

Umwelt · Environment

Chimia 50 (1996) 191–198
© Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
ISSN 0009–4293

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe: Möglichkeiten und Grenzen

Vortrag, gehalten am 24. November 1995 anlässlich der Jahrestagung der Wissenschaftlichen Gesellschaft in Freiburg i. Br.

Rolf Mülhaupt*

Abstract. The quest for sustainable development of economically and ecologically attractive technologies is stimulating interest in better utilization of biomass and agricultural materials as renewable resources for chemicals, fuel, and polymers. In comparison to 'biodiesel' fuel, involving high energy consumption in biomass conversion, incineration of biomass, especially of agricultural wastes, represents the preferred route to energy production combined with reduced total carbon dioxide emission.

Carbohydrates and plant oils are attractive renewable raw materials for the production of a wide range of chemicals, including pharmaceuticals and novel biodegradable surfactants. Plant cells are being converted into chemical reactors to facilitate exploitation of feedstocks such as fatty acids. Although price/performance ratio typical for commodity plastics are not met, biopolymers are being introduced as components of packaging and lightweight materials, e.g., natural-fiber-reinforced composites for automotive applications. Illustrated by selected examples, this overview highlights prospects and limitations of renewable resources and agricultural feedstocks in energy technology and chemical industry.

1. Einleitung

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe erlebt gegenwärtig eine Renaissance und ist immer gut für Schlagzeilen wie 'Biodiesel', 'unser Taxi fährt vegetarisch', 'heimische Rohstoffquellen', 'programmierte Landwirtschaft', 'kohlendioxidneutrale Technologien', 'Jute statt Plastik'. Nach Jahren der Stagnation sind pflanzliche Rohstoffe heute in Forschung und Entwicklung wieder salonfähig. Chemie und Natur – bei beiden spielen kontrollierte Stoffumwandlungen eine zentrale Rolle. Welche Chancen bieten sich für die

Landwirtschaft und die Nutzung agrarischer Rohstoffe im Nichtnahrungsmittelbereich, insbesondere in Energiewirtschaft und chemischer Industrie? Kann sich der Bauer als Rohstofflieferant in der chemischen Industrie etablieren?

Die Nutzung pflanzlicher Rohstoffe, die im Unterschied zum Erdöl in der Natur rasch erneuert werden, ist im Einklang mit den Forderungen nach 'sustainable development' – zu deutsch nachhaltige, zukunftsfähige Entwicklung. Bereits 1987 von der Uno Weltkommission für Umwelt und Entwicklung geprägt, hat sich dieser Begriff bei der Umweltkonferenz in Rio 1992 durchgesetzt und wird von Umweltorganisationen und Industrieverbänden heute gleichermassen als Zauberformel angepriesen. An die Seite von Wirtschaftlichkeit sollen Umweltverträglichkeit sowie Schaffung und Erhalt von sozialer Sicherheit und Wohlstand als neue Qualitätsmerkmale treten. Ziel nachhaltiger Entwicklung ist es, 'die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können'. Herausragende Nachhaltigkeitsregel ist die Schonung nicht erneuerbarer Ressourcen wie Erdöl und Erdgas. Ihrem Schwinden soll dadurch entgegengewirkt werden, dass verstärkt erneuerbare Ressourcen eingesetzt werden. An die Stelle des Erdöls könnten pflanzliche Rohstoffe treten.

So nutzt die Natur seit Jahrtausenden Sonnenenergie, um durch Photosynthese aus Kohlendioxid und Wasser ein breitgefächertes Spektrum von organischen Verbindungen herzustellen. Obwohl der Wirkungsgrad der Photosynthese bei weniger als einem Prozent liegt – vielfach sind bei biochemischen Photosynthesen von Biomolekülen mehr als einhundert Einzelschritte involviert – produziert die Natur jährlich die gewaltige Menge von rund 140 Mrd. t an Biomasse (Fig. 1). Die pflanzliche Zelle entspricht einem leistungsstarken Solarkraftwerk und einer

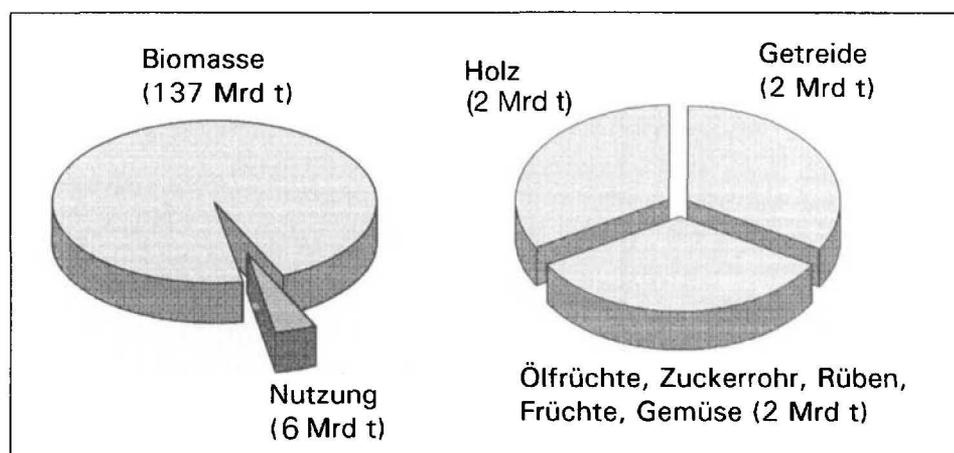


Fig. 1. Biomasse und Nutzung nachwachsender Rohstoffe

*Korrespondenz: Prof. Dr. R. Mülhaupt
Freiburger Materialforschungszentrum
und Institut für Makromolekulare Chemie
Albert-Ludwigs Universität Freiburg
Stefan-Meier-Strasse 31
D-79104 Freiburg i. Br.

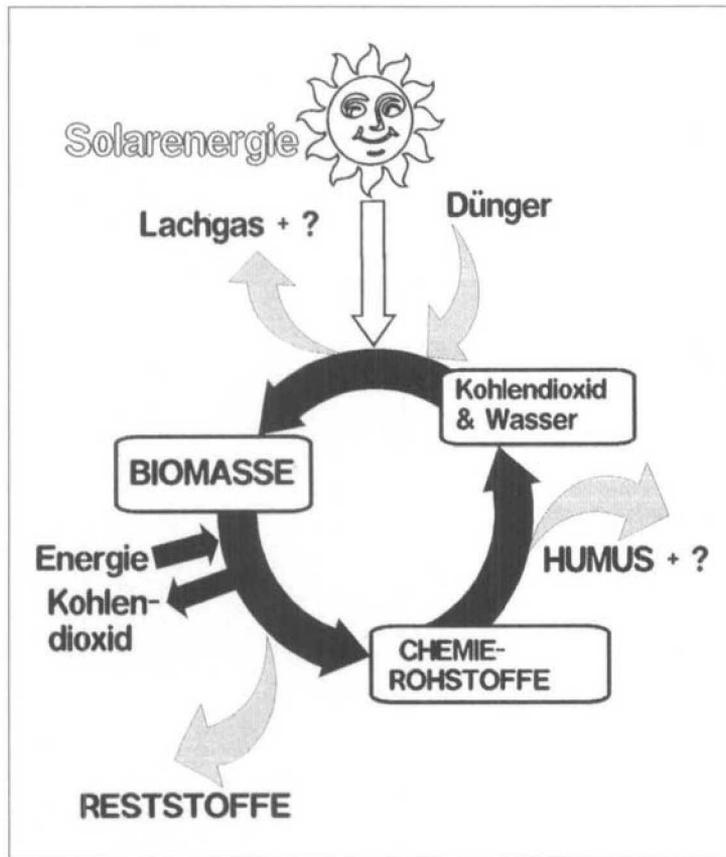


Fig. 2. Kohlendioxid-kreislauf

Warum verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe?

- Anbaualternativen ausserhalb der Nahrungsmittelproduktion, um die durch Nahrungsmittelüberproduktion freiwerdenden 15% der landwirtschaftlichen Flächen weiter zu nutzen und vor Brache zu bewahren
- Schonung fossiler Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle
- Klimaschutz durch Verminderung von Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid ('kohlendioxidneutrale Technologien') durch Nutzung pflanzlicher Photosynthese von Biomasse
- Nutzung der Synthesevorleistung der Natur in der Chemie
- Herstellung bioabbaubarer und kompostierbarer Materialien mit besserer Umweltverträglichkeit
- Nutzung von Biomasse als Energieträger und Rohstoffe, z.B. für die Biotechnologie

Fig. 3. Argumente für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe

chemischen Fabrik zugleich. Heute nutzt der Mensch rund 6 Mrd. t Biomasse pro Jahr, das sind zu jeweils ein Drittel Holz, Getreide und andere Pflanzen wie Ölfrüchte, Zuckerrohr und Rüben. Während Erdöl zu über 90% zur Energieerzeugung verbrannt wird – nur 7% gehen in die Petrochemie – konzentriert sich die Landwirtschaft heute zu über 97% auf die Nahrungsmittelproduktion. Gegenwärtig werden nur 3% der Ackerfläche für die Chemierohstoffproduktion genutzt. Als erneuerbare Energie- und Rohstoffquellen können nachwachsende Rohstoffe helfen, Ressourcen zu schonen und verlängern so die Verfügbarkeit von fossilen Rohstoffen auf der Basis von Erdöl und Erdgas.

Eine besonders attraktive Konsequenz der pflanzlichen Photosynthese ist die Möglichkeit, Kohlendioxid aus der Atmosphäre in Form von Biomasse zu binden. Kohlendioxid ist heute als Treibhausgas erkannt. Das Zusammenwirken von Bevölkerungsexplosion und industriellem Wachstum führt zum globalen Ansteigen der Durchschnittstemperaturen. Erreichen bevölkerungsreiche Länder wie China innerhalb von wenigen Jahrzehnten den Lebensstandard der westlichen Industriestaaten, ist die globale Klimakatastrophe bereits in naher Zukunft unabwendbar. Gelingt es, das bei Verbrennung oder Kompostierung freigesetzte Kohlendioxidgas durch Photosynthese zu binden, könnte Kohlendioxid im Kreislauf geführt werden (Fig. 2). Dieser Kreislauf ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn beim Anbau und bei der Aufbereitung keine massiven zusätzlichen Energiemengen konsumiert werden und durch exzessive Landwirtschaft, z.B. verstärkte Düngung und Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, keine Beeinträchtigung der Ökosysteme oder des Klimas, z.B. durch Lachgasemissionen, in Kauf genommen wird. Im Hinblick auf den Kohlendioxidkreislauf sind die sogenannten C₄-Pflanzen von Interesse, die durch ihren besonderen Stoffwechsel Kohlendioxid sehr wirkungsvoll in Form von Biomasse binden können. Beispiele für ertragsstarke Pflanzen mit Erträgen von mehr als 20 t Biomasse pro Hektar sind Gräser, z.B. Chinaschilf (*Miscanthus sinensis giganteus*).

Bei genauerer Betrachtung der Anreize für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe (Fig. 3) sind jedoch nicht Ökologie und Streben nach nachhaltigen Entwicklungen Ursachen für die Renaissance der nachwachsenden Rohstoffe, sondern die Überproduktion von Nahrungsmitteln in Europa. Immerhin werden gegenwärtig über 15% der landwirtschaftlichen Nutzflächen stillgelegt. Um diese Flächen vor

der Brache zu bewahren, erhielt der Bauer in Deutschland 1994 im Durchschnitt 751.–DEM/Hektar Stilllegungsprämie bezahlt, falls er Pflanzen für den exklusiven Einsatz im Nicht-Nahrungsmittelbereich anbaute.

Im folgenden soll an ausgewählten Beispielen aufgezeigt werden, welche Chancen sich heute für die Landwirtschaft in Energiewirtschaft und Chemie bieten und wo die Forderung nach nachhaltigen Entwicklungen Grenzen setzt. Grundlage dieser Übersicht sind Ergebnisse, die bei den Symposia 'Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie' in Mohnheim 1994 und Düsseldorf 1995 vorgestellt worden sind.

2. Biomasse als Energiequelle

Heute leisten wir uns auf Kosten zukünftiger Generationen noch immer den Luxus, über 90% des Erdöls, das sind jährlich über 3,6 Mrd. t, z.B. als Heizöl oder Treibstoffe, zu verbrennen, um Energie zu erzeugen (Fig. 4). Nur 7% des Erdöls finden in der Petrochemie für die Herstellung höherwertiger Zwischenprodukte, Feinchemikalien und Kunststoffe Verwendung. Gemessen an ihrem Potential, Kohlendioxidemissionen durch den Kohlendioxidkreislauf (Fig. 2) zu reduzieren, ist deshalb die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe besonders attraktiv, während in der chemischen Industrie Schonung der Erdölressourcen und Nutzung des Synthesepotentials der Natur im Vordergrund stehen.

Grundsätzlich bieten sich die folgenden Möglichkeiten für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der Energiewirtschaft an: 1) Erzeugen von Wärme und Energie durch die Verbrennung von Energiepflanzen, Holz und Reststoffen wie z.B. Stroh. Dieses Konzept wird seit langem in der Papierindustrie genutzt, wo weltweit jährlich ca. 50 Mio. t des bei der Papierherstellung als Nebenprodukt anfallenden Lignins verbrannt werden, um die energieintensive Aufbereitung des Zellstoffs (Cellulose) anzutreiben. 2) Erzeugung von Synthesegas (Kohlenmonoxid/Wasserstoff) oder Wasserstoff durch Konversionstechnologien, z.B. Vergasung durch Erhitzen unter Sauerstoffausschluss oder in Gegenwart geringer Sauerstoffmengen. Dieses Synthesegas kann in der chemischen Industrie für die Synthese von Chemierohstoffen genutzt werden oder es dient zum Antreiben von Turbinen für die Elektrizitätserzeugung, kombiniert mit Wärmeerzeugung durch anschließende Verbrennung (Wärme-Strom-Kopplung). 3)

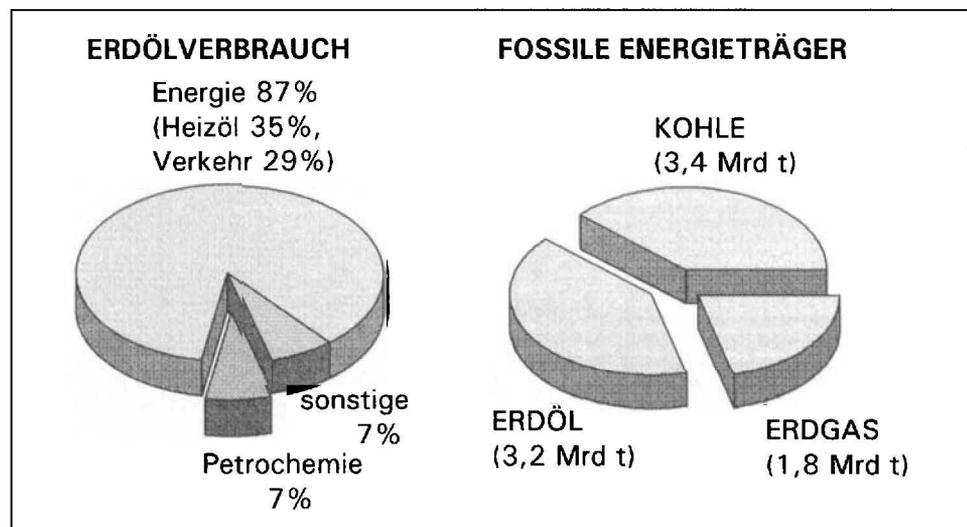


Fig. 4. Erdölverbrauch

Vergärung nachwachsender Rohstoffe zu Ethanol oder chemische Umwandlung von Pflanzenölen zu Fettsäureestern, z.B. dem als 'Biodiesel' bekannten Rapsölmethylester.

Machbarkeitsstudien und Kostenschätzungen von Veba-Öl, z.B. bei der Produktion von Wasserstoff aus unterschiedlichen Energieträgern (Tab. 1) zeigen, dass Biomasse zwar nicht mit Erdgas konkurrieren kann, aber gegenüber Wasserkraft, Kernenergie und Windenergie sowie Photovoltaik durchaus Vorteile bietet. Obwohl diese Untersuchung bereits aus dem Jahr 1988 stammt, lässt dieser Vergleich erkennen, dass Biomasse eine attraktive Option für die Energieerzeugung der Zukunft darstellt.

Kann Biomasse mehr als die Hälfte des Erdöls – wie das in einer UN Studie vorgeschlagen wird – ersetzen? Die Antwort ist klar nein. Vergleicht man Fig. 4 und Fig. 3, so stehen 6 Mrd. t nachwachsender Rohstoffe wie Holz und Nahrungsmittel ca. 3.6 Mrd. t Erdölbedarf gegenüber. Nur durch erhebliche Einschränkung der Nahrungsmittelproduktion oder massive Expansion von Plantagenwirtschaft, verbunden mit exzessiver Landwirtschaft, d.h. massivem Dünger- und Pflanzenschutzmitteleinsatz, könnte dieses Ziel erreicht werden. Monokulturen würden Ökosysteme erheblich verändern und den Lebensraum vieler Lebewesen bedrohen. Sinnvoller ist die Erzeugung von ca. 5% der Primärenergie durch Nutzung der brachliegenden Flächen, die nicht mehr für die Nahrungsmittelproduktion erforderlich sind.

Die Technikfolgenabschätzung der Abteilung für Angewandte Systemanalyse des Forschungszentrums Karlsruhe im Jahr 1993 (Tab. 2) attestiert mittel- und langfristig der energetischen Nutzung

Tab. 1. Wasserstoff aus verschiedenen Energieträgern (Veba 1988)

Energieträger	Produktionskosten (CHF/m ³ Wasserstoff)
Erdgas	0.12
Kohle	0.20
Biomasse	0.25
Wasserkraft	0.28
Kernenergie	0.54
Windenergie	1.15
Photovoltaik	> 3.00

nachwachsender Rohstoffe mengenmäßig die grösste Bedeutung. Obwohl flüssige Energieträger (Pflanzenöle, 'Bio'-Ethanol) mit konventionellen Energietechnologien kompatibel sind und dort ohne aufwendige Neuentwicklungen eingeführt werden könnten, bestehen kaum Realisierungschancen, die notwendigen Mengen ohne katastrophale Auswirkungen auf Umwelt und Volkswirtschaft bereitzustellen. Besonders hervorzuheben ist der hohe Subventions- und Energiebedarf bei den flüssigen Energieträgern bei gleichzeitig minimaler Verminderung der Kohlendioxid-Emissionen. Nach Tab. 2 wird rund die Hälfte der erzeugten Energie für die Herstellung der Flüssigtreibstoffe verbraucht!

Ertragsstarke Pflanzen, z.B. das speziell als Industrie- und Energiepflanze gezüchtete Chinaschilf (*Miscanthus sinensis giganteus*) – nehmen in der Karlsruher Studie eine Spitzenstellung ein. Im Vergleich zu Getreideganzpflanzen wie Stroh – Restmaterial des Getreideanbaus – bietet Chinaschilf jedoch keine herausragenden Vorteile. Nach mehrjährigem Versuchs-anbau blieben ohne aufwendige Bewässe-

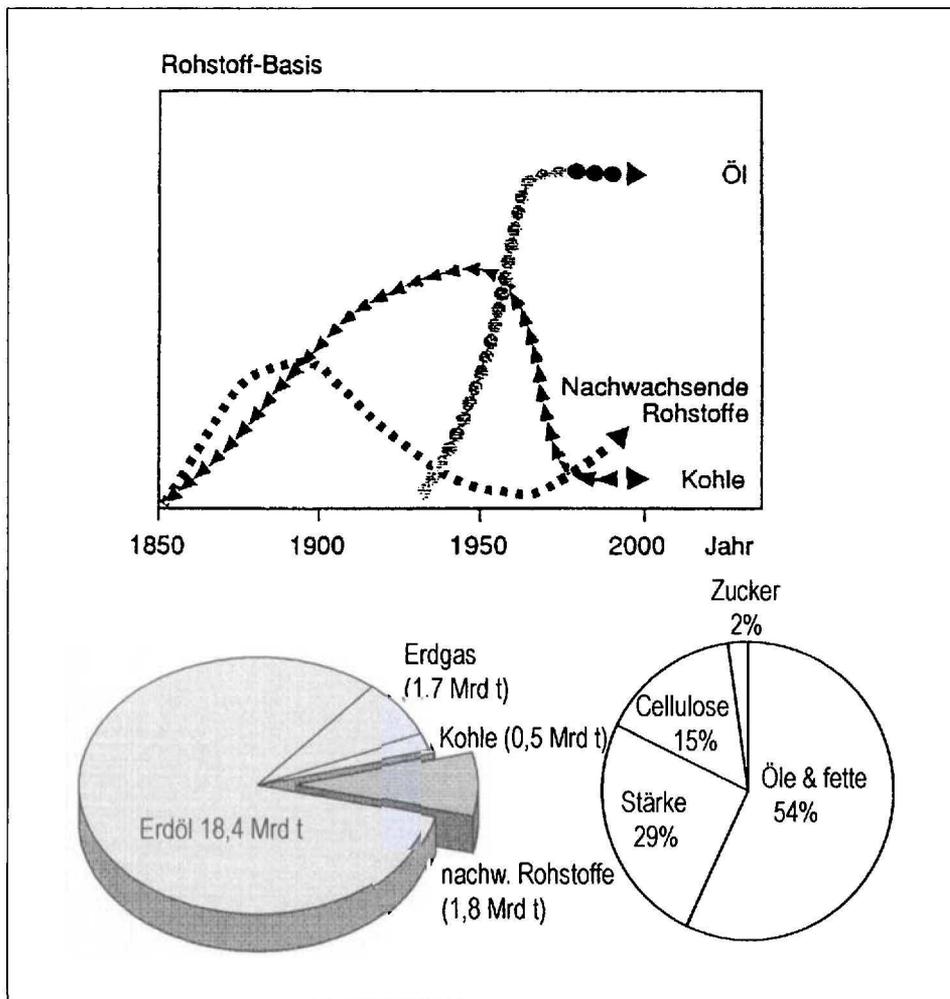


Fig. 5. Rohstoffe für die chemische Industrie am Beispiel Deutschland

Tab. 2. Energieertrag, Energieaufwand und Kohlendioxid-Minderung bei der Nutzung von festen und flüssigen Energieträgern auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Energieträger	Energieertrag [MWh/ha]	Energieaufwand (in % vom Ertrag)	Netto-CO ₂ -Minderung (t CO ₂ /ha)
Stroh-Pellets			
Kohleanlage	28	11.0	8.8
Methanol/H ₂	28	11.0	2.7
Hackschnitzel			
Kohleanlage	48	4.4	15.0
Chinaschiff			
Kohleanlage	93	14.1	26.9
Weizen			
Kohleanlage	25	15.9	7.2
Ethanol	14	89.6	1.6
Zuckerrüben			
Ethanol	33	70.2	4.2
Rapsöl			
Heizöl	12	37.2	1.9-2.2
Biodiesel	12	47.0	1.9

1 MWh entspricht rund 100l Heizöl und 283 kg Kohlendioxid (CO₂), zum Vergleich (BUWAL 1990/91): Prozessenergiebedarf bei Verwendung von Diesel/Heizöl: 10%, Steinkohle 9%, Braunkohle 6%, Erdgas 10%. Quelle: Dr. L. Leible, 'Technikfolgenabschätzung nachwachsende Rohstoffe - Zielsetzung, Vorgehensweise, Bewertung', in 3. Symposium 'Nachwachsende Rohstoffe - Perspektiven für die Chemie', Landwirtschaftsverlag, Münster, 1994, S. 40-55.

nung und Düngung die Ertragswerte deutlich hinter den Erwartungen zurück, so dass die hohen Werte in Tab. 2 heute wohl nach unten zu korrigieren sind.

Ein Beispiel für enttäuschte Erwartungen ist der als 'Biodiesel' bekannt gewordene Rapsölmethylester. Biodiesel wird aus Raps gewonnen, indem Rapsöl durch Reaktion mit Methanol in Rapsmethylester gespalten wird. Als Nebenprodukte werden Rapsschrot und Glycerin gebildet. Um für den Treibstoffbedarf relevante Mengen zu liefern, müssten weit über 20% der Landwirtschaft auf Rapsmonokulturen umgestellt werden. Bei kleinen Mengen von 20 bis 50 000 t/Jahr sind Rückwirkungen auf den Glycerinmarkt und den Raps- bzw. Sojaschrotmarkt vernachlässigbar. Ab 0.5 Mio. t Rapsmethylester pro Jahr kann Glycerin jedoch im herkömmlichen Markt keine Verwendung mehr finden. Verbleibende Einsatzmöglichkeit für Glycerin ist der Futtermittelmarkt, der jedoch deutlich geringere Erträge bringt und zum Wegfall der Stillungsprämien führen würde. Das anfallende Rapsschrot konkurriert mit Sojaschrot und führt zu Konflikten in der EU, wo nach den GATT-Regelungen nur eine zusätzliche Rapschrotmenge von 1 Mio. t/Jahr im 'Non-Food' Bereich zugestanden wird. Die viel beachtete und kritisierte Studie des Umweltbundesamtes in Berlin, weist zudem darauf hin, dass verstärkte Düngung erforderlich wird und zu erheblichen Emissionen von Distickstoffmonoxid ('Lachgas') führt, das als Treibhausgas um drei Größenordnungen wirksamer sein soll als Kohlendioxid. Ähnlich unvorteilhaft sind die Aussichten von Bioethanol-Treibstoff, wo die Herstellung fast soviel Energie verschlingt, wie Bioethanol als Treibstoff freisetzen kann. Vergleicht man Flächenertrag, Energieertrag und Netto-Kohlendioxid-Minderung in der Karlsruher Studie, so erkennt man, dass Rapsöl auch als Erdölersatz in der Raffinerie weitgehend ungeeignet ist, da auch hier erhebliche Energiemengen bei der Aufbereitung konsumiert werden. Bei der Verwertung von Rapsschrot in Kohlekraftwerken erzielt man deutlich bessere Energieerträge und Kohlendioxid-Verminderungen. Deshalb ist die Festbrennstoffverwertung nachwachsender Rohstoffe in modifizierten Heizkraftwerken, gebündelt mit Fernwärmegewinnung, besser als 'Biodiesel' geeignet, nachwachsende Rohstoffe wie z.B. Holz und Stroh energetisch zu verwerten.

Besonderes Zukunftspotential weist die Verwertung biologischer Abfallprodukte aus der Landwirtschaft auf. So werden in einer kürzlich in Värnamo (Schweden) in betrieb genommenen Anlage, Holzspäne

vergast, um Turbinen anzutreiben, Strom zu gewinnen und durch anschliessende Verbrennung Wärme zu erzeugen. Der Wirkungsgrad dieser Anlage wird mit 80% veranschlagt und liefert heute 6 MW Strom und 9 MW Fernwärme. Seit 1993 erzeugt ein Kraftwerk in Schkölen/Thüringen Strom aus Stroh. Im Dezember 1995 ging das erste Biomassekraftwerk der Schweiz, das mit erneuerbaren Energieträgern aus der Forst und Landwirtschaft beheizt wird, im Baselbieter Ormalingen ans Netz. Im Unterschied zu konventionellen Holz-schnitzelkraftwerken, kann dieses Kraftwerk auch mit Chinaschilf oder Stroh geheizt werden.

3. Agrarische Rohstoffe für die Chemie

Seit Menschengedenken setzt der Mensch nachwachsende Rohstoffe auch für die Herstellung von chemischen Produkten ein. So finden sich bereits vor über 4000 Jahren in Babylon Schriften, wo die Herstellung von Seifen aus Pottasche und Pflanzenölen für Kosmetika beschrieben sind. Diese Rezepturen der 'Seifensiederei' sind bis heute wichtige Grundlagen von Waschmittel und Kosmetik geblieben. Bekannt ist auch der Einsatz von Pflanzenölen, z.B. von Leinsamenöl, als lufttrocknende Lacke ('Firniss') in der Lacktechnik.

In den letzten zehn Jahren hat sich der Einsatz nachwachsender Rohstoffe in der deutschen Industrie mit 1.8 Mio. t/Jahr – das sind rund 14% des Gesamtbedarfs und über 20% bezogen auf die Wertschöpfung – nahezu verdoppelt. Obwohl Erdöl und Erdgas noch immer dominieren, konnten die nachwachsenden Rohstoffe Kohle überholen (Fig. 5). Diese Trendumkehr wurde durch das Energietrauma der Ölkrisen in den siebziger Jahren ausgelöst.

Für die Nutzung als Chemierohstoffe sind Heil- und Gewürzpflanzen, Pflanzenfasern und Zucker nur von zweitrangiger Bedeutung, obwohl die Anwendungen im Bereich der Pharmazie hohe Wertschöpfungen aufweisen. Mengenmässig interessant sind in Deutschland mit 900 000 t/Jahr pflanzliche Öle und Fette für die Chemie sowie 480 000 t Stärke als Hilfsstoff für die Papierindustrie, bei der Brikettierung von Braunkohle und als Nahrungsquelle für Mikroorganismen in biotechnologischen Verfahren (Tab. 3).

Mit über 900 000 t/Jahr nehmen die Pflanzenöle traditionell in Deutschland die Spitzenstellung unter den Chemierohstoffen auf der Basis nachwachsender Rohstoffe ein. Weltweit werden über 80 Mio. t Fette und Öle eingesetzt. Allein die

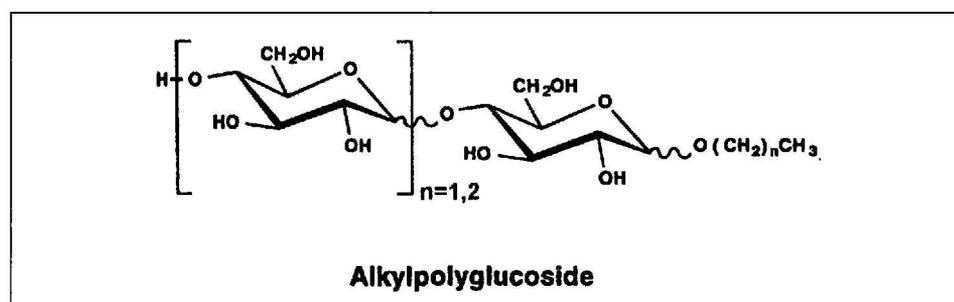
Tab. 3. Nutzung von Industriepflanzen

Rohstoff	Industriepflanzen	Anwendung
Öle und Fette	Raps, Sonnenblumen, Lein, Senf, Rübsen, Crambe, Leindotter, Saflor, Mohn, kreuzblättrige Wolfsmilch	Schmiermittel, Hydrauliköle, Schalöle für Betonbau, Bohrspülflüssigkeiten bei der Erdölförderung, Farben, Lacke, Tenside, Hilfsmittel für Textil- und Lederindustrie, Firnis, Weichmacher, Druckfarben, Kosmetik
Stärke	Mais, Kartoffel, Weizen, Markerbren	Papierindustrie, Gips-Karton-Platten, Tapetenkleister, Holzleime, Verpackungen und Folien, Waschpulver, Waschrrohstoffe, Zahnpasten, Tablettenumhüllung, Vitamin C- und Antibiotika-Herstellung
Zucker	Zuckerrüben, Topinambur, Zichorie, Zuckerhirse	Grundstoff für Biotechnologie (Aminosäuren, Vitamine, Milchsäure, Zitronensäure, usw.)
Arzneistoffe, Gewürze	Arnika, Baldrian, Dill, Fenchel, Kamille, Kerbel, Knoblauch, Pfefferminze, Petersilie, Ringelblume, Salbei, Schnittsellerie, Thymian, Zitronenmelisse	Arzneimittel, Gewürze
Fasern	Faserlein, Hanf, Zellstoff	Langfasern für Textilindustrie (Bekleidung, Bettwäsche, Postsäcke, Textiltapeten, usw.), Kurzfasern für Baustoffe, Faserzementplatten, Pressspanplatten, Papier, Zusatz zu Kunststoffen, Klebstoffen, Zement; Verwendung bei Wärmedämm-Pressplatten, usw.
Farbstoffe	Waid, Saflor, Krapp	Färberei
Zellstoff (Cellulose)	Holz	Papier, Textilfasern, Folien, Zigarettenfilter, Hilfsmittel für Waschmittel, Bergbau, Textilindustrie, Klebstoffe, Zelluloid, Kunsthorn, Golf- und Tischtennisbälle, usw.
Lignin	Holz	Wärmegewinnung, Duroplaste

Schlachthöfe liefern 12.3 Mio. t Talg und Schmalz! Spitzenreiter bei den Pflanzenölen sind Sojaöl mit weltweit 16.5 Mio. t und Palmöl mit 10.8 Mio. t vor erucasäurefreiem Rapsöl und Sonnenblumenöl mit jeweils ca. 8 Mio. t jährlich. Durch Spaltung der Öle können Glycerin und Fettsäuren sowie eine grosse Zahl chemisch abgewandelter Fettsäuren gewonnen werden, die in der Kosmetik und der Waschmittelindustrie eine wichtige Rolle spielen.

Entscheidend für die effiziente industrielle Nutzung pflanzlicher Öle ist das Massschneiden der Fettsäuremuster, d.h.

der Verteilung der verschiedenen Fettsäuren. Während die Lebensmittelindustrie erucasäurefreie Rapsöle bevorzugt, sind erucasäurehaltige und besonders stearinsäure- und hochölsäurehaltige Pflanzenöle für die chemische Industrie von Interesse (Fig. 6). Der weltweite Einsatz von Sonnenblumenöl beträgt heute 30 000 t/Jahr. Durch Erhöhung des Ölsäureanteils könnte die Einsatzmenge leicht auf über 130 000 t/Jahr gesteigert werden. Wie schon in der Nahrungsmittelindustrie, z.B. bei der Herstellung erucasäurearmer Öle, lange praktiziert, gewinnen Züchtung und



Rohstoffe entweder als Energieträger oder als Chemierohstoff eingesetzt werden.

4. Bio-Kunststoffe und Pflanzenfasern

In der Kunststoffindustrie haben nachwachsende Rohstoffe ebenfalls lange Tradition. Im Jahr 1839 gelang es dem amerikanischen Chemiker *Charles Goodyear*, durch Heissvulkanisation aus dem klebrigen Naturgummi, gewonnen aus dem Saft des Gummibaumes, gummielastische Massen herzustellen. Dies war die Basis der Kautschukindustrie. Noch heute liegt der Anteil des Naturkautschuks bei rund 35%. Durch seine besondere Dehnbarkeit und Elastizität ist er für viele Anwendungen – vom Autoreifen bis zu Präservativen – unentbehrlich. Gummiplantagen sind Beispiele für erste konsequente Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Industrie. Auf der Suche nach künstlicher Seide fand man Ende des letzten Jahrhunderts, dass durch chemische Modifizierung des Zellstoffs Verarbeitung zu Formstoffen, Filmen und Fasern möglich wurde. Bekanntes Beispiel für abgewandelte Kohlenhydrate ('Polysaccharide') ist das Celluloid, das aus Nitrocellulose und Campher-Weichmacher besteht. Der explosive Charakter der Nitrocellulose – besser bekannt als Schiessbaumwolle oder rauchloses Schiesspulver – haftete auch diesen ersten Kunststoffen an, die stark brandgefährdet waren und zur Verpuffung neigten. Mit Celluloseacetat und Regenerat-Cellulose konnte schliesslich Kunstseide und besser beständige Filme – bekannt als Cellophan – realisiert werden. Als in den dreissiger Jahren die preisgünstigen und in Eigenschaftsprofilen und Anwendungen wesentlich vielseitigeren Standardkunststoffe PVC, Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol verfügbar wurden, verloren abgewandelte Kohlenhydrate ('Polysaccharide') an Bedeutung.

Ende der achtziger Jahre erwartete man den Aufschwung der Polysaccharide als biologisch abbaubare Kunststoffe. Besonders für den Verpackungsmarkt, wo rund ein Drittel der langlebigen Kunststoffe in kurzlebigen Produkten Verwendung findet und Deponien belastet, wurde Kompostierung als Recyclingmethode der Wahl propagiert. In damaligen Marktanalysen finden sich Prognosen, wonach bioabbaubare Verpackungen rasch mehrere Mio. t Marktvolumen erreichen könnten – besonders im Hinblick auf den Bau von Kompostieranlagen für die Entsorgung des organischen Hausmülls. Aus Stärke wurden durch Zusatz von Weichmachern, z.B. von Glycerin und Sorbitol, schmelzbare und

Tab. 5. Rohstoffrecycling durch Pyrolyse (Hamburger Verfahren)

Stoff	Temperatur [°]	Gas [Gew.-%]	Öl [Gew.-%]	Rückstand [Gew.-%]	andere [Gew.-%]
Polyethylen	760	56	42	2	–
Polypropylen	740	50	49	1	–
Polystyrol	580	10	25	1	64 Styrol
Plexiglas	450	1	1	0.1	98 MMA*)
Altreifen	700	22	22	39	12 Stahl 5 Wasser
Cellulose	700	47	23	19	11 Wasser
Lignin	500	3	30	50	17 Wasser

Bittner (Hrsg.) 'Recycling von Kunststoffen', Hanser Verlag, München, 1992, S. 248; *) MMA: Methylmethacrylat, zurückgewonnener Baustein von Plexiglas.

Tab. 6. Eigenschaften von Pflanzenfasern im Vergleich

Eigenschaften	Sisal	Flachs	E-Glas
Zugfestigkeit [MPa]	610	900	2300
Steifigkeit, Zug-E-Modul [MPa]	28	50	73
Bruchdehnung [%]	2.2	1.8	3.2
Dichte, D [g/cm ³]	1.3	1.5	2.6
spez. Festigkeit (MPa/D)	470	600	880
spez. Steifigkeit (MPa/D)	22	33	28

Quelle: H. Baumgartl, A. Schlarb (BASF AG), 'Naturfaser-verstärkte Verbundwerkstoffe', in 2. Symposium 'Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie', Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 1993.

somit verarbeitbare bioabbaubare Kunststoffe entwickelt. Nach dem Popcorn-Verfahren können Stärke-Schaumstoffe, z.B. für Transportverpackungen, hergestellt werden. Mit biotechnologischen Verfahren wird von *Zeneca*, früher *ICI*, Polyhydroxybuttersäure als neuer bioabbaubarer Thermoplast gewonnen, dessen Produktion heute bereits über 1 000 t/Jahr erreicht. Jüngste Entwicklung sind Polymilchsäuren, wo biotechnologisch gewonnene Milchsäure in einem von *ECO-CHEM* in den USA entwickelten Verfahren als Baustein für biologisch abbaubare Kunststoffe genutzt wird. War früher Polymilchsäure für resorbierbare chirurgische Fäden und Implantate nicht unter 1 000.– CHF/kg zu haben, können heute die Preise unter CHF 10.–/kg abgesenkt werden. Der für die Verpackungsindustrie interessante Preisbereich < CHF 2.–/kg ist heute noch nicht fassbar. Neben dem konkurrenzlos tiefen Preisniveau der Petrochemie macht sich auch der Wandel bei den Recyclingstrategien bemerkbar. 'Schnitffestes Erdöl'

wie Polyethylen und Polypropylen sind wesentlich flexibler bei der werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Wiederverwertung. Betrachtet man das rohstoffliche Recycling (Tab. 5) nach dem Hamburger Verfahren, zeichnen sich die Standardkunststoffe Polyethylen und Polypropylen durch rückstandsfreie Verwertung aus und bieten ökologisch und ökonomisch Vorteile gegenüber kompostierbaren, kostengünstigeren Bio-Kunststoffen. Gegen die leistungsstarken katalytischen Niederdruck-Polymerisationsverfahren der Petrochemie haben biotechnologische Verfahren einen schweren Stand. Zudem ist Bioabbaubarkeit nicht ein Privileg von 'Bio'-Kunststoffen! In den letzten Jahren wurden in der Petrochemie neue Kunststoffe, z.B. Polyesteramide aus Butandiol, Adipinsäure und Caprolactam (BAK1095 der *Bayer AG*) entwickelt, die kompostierbar sind und wesentlich wirtschaftlicher anwendungsspezifisch nach Mass geschneidert werden können. Der Markt für 'Bio'-Kunststoffe ist

ein typischer Nischenmarkt für Spezialprodukte, z.B. Bio-Müllsäcke für das Sammeln des organischen Hausmülls oder kompostierbare Verpackungen für Gartenzubehör.

'Bio'-Kunststoffe werden dort eingesetzt, wo nicht Bioabbaubarkeit, sondern ökonomische Vorteile und Eigenschaftsprofile im Vordergrund stehen. So entwickelt heute die Autoindustrie Pflanzenfaser-verstärkte Kunststoffe als Ersatz für Glasfaser-verstärkte Kunststoffe. Ziel ist nicht ein kompostierbares Auto, das im Sommer von Pilzen und anderen Mikroorganismen befallen und kompostiert wird, sondern der Einsatz von Fasern, die leichter als Glasfasern sind und bei der Verbrennung im Unterschied zum unbrennbaren Glas weniger Rückstände liefern. So kann Flachsglas ohne massive Eigenschaftsverluste ersetzen, obwohl die deutlich geringere Temperaturbeständigkeit den Einsatz beschränkt (vgl. Tab. 6).

Diese Technologie wird zum Beispiel bereits heute von Daimler-Benz im Fahrzeugbau für die Innenverkleidung von Kofferraumdeckeln und Türen im Fahrzeugbau eingesetzt. Problematisch sind erntebedingte Schwankungen der Steifigkeiten von bis zu 50%, die den hohen Qualitätsanforderungen der Werkstoffe entgegenstehen. Interessant sind neben Flachs auch Hanffasern. Der Anbau cannabisarmer Hanfpflanzen eröffnet Möglichkeiten für Anbaualternativen in klimatisch weniger begünstigten Regionen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist kein Allheilmittel für kohlendioxidneutrale Energieerzeugung oder Produktion von Chemierohstoffen und Kunststoffen. Die Regeln der nachhaltigen Entwicklung setzen der Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Mega- und Giga-t-Massstab deutlich Grenzen, da exzessive Landwirtschaft die Regenerationsfähigkeit der Natur überfordern und Ökosysteme durch Monokulturen irreparabel verändern kann. Erneuerbare Ressourcen müssen so genutzt werden, dass die Entnahme nicht grösser als die Regeneration des Bestandes ist. Die Funktionsfähigkeit der Natur darf durch verstärkten Anbau und Nutzung nachwachsender Rohstoffe insgesamt nicht beeinträchtigt werden.

Betrachtet man die Nutzung unter dem Aspekt der Anbaualternativen für die Landwirtschaft im Nicht-Nahrungsmittelbereich mit dem Ziel, ca. 15 bis max. 25% der in der Nahrungsmittelproduktion der EU unrentabel gewordenen Flächen vor der

Brache zu bewahren, dann wird klar, dass diese Flächen nicht ausreichen, Erdöl in der Energiewirtschaft zu 50% zu ersetzen. Nicht neue ertragsstarke Pflanzenzüchtungen, sondern Abfallprodukte der Land- und Holzwirtschaft, z.B. Holzspäne und Stroh, bieten attraktive Chancen, durch Wärme-Strom-Kopplung Strom und Fernwärme zu erzeugen. Nach Schätzungen liessen sich so mittelfristig ca. 5% der Primärenergie gewinnen. Das Einsparpotential an Kohlendioxidemissionen liegt in Deutschland bei rund 20 Mio. t/Jahr – das sind ca. 2% der deutschen Gesamtemissionen von 1 Mrd. t Kohlendioxid. Die Verbrennung von Biomasse zusammen mit organischen, gemischten Siedlungsabfällen, die für Kompostierung ungeeignet sind, bietet sich an, um aus Biomassereststoffen Fernwärme und Strom zu erzeugen.

In Zukunft werden Chemierohstoffe besonders wichtige Einsatzfelder für nachwachsende Rohstoffe, insbesondere Pflanzenöle und Stärke, bleiben. Bei den Kunststoffen können 'Bio'-Kunststoffe profitable Nischenmärkte, z.B. für Biomüllsäcke, bedienen. Nachwachsende Rohstoffe werden die Petrochemie sinnvoll ergänzen, unterliegen aber im direkten Konkurrenzkampf. Gen- und Biotechnologie sind hier von zentraler Bedeutung, um pflanzliche Zellen als Chemiereaktoren für die Herstellung von Rohstoffen und Feinchemikalien zu nutzen. Wer ja sagt zur verstärkten Nutzung nachwachsender Rohstoffe, kann nicht Gen- und Biotechnologie ablehnen. Entscheidend für den sinnvollen Einsatz nachwachsender Rohstoffe sind verbesserte Anbau- und Aufbereitungsverfahren, um erntebedingte Qualitätsschwankungen der nachwachsenden Rohstoffe zu vermindern. Gefordert sind Innovationen und innovative Produkte durch Zusammenwirken von Landwirtschaft, Chemie und Biotechnologie.

Eingegangen am 5. Februar 1996

[1] Fritz Vorholz, 'Die letzte Party', DIE ZEIT, Nr. 42, 13. Oktober 1995, S. 25.
 [2] Fritz Vorholz, 'Das rechte Mass', DIE ZEIT, Nr. 42, 13. Oktober 1995, S. 28.
 [3] Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft Sonderheft '3. Symposium Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie', Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 1994.
 [4] Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Reihe A: Angewandte Wissenschaft Son-

derheft '2. Symposium Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie', Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster, 1993.
 [5] H. Koch, H. Röper, 'New Industrial Products from Starch', *Starch/Stärke* 1988, 40, 121.
 [6] H. Röper, H. Koch, 'New Carbohydrate Derivatives from Biotechnical and Chemical Processes', *Starch/Stärke* 1988, 40, 453.
 [7] W. Hoagland, 'Sonnenenergie', *Spektrum der Wissenschaften*, Sonderband 4 'Schlüsseltechnologien im 21. Jahrhundert', November 1995.
 [8] M. Eggersdorfer, S. Warwel, G. Wulff, 'Nachwachsende Rohstoffe – Perspektiven für die Chemie', Verlag Chemie, Weinheim, 1993.
 [9] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gültzow, 'Nachwachsende Rohstoffe – Spitzentechnologie ohne Ende'.
 [10] Centrale Marketing-Gesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft m.b.H. (CMA), Bonn, 'Nachwachsende Rohstoffe'.
 [11] M. Heil, Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID), 'Nachwachsende Rohstoffe und ihre Verwertung', Bonn, 1992.
 [12] M. Eggersdorfer, 'Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in Energiewirtschaft und Chemie', *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 1994, S. 96.
 [13] D. Werner, E. Köhler, 'Pflanzenfasern im Verbund – das Beispiel Chinaschilf', *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 1994, S. 102.
 [14] W. Vorwerk, F. Loth, 'Stärke und Cellulose für neue Anwendungen', *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 1994, S. 107.
 [15] K. Hill, M. Weuthen, 'Alkylglucoside – Tenside aus Zucker und Pflanzenöl', *Spektrum der Wissenschaft*, Juni 1994, S. 113.
 [16] J. Kalbe, R. Koch, 'Kriterien für biologisch abbaubare Kunststoffe', *Spektrum der Wissenschaft*, Februar 1995, S. 78.
 [17] G. Niederstadt, A.S. Herrmann, H. Hanselka, 'Faserverbundwerkstoffe – nach Gebrauch auf den Kompost', *Spektrum der Wissenschaft*, Februar 1995, S. 87.
 [18] G. Menges, W. Michaeli, M. Bittner, 'Recycling von Kunststoffen', Carl Hanser Verlag, München, 1992.
 [19] Verband der Kunststoffherstellenden Industrie e.V. (VKE), 'Kunststoff kann man wiederverwerten', Frankfurt, 1995.
 [20] H. Eierdanz, Ed., 'Perspektiven nachwachsender Rohstoffe', Verlag Chemie, Weinheim, 1996.