

Aus den Instituten für Biotechnologie in Leipzig und in Potsdam

Zum Rohstoffpotential Lignocellulose

Von Klaus Härtig und Dietrich Meyer

Mit 3 Abbildungen und 1 Tabelle

(Eingegangen am 11. September 1989)

Zweifellos stellt die ausreichende Versorgung mit Rohstoffen eine der grundlegenden Bedingungen für die kontinuierliche Entwicklung jeder Volkswirtschaft dar. Dem Rechnung tragend orientiert man mittel- und langfristige Forschungsprojekte auf drei wesentliche Schwerpunkgebiete:

- a) Erweiterung der Rohstoffbasis möglichst unter Nutzung heimischer Rohstoffe,
- b) Schaffung weitgehend geschlossener Stoffkreisläufe und
- c) materialökonomischer Einsatz von Rohstoffen.

Die Rolle, die die Lignocellulosen in diesem Zusammenhang einmal über das gegenwärtige Maß hinaus spielen können, wird oft recht unterschiedlich bewertet. Eine reale Beurteilung ist auch nicht ganz einfach, muß man doch, sowohl in bezug auf mögliche erweiterte technische Verwertungsverfahren, derzeit weitgehend auf theoretische Betrachtungsformen zurückgreifen.

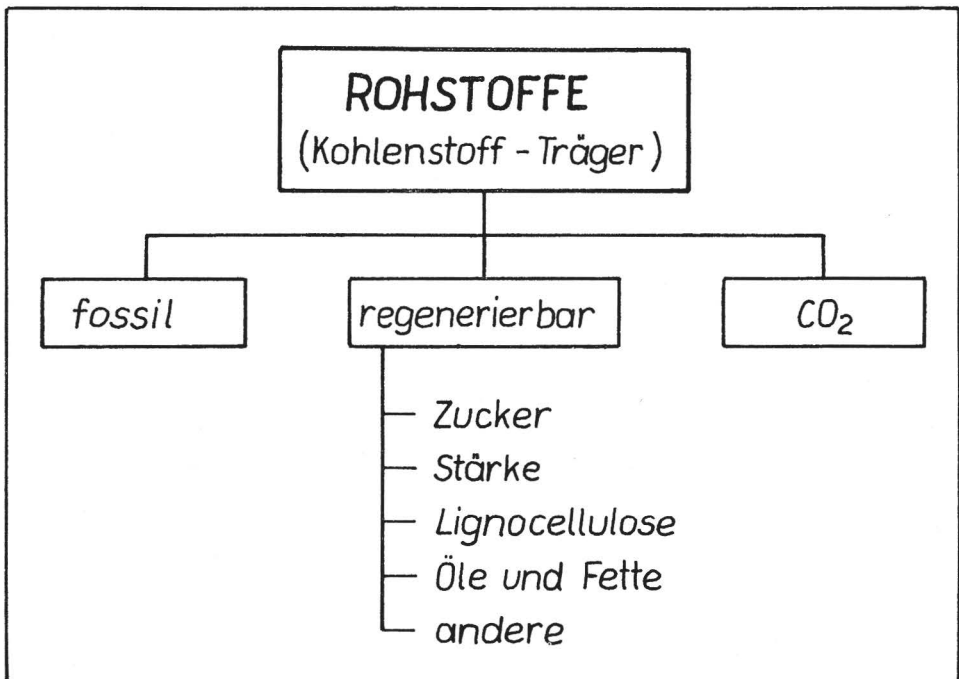


Abb. 1. Kohlenstoffquellen für die stoffwandelnde Industrie

	t , weltweit
(*) Cellulose	$100 \cdot 10^9$
(*) Hemicellulosen	$40 \cdot 10^9$
Stärke	$1 \cdot 10^9$
Zucker	$0,1 \cdot 10^9$

(*) durchschnittliche Zusammensetzung des absolut trockenen Lignocellulosematerials

Holz : 45 % Cellulose

25 % Hemicellulosen

25 % Lignin

5 % akzessorische Bestandteile

Tabelle 1. Durchschnittliche jährliche Zuwachsraten natürlicher Kohlenhydrate (Smith 1983), impliziert der Lignocellulosezuwachs

1. Lignocellulose als Rohstoff

Pflanzliche Roh-, Rest- und Abfallstoffe bieten sich prinzipiell als alternative Kohlenstoffquelle für die chemischen und biotechnischen Industrien der Zukunft an (Abb. 1). Der Charakter der Regenerierbarkeit und der des weitgehend globalen Vorkommens machen sie außergewöhnlich attraktiv und wertvoll. Besonderes Interesse kommt den Kategorien der kohlenhydrathaltigen Stoffe, wie Stärke, Zucker und vor allem Lignocellulose zu, alle mit sehr unterschiedlichen durchschnittlichen jährlichen Zuwachsraten (Tab. 1) und spezifischen Einsatzmöglichkeiten. Während bei vielen Hochveredelungsprozessen die Kosten der eingesetzten pflanzlichen Rohstoffe nur eine untergeordnete Rolle spielen und sich deshalb, auch unter dem Gesichtspunkt der Verwertung landwirtschaftlicher Überschüsse, für diese Zwecke besonders gut die relativ leicht zu verarbeitenden Kohlenhydratrohstoffe Stärke und Saccharose nutzen lassen, stellt sich die Problematik für die Herstellung von Massenprodukten oder für die Notwendigkeit einer Verwendung polymeren Materials anders dar. Zur ökonomischen Durchführung dieser Prozesse werden an den pflanzlichen Rohstoff vor allem Ansprüche quantitativer Art gestellt. Lignocellulosen sind die einzige Art pflanzlicher Biomasse, die dieser Forderung am ehesten entsprechen kann.

Lignocellulosen stellen eine pflanzliche Biomasse ausgesprochen heterogener Zusammensetzung mit den Hauptkomponenten Cellulose, Hemicellulosen und Lignin dar. Unterschiedliche Strategien – chemische und biotechnologische Verfahren bzw.

Kombinationen zwischen ihnen – hat es zu ihrer stofflichen Nutzung bisher gegeben. Abgesehen von dem traditionellen Holzeinsatz für die Papier- und Zellstoffindustrie sind viele der zwischenzeitlich entwickelten technischen Prozesse jedoch aus dem industriellen Maßstab verdrängt bzw. nicht realisiert worden. Hauptursache dafür war, daß unter ökonomischen Kriterien der Einsatz von regenerierbarem Kohlenstoff dem Einsatz fossiler Kohlenstoffträger als Rohstoff nicht standhielt. Eine gewisse Renaissance in der Wertung haben die photosynthetisch erzeugten Biomassen in der Zeit nach der Erdölkrise erfahren. Seit den beginnenden 70er Jahren ist schließlich die Diskussion um die erneuerbaren Rohstoffe trotz zeitweiser Schwankungen im Für und Wider nicht abgebrochen. Obwohl sich heute die Lage auf dem Erdölmarkt entspannt darstellt und in einigen Ländern Kohle verstärkt genutzt wird, hat sich allgemein die Erkenntnis durchgesetzt, daß der Rohstoff Lignocellulose mit Sicherheit eine Kategorie ist, mit der die zukünftige menschliche Produktionssphäre konfrontiert werden wird. Es ist absehbar, daß die sich erschöpfenden bzw. nur mit verstärktem ökonomischen Aufwand bereitstellbaren wichtigsten fossilen Kohlenstoffträger (Kohle, Erdöl, Erdgas) in Zukunft eine Entlastung und die Hinwendung zu den regenerierbaren Ressourcen erzwingen werden.

Die pflanzlichen Biomassen, von deren jährlichem Neuzuwachs weltweit gegenwärtig rund vier Prozent wirtschaftlich genutzt werden (ein bis zwei Prozent als Nahrungsmittel, ein Prozent für die Papierindustrie und ein Prozent für die Erzeugung von Wärmeenergie (Hollenberg et al. 1987), müßten dann ihrerseits in zunehmendem Maße den hohen Anforderungen als Roh- und Werkstoff nachkommen.

Land- und Forstwirtschaft können zum Rohstofflieferanten sowohl für die Energieerzeugung (Coombs et al. 1985) als auch für die stofflichen Verwertungsverfahren werden. Letzteres scheint von der Bedeutung und Realisierbarkeit her bevorteilt zu sein, denkt man an die günstig von der „Naturfabrik“ vorgebildeten chemischen Strukturen und der, im Gegensatz zur stofflichen Nutzung, auf dem Energiesektor vorhandenen bzw. absehbaren Vielfalt alternativer Möglichkeiten (Kernenergie, direkte Nutzung der Sonnenenergie, Wasser- und Windkraft, Erdwärme etc.). Zur Bewertung des für die stofflichen Verwertungskonzepte gegenwärtig zur Verfügung stehenden Rohstoffpotentials und dessen Erweiterungsmöglichkeiten hat sich die Einteilung der hier zu betrachtenden Lignocellulosen in Primär- und Sekundärpotential als günstig erwiesen (Abb. 2).

2. Primärpotential

Als Primärpotential soll die Kategorie pflanzlicher Biomasse bezeichnet werden, die als erneuerbarer Rohstoff direkt aus der Natur zur Verfügung steht. Sie wird über die stoffliche Fixierung von CO_2 und H_2O im Verlaufe der Photosynthese gebildet. Bemerkenswert dabei ist, daß mit der pflanzlichen Biomasse nicht nur das häufigste Naturprodukt der Erde (Lignocellulose) mit den damit auch häufigsten natürlichen organischen Materialien (Cellulose, Lignin) in großem Umfang synthetisiert wird, sondern daß mit ihr auch die derzeit einzige Möglichkeit besteht, Sonnenenergie für längere Zeit zu speichern.

Das funktionelle Kriterium in der Definition des Begriffes Primärpotential liegt in der Betonung der Verfügbarkeit der Biomassen für die menschliche Produktion. Damit grenzt man sich von dem ab, was allgemein als Biomassezuwachs bezeichnet wird, denn von dem jährlichen Zuwachs ist nur ein Teil stofflich nutzbar. Eine Reihe einschränkender Verfügbarkeitskriterien sind zu berücksichtigen:

- a) territorial starke Streubereiche in Art und Umfang der Biomasse,
- b) territorial unterschiedliche Zugänglichkeit und Erschließung der Gebiete,

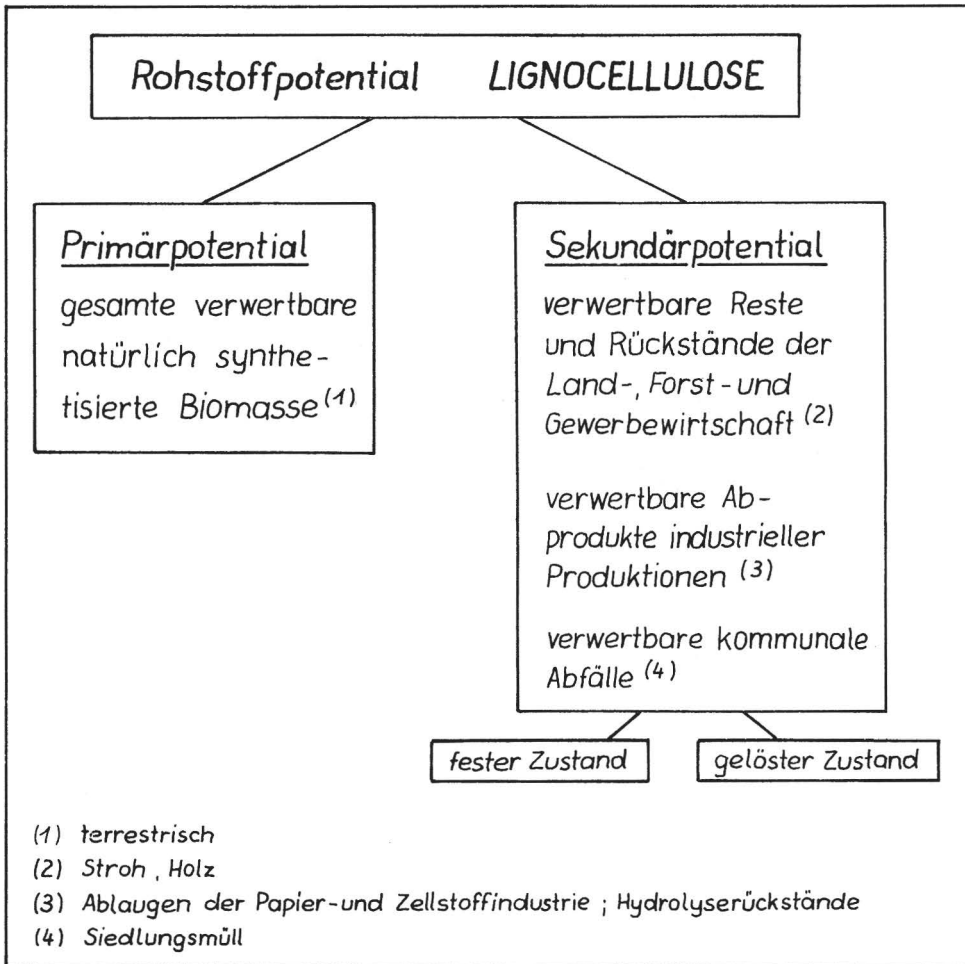


Abb. 2. Primär- und Sekundärpotential der Lignocellulosen

- c) unterschiedlicher ökonomischer Aufwand bei der Ernte verschiedener Biomasseteile,
- d) unterschiedliche qualitative Verarbeitungseigenschaften einzelner Biomassearten und
- e) notwendige ausgewogene Gewährleistung aller Zielfunktionen pflanzlicher Biomasse, besonders wenn man die Hauptproduzenten der Lignocellulosen, die Wälder betrachtet. Neben der ökonomischen Zielfunktion ist stets auch die ökologische (Lebensraum, Wasserhaushalt, Klima, Humusbildung etc.) und die soziale (Kultur, Erholung etc.) zu berücksichtigen.

Ungeachtet eben genannter Einschränkungen zur Verfügbarkeit ist es angebracht, die Nettoprimärproduktion an pflanzlicher Biomasse und deren Erweiterungsmöglichkeiten zuerst vom generellen Standpunkt aus (unabhängig vom Verwertbarkeitsgrad) zu betrachten. Detailliertere Aufschlüsselungen müssen den auf das entsprechende Einzelproblem zugeschnittenen regionalen Untersuchungen vorbehalten bleiben.

2.1. Nettoprimärproduktion pflanzlicher Biomasse

Derzeit wird weltweit mit einem Bestand um $2 \cdot 10^{12}$ t organischer Substanz als Biomasse (Biomasse als gesamte lebende Materie aus dem Reich der Pflanzen und Tiere) gerechnet. Davon sind über 99 % pflanzlicher Natur – ein Sachverhalt, der die überragende Stellung der Photosynthese zur stofflichen Fixierung der dem System Erde von außen zugeführten Energie verdeutlicht. Allerdings sind physikalisch begründet bei der Photosynthese nur fünf bis sechs Prozent der die Oberfläche erreichenden Solarenergie nutzbar. Dieser theoretische Wert wird wiederum nur in Ausnahmefällen durch einige wenige Organismen realisiert. Die durchschnittlichen Overall-Wirkungsgrade liegen um 0,1 %, wobei gewöhnlich das Licht nicht den begrenzenden Faktor des Biomasseertrages darstellt (Coombs et al. 1985).

Angesichts der einerseits sehr geringen Energiedichte der einfallenden Sonnenstrahlung (ca. 1 kW/m² in vertikaler Sonnenposition) und andererseits den beachtlichen Biosyntheseleistungen können die phototropen Pflanzen, besonders auf Grund ihrer großen Absorptionsfläche, als ein sehr wirkungsvolles System der Natur angesehen werden (Hall 1982). Jährlich wird mit dieser „Konstruktion“ ein Zuwachs von ca. $180 \cdot 10^9$ t pflanzlicher Trockensubstanz (Land und Meere) ermöglicht. Die höchsten Produktivitäten, bei allerdings nicht größtem Bestand (hohes Turnover!) werden dabei von den aquatischen Kulturen erreicht, so daß diese in entsprechenden Regionen der Erde auch von wirtschaftlichem Interesse sein könnten (Shelef et al. 1980, Chum et al. 1985).

Die von den Landpflanzen produzierte Biomasse besteht zu etwa 95 % aus Lignocellulosen (Kraepelin 1984). Hauptproduzenten sind die Wälder, deren Biomassezuwachs $90 \cdot 10^9$ t Trockenmasse/a beträgt (Chum et al. 1985) und die Produktivitäten aufweisen, die denen bei der landwirtschaftlichen Form der Bodennutzung erreichen überlegen sind. So wurden unter den gegenwärtigen Bedingungen für Ackerland jährliche Nettoprimärproduktionen von durchschnittlich 6–18 t/ha/a Gesamtbio­masse abgeschätzt (Buringh 1980). Nach Sandermann (1973) ist eine schnell wachsende Fichte in der Lage, unter optimalen Bedingungen pro Tag 13,7 g Cellulose, 8,2 g Lignin, 6,5 g Polyosen und 0,3 g Extraktstoffe, das sind total 28,7 g Holztrockensubstanz (ca. 56 cm³) zu produzieren. Bei Berücksichtigung der damit erzielbaren relativ hohen flächenbezogenen Erträge sowie der Vorteile hinsichtlich des Aufwandes für Pflanzung und Ernte, darüber hinaus der ganzjährigen Erntemöglichkeit und der Vielfalt von Nutzungsmöglichkeiten, wird verständlich, warum dem Holz eine besondere Bedeutung unter den erneuerbaren Rohstoffen zukommt. Es muß natürlich betont werden, daß eine stoffliche Verwertung dieser Kohlenstoffquelle nur eng an die Forderung der intensiven Erhöhung der Bioproduktivität und die der intensiv erweiterten Nutzung der Wälder, natürlich bei gewährleisteter Reproduktion, gebunden sein kann. Damit wird die Forstwirtschaft aber schon heute vor verantwortungsvolle Aufgaben gestellt.

2.2. Möglichkeiten zur intensiven Erweiterung des Primärpotentials (Bioproduktivität der Wälder)

Gegenwärtig ist auf der Erde ca. ein Drittel der Landfläche mit Wäldern (33 % Nadelwald, 67 % Laubwald) bedeckt (s. a. Wagenführ et al. 1985). Der Anteil ist rückläufig, besonders durch die großflächigen Rodungsaktionen in Entwicklungsländern mit einem starken Defizit fossiler Energieträger und solchen mit extensiven Agrokultur-Programmen. Die DDR lag im Bereich des Welt­durchschnittes mit einem Flächenanteil von 27 % Wald (71 % Nadelwald, 29 % Laubwald) und hatte ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Holzeinschlag und Wiederaufforstung, wobei die Bemühungen zur Aufrechterhaltung dieser Relation durch die Immissions­schädigungen der Wälder erschwert wurden. Einer extensiven Erhöhung der Bioproduktion über die

Vergrößerung der Waldfläche sind bei uns wie in vielen anderen industriell entwickelten Ländern oft Grenzen gesetzt. Die Aufmerksamkeit gilt deshalb den alternativ dazu vorhandenen Möglichkeiten zur intensiven Erhöhung, d. h. einer Zunahme über die Steigerung der flächenbezogenen spezifischen Bioproduktivität (Abb. 3).

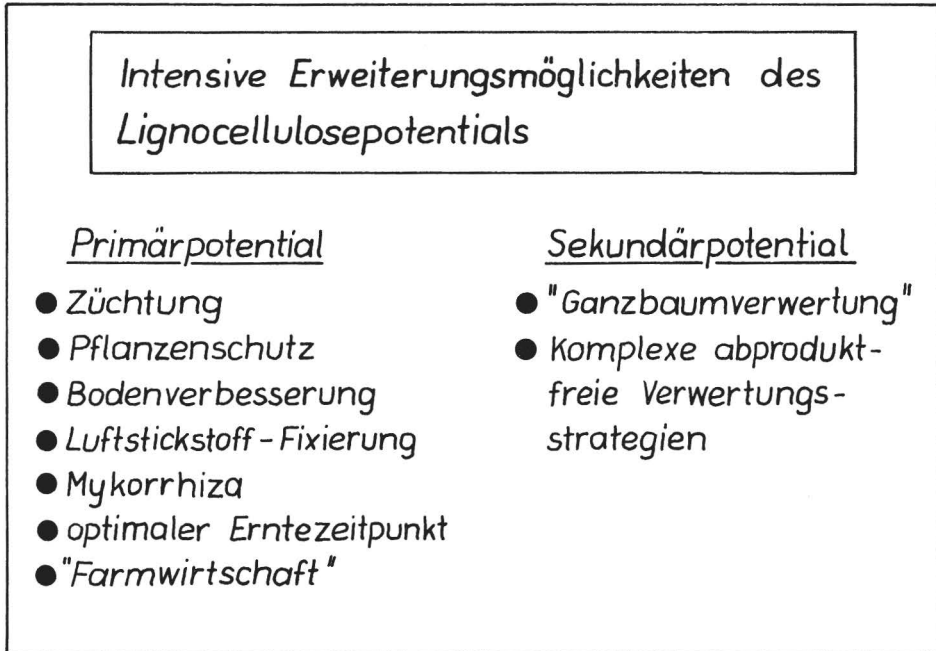


Abb. 3. Möglichkeiten zur intensiven Erweiterung des primären und sekundären Lignocellulosepotentials

Ein Ansatzpunkt ist die Züchtung und bevorzugte Nutzung verwertungstechnisch günstiger Baumarten. Genetische Zielstellungen können die Adaption an lokale Standortbedingungen, Stresstoleranz oder die Erzielung hoher Erträge bei günstiger Biomassezusammensetzung und Faserqualität sein (Kirk et al. 1983). Diskutiert wird z. B. die Hybridpappel. Diese Baumart soll sehr schnell und zudem auch auf für die Landwirtschaft uneffektiven Flächen wachsen (1,5–2 m/a), gute Verarbeitungseigenschaften aufweisen und durchschnittliche Erträge von 25–35 t Trockenmasse Holz/ha/a zulassen (Phillips et al. 1983).

Weitere wesentliche Möglichkeiten zur Erhöhung der Bioproduktivität der Wälder sind in einer Verbesserung der Kultivierung zu sehen. Dazu gehören die Maßnahmen, die dem Forstschutz dienen (Umweltschutz, Schädlingsbekämpfung), die zu einer Bodenverbesserung führen (Düngung, pH-Wert-Regulierung) oder die auf andere Art das Wachstum stimulieren (z. B. Bestrahlung von Sämlingen). Kultivierungsparameter mit großem Effekt ist die Art, wie der für die Biosynthesen notwendige Stickstoff gebunden werden kann. Da die Waldböden oft stickstoffarm sind, wäre die Realisierung der intensiv betriebenen Untersuchungen zur Fixierung von Luftstickstoff über die Symbiose mit bestimmten Actinomyceten oder Rhizopien als günstig einzuschätzen. Ebenso ließen sich die Phänomene der Mykorrhiza vorteilhaft nutzen. Die Symbiose des Wurzelgeflechtes mit verschiedenen Pilzen führt hier zu einem positiven Einfluß auf die Nährstoffversorgung der Bäume (Kirk et al. 1983).

Schließlich lassen sich noch Reserven in der zeitlichen Nutzung der Bioproduktivität erschließen, betrachtet man den über die Standzeit der Bäume keineswegs linearen Biomassezuwachs. So hat z. B. die Holzzunahme nordschwedischer Weiden ein ausgeprägtes Maximum um $15 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ nach fünf Jahren, während im Bereich von kleiner zwei oder größer neun Jahren nur weniger als $10 \text{ m}^3/\text{ha/a}$ erwartet werden können (Jensen 1976). Bei geeigneter Wahl des Zeitpunktes des Holzeinschlages sowie mit für relativ junges Holz bereitstehenden Verarbeitungstechnologien ließe sich auf diese Weise eine wesentliche Erhöhung des Turnovers erreichen. Das Ziel eines derartig intensivierten Anbaus ist eine hohe flächenbezogene Tonnage in einem kurzen Wachstumszyklus von vier bis sieben Jahren. Natürlich wird das so gewachsene Holz qualitativ nicht in jedem Falle dem für Konstruktionsmaterial oder die Papier- und Zellstoffindustrie bereitzustellenden entsprechen können, so daß daher anwendungsseitig mit einigen Beschränkungen gerechnet werden muß.

Bei Betrachtung aller genannten Möglichkeiten zur Züchtung, verbesserten Kultivierung und erhöhtem Turnover rückt schließlich auch die „Energieplantage“ in den Bereich der realisierbaren Vorstellungen (s. a. Coombs et al. 1985). Sinnvoll erstellte Projekte solcher Form der Gewinnung pflanzlicher Biomassen erfordern aber neben der sorgfältigen Beachtung der Nachteile von Monokulturen die Minimierung der Kosten für Sammlung und Transport und werden somit zwangsläufig die Hinwendung zu kleineren Verarbeitungsanlagen, möglicherweise auch mobilen, notwendig machen.

3. Sekundärpotential

Als Sekundärpotential sollen die bei der stofflichen Nutzung von Primärbiomassen anfallenden Reste, Rückstände, Abprodukte oder Abfälle der Lignocellulosen bezeichnet werden, die noch für weitere Verwertungsformen verfügbar sind. Es handelt sich dabei vor allem um Holzreste der Forst- und Gewerbeindustrie, Strohrefeste der Landwirtschaft, Ablaugen der Zellstoff- und Papierindustrie, Hydrolyserückstände und kommunale Abfälle. Je nach Herkunft fällt das Sekundärpotential entweder in fester oder gelöster Form an, wobei die Struktur des Materials (entweder nach Modifizierungsreaktionen) einen wesentlichen Einfluß auf Art und Umfang möglicher Nachfolgeprozesse hat.

Eine Verwertung des Sekundärpotentials ist als prinzipiell möglich und in den meisten Fällen aus ökonomischen sowie ökologischen Gründen auch als Zwang zu betrachten. Die Realisierung daraus abzuleitender Aufgabenstellungen erfordert eine Motivation dahingehend, daß jene Stoffe weniger als Abprodukte gegenwärtiger Technologien, sondern als ökonomisch interessante und verwertbare Nebenprodukte anzusehen sind.

3.1. Anfallmengen lignocellulosehaltigen Sekundärpotentials

Minderwertiges Holz bzw. Grünmasse fallen in nicht unerheblichen Restmengen bereits während der Kultivierung und bei der Ernte von Primärbiomassen an. Eine vollständige stoffliche Nutzung dieser Ressourcen ist aber ökonomisch-ökologisch weder als sinnvoll noch als möglich zu betrachten. Es kann abgeschätzt werden, daß sich gegenwärtig nur eine Menge von rund zehn Prozent bezogen auf den Holzeinschlag als forstliche Holzreserve zusätzlich ableiten ließen. Erschwerend für die umfassende Nutzung dieses Potentials wirkt jedoch dessen territorial und zeitlich schwankender Anfall, dessen heterogene Zusammensetzung sowie derzeit kaum vorhandene paßfähige Verarbeitungstechnologien. Die Sammel- und Transportaufwendungen sind beträchtlich und stellen einen wesentlichen Hinderungsgrund für die Realisierung diesbezüglicher Nutzungskonzepte dar.

In der Landwirtschaft sind ebenfalls nutzbare Lignocellulosereste vorhanden, für die sich eine Reihe von Verwertungsmöglichkeiten in- und außerhalb des agrarischen Bereiches eröffnen. Dabei handelt es sich vor allem um die Verwertung von Stroh, welches auf Grund seiner strukturellen Besonderheiten und der günstig mit der Getreideernte gekoppelten Erfassung ein wertvolles Substrat darstellt.

Die als industrielle Holzreste (Ablängreste, Sägespäne) ausgewiesenen Lignocellulosen betragen bis zu 33 % des bei der Holzbe- und -verarbeitung eingesetzten Holzes (Wenzel 1956). Von diesen erheblichen Mengen sind jedoch kaum nutzbare Reserven für zukünftig neue Lignocelluloseprozesse zu erwarten. Es werden gegenwärtig schon Gesamtnutzungsgrade des Holzes um 95 % erreicht – ohne daß damit die ökonomische Effizienz des Einsatzes der Reste im einzelnen bewertet wäre.

Einen großen Umfang des Sekundärpotentials nehmen die industriellen Abprodukte/Abfälle ein, die bei der Modifizierung/Isolierung von Holzinhaltstoffen auftreten. Der auf die verschiedenen Holzinhaltstoffe bezogene Holzausnutzungsgrad schwankt bei den verschiedenen mechanischen und chemischen Verwertungsverfahren zwischen 40 und 80 % (nur in Ausnahmefällen über 95 %) (Fischer 1985). Oft wird in solchen Prozessen nur ein Hauptbestandteil als Zielgröße des technischen Verfahrens der Veredlung unterzogen, der Rest ist bestenfalls Abprodukt und bereitet sogar oft Entsorgungsschwierigkeiten. Besonders die Delignifizierungsabläuge der klassischen technischen Sulfat- und Sulfitprozesse in der Papier- und Zellstoffindustrie sind von Menge und Zusammensetzung her problematisch. Überschlagsmäßig ist für jede auf diesem Wege erzeugte Tonne Zellstoff ein Ablaugenanfall von etwa 10 m³ mit einem breiten Spektrum darin enthaltener Produkte zu erwarten, von denen besonders die Lignine als schwer stofflich nutzbar gelten. So stehen für die weltweit mehr als 50 Mio. Tonnen produzierten Ablaugenlignine sinnvolle stoffwirtschaftliche Verwertungen größtenteils noch aus (Wegener et al. 1983). Diese Feststellung gilt prinzipiell auch für die Verfahren, die derzeit über die Verbrennung der Ablaugeninhaltstoffe wenigstens den kalorischen Wert der Lignine zur Prozeßenergiegewinnung und zur Aufschlußchemikalienrückgewinnung nutzen. Bei Sulfatprozessen und einigen ausgewählten Sulfitprozessen ist dies Stand der Technik und solange für die Ablaugenverbrennung keine ökonomischen Alternativen aufgezeigt werden können, läßt sich der weitgehend geschlossene Energie- und Stoffkreislauf dieser Verfahren nur schwer für die stoffliche Verwertung der Ablaugen aufspalten. Problematisch ist die aus ökonomischen Gründen nicht verbrennbare Sulfitablauge, die bezüglich solcher Parameter wie pH-Werten von 1,5–3, BOD₅-Werten von 25–35 g/l sowie COD-Werten von 120 bis 180 g/l ein ernstzunehmendes Umweltproblem darstellen (Jurgensen et al. 1979). Die Dünnlauge solcher Prozesse hat durchschnittlich nur zehn Prozent Trockensubstanzgehalt, der seinerseits in Abhängigkeit von den Aufschlußbedingungen und der eingesetzten Holzart folgende mittlere Zusammensetzung aufweist: 52 % Lignosulfonate, 23 % Monosaccharide, sechs Prozent Poly- und Oligosaccharide, acht Prozent Carbon- und Sulfonsäuren, zwei Prozent Essigsäure, drei Prozent Extraktstoffe und fünf Prozent Anorganika. Die vollständige Erfassung und günstige Nutzung dieses Rohstoffpotentials ist als eine Herausforderung für Chemie und Biotechnologie zu betrachten.

International mit zukünftig steigender Bedeutung sind auch Hydrolyserückstände und Organosolvlignine holzverarbeitender Prozesse als Sekundärpotential in die Betrachtung einzubeziehen. Besonders für die stofflich attraktiven Organosolvlignine werden Verwertungsfragen zur ökonomischen Gestaltung der mittels organischer Lösungsmittel durchgeführten Zellstoffgewinnung hochaktuell.

Die kommunalen Abfälle (Hausmüll) stellen uns besonders in den Ballungsgebieten schon heute vor schwierige Probleme. Eine Nutzung des immerhin bis zu 50 %

enthaltenen Lignocelluloseanteils könnte zu einer erheblichen Reduzierung des Mülls führen. Berücksichtigt man darüber hinaus die Verfügbarkeit zu sehr niedrigen Kosten und das bei der ohnehin notwendigen Trennung der Bestandteile mögliche Recycling anderer wichtiger Stoffe (Glas, Kunststoffe, Metalle), so könnte in Zukunft eine stoffliche Verwertungsvariante durchaus Interesse finden.

3.2. Möglichkeiten zur intensiven Nutzung des Sekundärpotentials

Der größte Teil des Sekundärpotentials leitet sich direkt aus der Holzerfassung und den vielfältigen Prozessen der stofflichen Holzverwertung ab. Damit liegt auf der Hand, daß nach Möglichkeiten zur intensiv erweiterten Nutzung vorwiegend in diesen Bereichen gesucht werden muß. Im wesentlichen sollte das alle Maßnahmen zur Vervollständigung der Ernteeinbringung, wie auch zur möglichst hoch effizienten komplexen Nutzung der gesamten Lignocellulosebiomasse umfassen (Abb. 3).

Unter den Maßnahmen zur Vervollständigung der forstlichen Ernteeinbringung fällt oft der Begriff „Ganzbaumverwertung“. Es ist bekannt, daß allgemein nur etwa 50–60 % des Gesamtwachses einer Baumbiomasse der stofflichen Verwertung zugeführt werden, der Rest sind sechs Prozent Grünmasse, sechs bis zehn Prozent Rinde, 16 Prozent Kronen und Äste, 9–13 Prozent Wurzelstöcke und sechs Prozent Restholz. Auch wenn der Begriff der „Ganzbaumverwertung“ durch Unmöglichkeit der 100 Prozent stofflichen Verwertung etwas unglücklich gewählt ist, deutet er auf Vorstellungen hin, rund 80 Prozent der gewachsenen Dendromasse bereitzustellen (Fischer 1985).

Eine wesentliche Prämisse zur ökonomischen Gestaltung von Lignocellulose-Verwertungsprozessen ist die totale Nutzung aller wesentlichen Inhaltsstoffe. Diese als „komplexe Nutzung der Lignocellulosen“ bezeichnete Forderung bedeutet, daß Verfahren zur Nutzung einzelner Holzinhaltstoffe dahingehend zu erweitern sind, daß für alle restlichen Bestandteile ebenfalls günstige Verwertungsmöglichkeiten zu finden sind und die dazu erforderlichen Verfahren in die Produktionsverbunde eingepaßt werden müssen. Zur Diskussion stehen hier vor allem die bereits erwähnten Delignifizierungsablaugen der chemischen Holzverarbeitung. Neben dem Zielprodukt Cellulose treten Teile des Kohlenhydratgehaltes, bestimmte Extraktstoffe und fast das gesamte Lignin als „Abprodukt“ auf. Für die Nutzung der Kohlenhydrate in den Ablaugen stehen einige biotechnologische Verfahren zur Verfügung. Das trifft vor allem für den Hexoseanteil zu, der wahlweise für die Ethanolherzeugung („Versprittung“) oder für die Single-Cell-Protein-Gewinnung („Verhefung“) genutzt werden kann. Aus dem Pentoseanteil kann ebenfalls mikrobielle Biomasse gewonnen werden, darüber hinaus wird an einer effektiveren Pentoseverwertung zu Ethanol gearbeitet.

Damit zeigt sich, daß für die Verwertung der Cellulose und der Hemicellulosen prinzipiell chemische und biotechnologische Lösungswege bereitstehen. Für Lignin dagegen, das immerhin zu durchschnittlich 25 Prozent in den Lignocellulosen enthalten ist und damit die größte Aromatenquelle der Erde repräsentiert, existiert ein nicht unerhebliches Defizit in der Erforschung stoffwirtschaftlich ökonomischer Verwertungsverfahren. Bei vielen der bisher in Erwägung gezogenen Prozesse wirken sich der relativ hohe Schwefelgehalt, die Kohlenhydratreste und deren Abbauprodukte, die relativ hohe Reaktionsträgheit sowie die breite Polydispersität und natürliche Variabilität der Lignine auf deren zielgerichteten Einsatz negativ aus, so daß hier noch ein weites Betätigungsfeld für die Forschung offen steht.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die steigende Bedeutung der Lignocellulosen als erneuerbares Rohstoffpotential wird diskutiert. Dabei ist die Einteilung in ein primäres und in ein sekundäres Rohstoffpotential nützlich. Verfügbarkeiten und Möglichkeiten für eine zukünftige Erhöhung dieser Potentiale werden aufgezeigt.

S u m m a r y

The increasing importance of lignocelluloses as renewable raw materials is discussed. It is favourable to subdivide the raw material potential into a primary and a secondary one. Availability of lignocelluloses and some possibilities to enlarge mentioned potentials are represented.

S c h r i f t t u m

- Buringh, P.: Limits to the productive capacity of the biosphere, In: Pierre, St. et al.: Future Sources of Organic Raw Materials CHEMRAWN I, Pergamon Press, Oxford 1980, 325–332.
- Chum, H. L., und M. M. Baizer: The Electrochemistry of Biomass and Derived Materials, ACS Monograph 183, Washington D. C. 1985.
- Coombs, J., D. O. Hall und P. Chartier: Biotechnologie zur Energieerzeugung: Verbesserungsmöglichkeiten der Produktivität von Energiepflanzen, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1985.
- Fischer, F.: Die Holzchemie – ein Intensivierungsfaktor zur komplexen Verwertung des Holzes, Chem. Tech. 37 (1985), 403–410.
- Hall, D. O.: Solar energy through biology: fuels from biomass *Experienta* 38 (1982), 3–10.
- Hollenberg, C. P., und M. Wilhelm: New substrates for old organismus. *Biotec* 1 (1987), 21–31.
- Jensen, W.: Sitzungsberichte der AdW der DDR 4 N (1976), 5–27.
- Jurgensen, M. F., und J. T. Patton: Bioremoval of Lignosulphonates from Sulplute Pulp Mill Effluents. *Proc. Biochem.* 14 (1979), 2–4.
- Kirk, T. K., T. W. Jeffries und G. F. Leatham: Biotechnology: applications and implications for the pulp and paper industry. *Tappi J.* 66 (1983), 45–51.
- Kraepelin, G.: Problemstoff Lignin. *Wissenschaftsmag. TU Berlin (West)* 7 (1984), 81–84.
- Phillips, J. A., und A. E. Humphrey: Process biotechnology for the conversion of biomass into liquid fuels, In: Wise, D. L.: *Liquid Fuel Developments*. CRC Press, Boca Raton Florida 1983, 65–95.
- Sandermann, W.: *Holz. Roh-Werkst.* 31 (1973) 11.
- Shelef, G., und C. J. Soeder: *Algal Biomass-Production and Use*. Elsevier, Amsterdam 1980.
- Smith, J.: *Einstieg in die Biotechnologie*. Hauser Verlag, München 1983.
- Wagenführ, R., und Ch. Scheiber: *Holzatlas*. 2. Aufl., Fachbuchverlag, Leipzig 1985.
- Wegener, G., und D. Fengel: Lignin – Makromolekül, Zellwandkomponente, Rohstoff. *Das Papier* 37 (1983), 22–31.
- Wenzel, H. F. J.: Holz als Chemie-Rohstoff. *Holzforsch.* 10 (1956), 129–143.

Prof. Dr. D. Meyer
 Institut für Biotechnologie
 Templiner Straße 21
 O-1560 Potsdam

Dr. K. Härtig
 Institut für Biotechnologie
 Permoserstraße 15
 O-7010 Leipzig