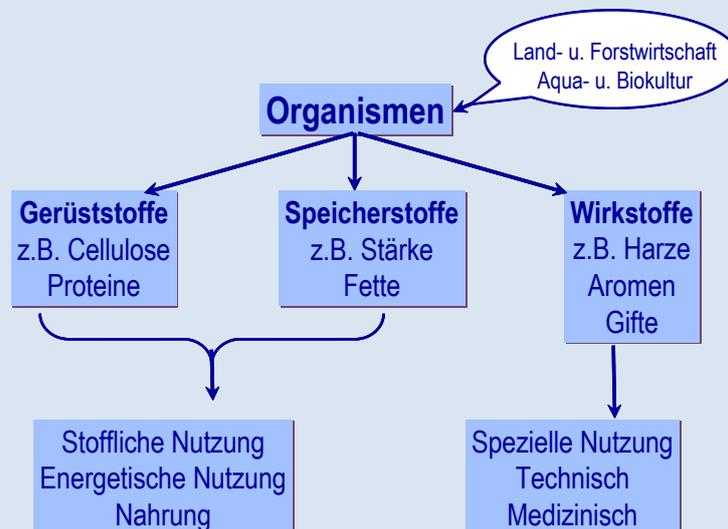


Abbildung 11: Einteilung der nachwachsenden Rohstoffe

## 2.5 Integrale Nutzung von Holzquellen

Das Holz ist ein hoch strukturiertes Biomaterial, das von der Evolution als dauerhaftes, regenerierbares Gerüstmaterial optimiert wurde. Alle Strukturelemente sind für sich nutzbar. Durch fortschreitende Zerkleinerung (zuerst mechanisch, dann chemisch) erhält

man immer feinere Materialien mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften (Abbildung 12).

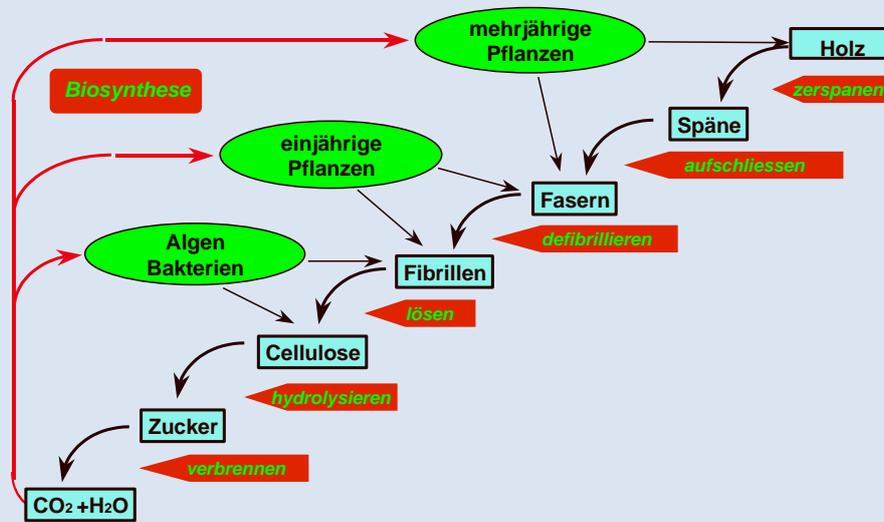


Abbildung 12: Aufarbeitungsschritte für eine optimale Nutzung des nachwachsenden Rohstoffes Holz

Aus all diesen Zwischenprodukten aus dem Holz lassen sich wertvolle Produkte erzeugen, von den Papier nur eines ist (Abbildung 13). Die Ökonomie des Gesamtprozesses hängt sehr wesentlich davon ab, ob man in dieser Verarbeitungskaskade möglichst hochwertige Produkte herstellt. Die weniger desintegrierten Stoffe können dann nach Gebrauch auch stärker stofflich rezykliert werden.

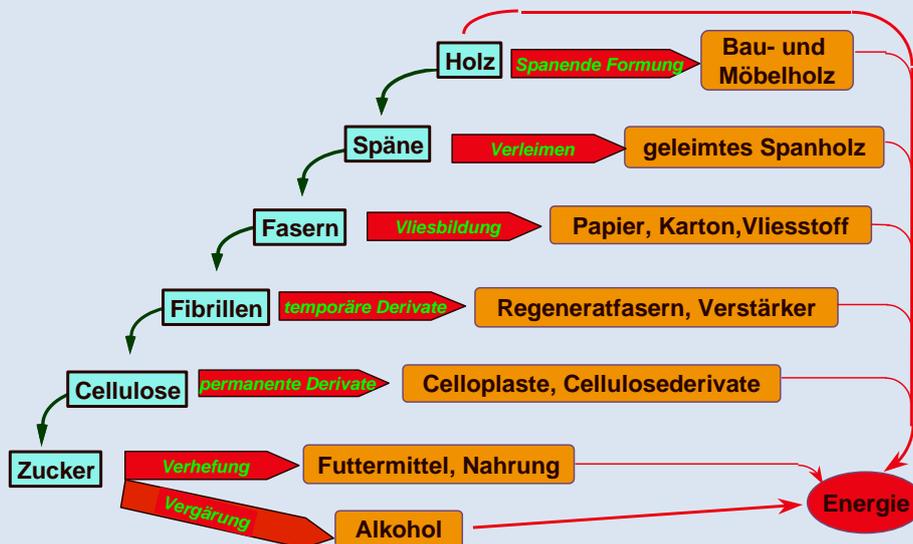


Abbildung 13: Produkte, die durch eine schrittweise Aufarbeitung von Holz gewonnen werden können

Die direkte Verbrennung ist die unwirtschaftlichste Nutzungsform. Energie kann auch aus dem Abfall gewonnen werden. Der Energieinhalt des ursprünglichen Holzes bleibt beim Gebrauch fast vollständig erhalten und ist daher auch in den Recyclingabfällen voll nutzbar. Idealerweise sollten also nur nicht mehr rezyklierbare Produkte energetisch verwertet (d.h. normalerweise verbrannt) werden.