Fraunhofer Institut
Systemtechnik und
Innovationsforschung

Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

- Polyhydroxybutyrat- und Stärkekunststoffe - Abschätzungen zum kumulierten Energieaufwand und zu CO_2-Emissionen

erarbeitet im Rahmen einer
Seminararbeit von
cand. chem. ing. Nicole Kopf

am Engler-Bunte-Institut
Bereich Gas, Erdöl und Kohle
Universität Karlsruhe (TH),
Prof. Dr.-Ing. G. Schaub

erstellt am FhG-ISI
Dipl.-Ing. M. Patel (Betreuer)
D-76139 Karlsruhe, Breslauer Str. 48

Februar 1999

Inhaltsverzeichnis

Seite

Abbildungsverzeichnis I

Tabellenverzeichnis II

1. Einleitung 1

2. Zielsetzung und Vorgehensweise 3

3. Überblick über Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen 4

4. Detailrecherche 15

4.1. Polyhydroxybutyrat/-valerat 15

4.1.1. Materialeigenschaften 15

4.1.2. Polymerisationsprozeß 16

4.1.3. Prozeßkettenvergleich 20

4.2 Stärkekunststoffe 26

4.2.1 Materialeigenschaften 26

4.2.2 Aufbau der Prozeßkette 27

4.2.3 Daten der Prozeßstufen 29

4.2.4 Vergleich über den Lebenszyklus 31

4.3 Schlußfolgerungen 37

5. Zusammenfassung 39

Literaturverzeichnis 41

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1.1: Zusammenhang zwischen biologischer Abbaubarkeit von Polymeren und der Herkunft der eingesetzten Rohstoffe 2

Abbildung 3.1: Strukturformel von Polyhydroxybutyrat/-valerat 5

Abbildung 3.2: Polykondensation/ Ringöffnungspolymerisation zu Polylactid 6

Abbildung 3.3: Strukturformel von Pullulan 7

Abbildung 3.4: Strukturformel von Chitosan 9

Abbildung 4.1: Produktionsschema der Firma Biomer 18

Abbildung 4.2: Produktionsschema der Firma Zeneca 19

Abbildung 4.3: Entwicklung des energetischen Verbrauchs bei der Produktion von PHB 22

Abbildung 4.4: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung von ausgewählten Stärkekunststoffen und PE 34

Abbildung 4.5: CO_2-Emissionen für ausgewählte Stärkekunststoffe und PE 34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Die ersten Kunststoffe - hergestellt aus NR 4
Tabelle 3.2: Rohstoffbasis und Abbaubarkeit von Polymeren aus NR 5
Tabelle 3.3: Übersicht 11
Tabelle 4.1: Materialeigenschaften im Vergleich 16
Tabelle 4.2: Änderung der Eigenschaften durch HV-Anteile 16
Tabelle 4.3: Prozeßvarianten 17
Tabelle 4.4: Benötigte Mengen an Rohstoffen zur Herstellung 1 t PHB 21
Tabelle 4.5: Energiebedarf für die Gesamtproduktion von 1 kg PHB 21
Tabelle 4.6: Energieverbrauch zur Herstellung von PE 24
Tabelle 4.7: Vergleich von extrudierten Stärken mit geschäumtem Polystyrol 26
Tabelle 4.8: Typische Filmeigenschaften und Anwendungsparameter von Mater-Bi-Produkten der Z-Klasse 27
Tabelle 4.9: Benötigte Mengen an Rohstoffen zur Herstellung 1 t TPS 29
Tabelle 4.10: Kumulierter Energieaufwand für die Stärkeherstellung 30
Tabelle 4.11: Verbrauch fossiler Energieträger und Treibhauspotential für die Herstellung von 1t TPS 30
Tabelle 4.12: Umweltbelastung bei der Herstellung von 1t PE 31
Tabelle 4.13: Aufwand an elektrischer Energie für Herstellung 31
Tabelle 4.14: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der ausgewählten Kunststoffe in Abhängigkeit vom Anteil fossiler Rohstoffe 32
Tabelle 4.15: Kumulierte fossile CO_2-Emissionen in Abhängigkeit vom Anteil fossiler Rohstoffe 35

1. Einleitung

Die Umweltkonferenz von Rio 1992 hat den Begriff des "Sustainable Development" zum internationalen Leitbild des ausgehenden 20. und des beginnenden 21. Jahrhunderts werden lassen. Die Maxime des "nachhaltigen zukunftsfähigen Handelns" lautet: "Wir müssen heute so handeln, daß die Bedürfnisse der heute lebenden Menschen befriedigt werden können, ohne die Entwicklungsoptionen zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen" *(UMBACH).* Diesem Leitbild widerspricht gegenwärtig der hohe Verbrauch an fossilen Rohstoffen und dem damit verbundenen hohen Ausstoß an CO_2 *(SIEMANN).* Da CO_2 fossilen Ursprungs mit großer Wahrscheinlichkeit wesentlich zum Klimawandel beiträgt, sind bei konsequenter Verfolgung des Vorsorgeprinzips neue Lösungen dringend erforderlich. Eine Alternative zum Einsatz fossiler Rohstoffe bieten nachwachsende Rohstoffe (NR). Sie geben bei ihrer Entsorgung nur die Menge an CO_2 frei, die zuvor bei ihrem Wachstum aufgenommen wurde. Unter nachwachsenden Rohstoffen versteht man aus land- und forstwirtschaftlicher Erzeugung gewonnene Pflanzen oder Pflanzenteile, die nicht Ernährungs- oder Futtermittelzwecken dienen *(GIERNAPP).*

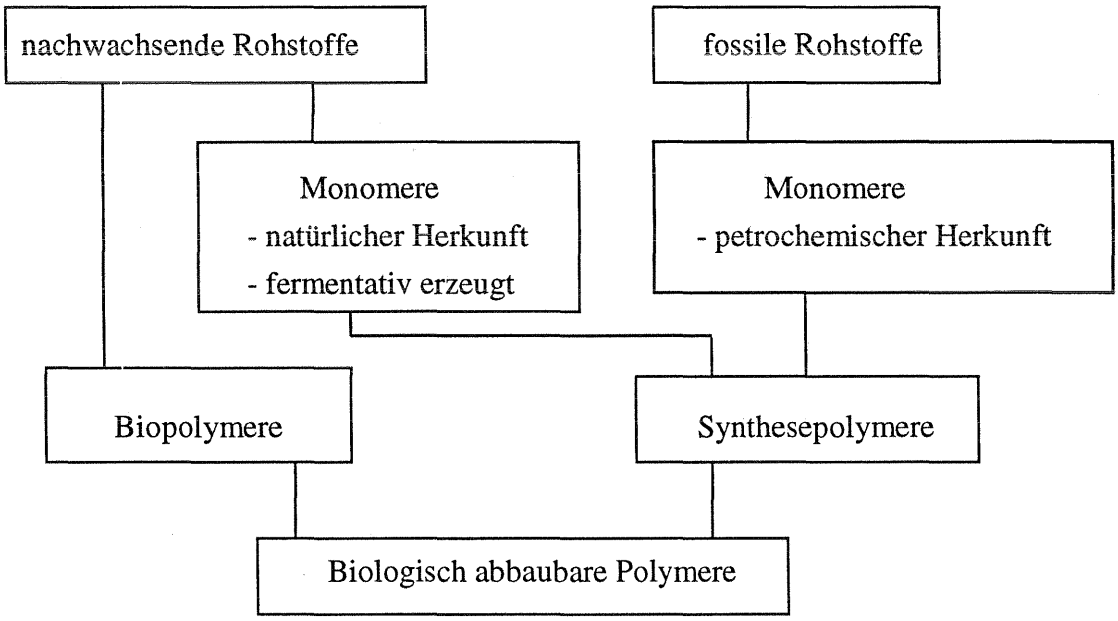
Der Einsatz nachwachsender Rohstoffe ist keine neue Erfindung. Schon lange ist das chemische Wissen über den Einsatz nachwachsender Rohstoffe Bestandteil von Kultur und Technik *(UMBACH).* In vielen Bereichen jedoch wurden Produkte aus nachwachsenden Rohstoffen vollständig oder zu erheblichen Anteilen durch Produkte aus fossilen Rohstoffen verdrängt. Durch wachsendes Umweltbewußtsein, effizientere Produktionsverfahren und bisher ungenutzte und z.T. unbekannte Produkteigenschaften gelangen chemische Erzeugnisse aus nachwachsenden Rohstoffe wieder auf den Markt. Beispiele hierfür sind Schmiermittel, Waschmittel oder Kunststoffe auf natürlicher Rohstoffbasis. Diese Arbeit untersucht den letztgenannten Produktbereich, d.h. die **Herstellung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen**.

Als weiteres wichtiges Motiv für die FuE[1]-Bemühungen, Alternativen zu konventionellen Kunststoffen zu finden, ist das Aufkommen an Abfällen und ihre Bewirtschaftung zu nennen. So standen in Deutschland im Jahre 1995 etwa 3 Millionen Tonnen Kunststoffabfälle zur Verwertung und Entsorgung an *(SARTORIUS),* wobei dieses Gesamtaufkommen in Zukunft

[1] Forschung und Entwicklung

deutlich zunehmen wird. Kunststoffverpackungsabfälle machen gewichtsmäßig zwar nur 7% des Abfallstroms aus, nehmen volumenmäßig aber einen Anteil von 20 bis 30% ein *(GRUPPE)*. Durch diesen Problemdruck wurde die Entwicklung von Kunststoffen vorangetrieben, die biologisch abbaubar sind, d.h. vollständig in CO_2, H_2O, CH_4 und Biomasse zersetzt werden. Wie Abbildung 1.1 zeigt, können diese sowohl aus nachwachsenden als auch aus fossilen, i.d.R. petrochemischen Rohstoffen, hergestellt werden. Die Herkunft der Rohstoffe steht folglich in keinem Zusammenhang mit der Bioabbaubarkeit. In dieser Arbeit steht nicht die Bioabbaubarkeit im Vordergrund.

Abbildung 1.1: Zusammenhang zwischen biologischer Abbaubarkeit von Polymeren und der Herkunft der eingesetzten Rohstoffe *(KI)*



2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel des ersten Teils dieser Seminararbeit (Kapitel 3) ist es, einen Überblick zu den wichtigsten Typen von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen zu liefern. Hierzu wurde im Rahmen eines Literaturstudiums Informations- und Datenmaterial über nachwachsende Rohstoffe gesammelt. Aus diesen Materialien wurden dann Begriffsdefinitionen und die Informationen über Kunststoffe aus NR - vor allem Informationen über Herstellverfahren, Charakteristika sowie Anwendungsfelder und Markt- und Entwicklungsperspektiven- extrahiert. Die Quellenauswahl ist im Literaturverzeichnis zu finden. Weitere Informationen zu neuartigen Kunststoffen und neuen Informationsquellen wurden über telefonische und schriftliche Korrespondenz mit Experten aus Industrie und Forschung beschafft. Anschließend wurden diese Informationen zusammengefaßt.

Für den zweiten Teil dieser Seminararbeit (Kapitel 4) wurden mit den Polyhydroxyfettsäuren und den Stärkekunststoffen zwei Kunststofftypen ausgewählt, denen aussichtsreiche Chancen auf dem Kunststoffmarkt vorausgesagt werden. Zu diesen beiden Kunststoffe wurde über ein erneutes Literaturstudium detailliertes Material gesammelt und ausgewertet. Durch zusätzliche Gespräche mit den Autoren und mit Experten aus der Industrie wurde versucht, Widersprüche auszuräumen und die Daten einer kritischen Bewertung zu unterziehen. Beide Kunststoffe wurden bezüglich des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen mit einem Kunststoff auf fossiler Basis verglichen. Hierbei wurde der gesamte Lebenszyklus, angefangen vom Anbau der nachwachsenden Rohstoffe bzw. der Gewinnung und Raffination des Rohöls bis hin zur Entsorgung, betrachtet. Ziel dieses Vergleiches ist es, eine ökologische Positionierung der verschiedenen Materialien vorzunehmen.

3. Überblick über Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Bis zum Jahr 1930 wurden Kunststoffe ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt (siehe Tab. 3.1). Ausgehend von dieser Tatsache mag es verwundern, daß trotz Überproduktion im Agrarbereich der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen in der chemischen Industrie recht gering ist. Bei der Produktion von Polymeren (ohne Gummi und Kautschuk) liegt dieser heute bei nur ungefähr 5% *(WULFF)*. Grund für diese Tatsache ist nicht nur der höhere Preis gegenüber vollsynthetischen Kunststoffen, sondern auch der aktuelle Forschungsstand. So war die Forschung lange Zeit ausschließlich auf vollsynthetische Kunststoffe ausgerichtet, während Polymere aus nachwachsenden Kunststoffen vernachlässigt wurden.

Tabelle 3.1: Die ersten Kunststoffe - hergestellt aus NR *(WULFF)*

Polymer	Rohstoff	Jahr
Weichgummi	Naturkautschuk	1839
Celluloid	Cellulose	1865
Galalith	Casein	1897
Bakelit	Phenol-Formaldehydharz	1910
Polystyrol	Storax[1)]	1930

[1)] aus *(BECKER)*

Hinsichtlich der Rahmenbedingungen hat sich jedoch in den letzten Jahren einiges zugunsten der NR geändert. Nachwachsende Rohstoffe werden sowohl in Blends, d.h. als Füllstoffe in konventionellen Kunstoffen, als auch als Verstärkungsfasern in Verbundwerkstoffen eingesetzt. Außerdem werden nachwachsende Rohstoffe zur Herstellung der in Tabelle 3.2 aufgelisteten plastischen Polymeren eingesetzt. Wegen des höheren Einsatzpotentials für NR beschränkt sich diese Arbeit auf diese plastischen Polymere. Die elf untersuchten Materialien stellen eine Auswahl der zur Zeit am meisten diskutierten Kunststoffe aus NR dar. Für diese Auswahl liefert Tabelle 3.3 am Ende dieses Kapitels einen Überblick zu den Rohstoffen, den Charakteristika, der Verarbeitung und den Märkten.

Tabelle 3.2: Rohstoffbasis und Abbaubarkeit von plastischen Polymeren aus NR

	Polymer	Rohstoff		Abbaubarkeit	
		fossil	nicht fossil	Ja	Nein
1.)	Polyhydroxyfettsäuren (PHF)	x	x	x	
2.)	Polylactid (PLA)	x	x	x	
3.)	Pullulan		x	x	
4.)	Thermoplastische Stärke (TPS)		x	x[1)]	
5.)	Geschäumte Stärke		x	x	
6.)	Zellglas		x	x	
7.)	Celluloseacetat		x	x[2)]	
8.)	Cellulosenitrat		x		x[3)]
9.)	Chitosan		x	x	
10.)	Fasal		x	[4)]	[4)]
11.)	Polyurethane	x	x		x

1) auch in Kombination mit Einsatzstoffen, die aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden und entweder bioabbaubar (z.B. Polycaprolacton) oder nicht abbaubar (z.B. PE) sind.

2) Eine Folie mit einer Dicke von 250 µm wird laut Hersteller in 12-18 Monaten vollständig abgebaut.

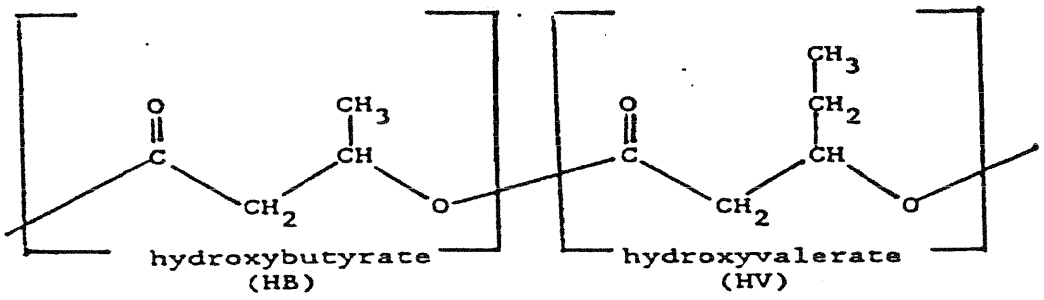
3) Cellulosenitrat wird durch Mikroorganismen nicht angegriffen. Der durch Hydrolyse zugängliche Stickstoff wird aber aufgenommen. Die Hydrolysereaktion wird durch Pilze verstärkt. Es ist jedoch sehr wenig über die biologische Abbaubarkeit von Cellulosenitrat bekannt.

4) keine Angaben zum Abbauverhalten.

3.1 Polyhydroxyfettsäuren (PHF)

Polyhydroxyfettsäuren sind auf fermentativen Wege gewinnbare hochmolekulare thermoplastische Polymere. Die bekanntesten Vertreter sind Polyhydroxybutyrat (PHB) und Polyhydroxyvalerat (PHV).

Abbildung 3.1: Strukturformel von Polyhydroxybutyrat/-valerat *(LUZIER)*

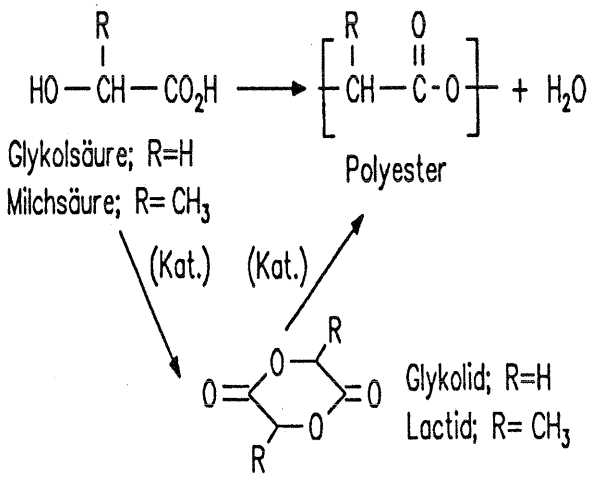


PHB bzw. Polyhydroxyfettsäuren werden in Mikroorganismen als Reservestoffe gespeichert *(RÖMPP)*. Das Biopolymer wird durch Extraktion aus den bakteriellen Zellen gewonnen *(UTZ)*. Abhängig von der Bakterienart und der Wahl der Substratgrundlage läßt sich eine Vielzahl unterschiedlicher Kunststoffe erzeugen. Angesichts dieser Variationsbreite wird auf die weiterführende Literatur verwiesen *(UTZ; FRITZ, LUCK)*. Auf die bekanntesten Vertreter der Polyhydroxyfettsäuren wird in Kapitel 4.1 genauer eingegangen.

3.2 Polylactid (PLA)

Polylactid (Polymilchsäure, PLA) ist ein Polyester auf Basis der Milchsäure. Polylactid kann durch Polykondensation der Milchsäure *(FRITZ)* oder durch Ringöffnungspolymerisation von Milchsäurelactid hergestellt werden *(RÖMPP)*.

Abbildung 3.2: Polykondensation/ Ringöffnungspolymerisation zu Polylactid *(UTZ)*



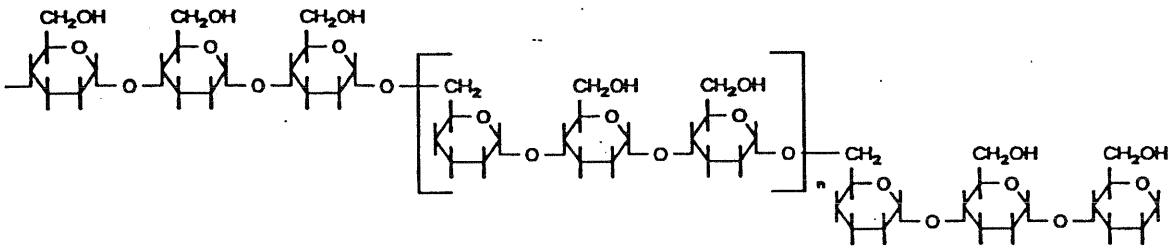
Polylactid kann auf fermentativem Wege aus Zucker oder auch aus Polysaccharidabfällen hergestellt werden, die z.B. bei der Verarbeitung von Kartoffeln oder bei der Käseproduktion anfallen *(UTZ)*. Der Einsatz von Abfallprodukten kann zur Senkung des hohen Preises von Polylactid beitragen *(FRITZ)*. Die mechanischen Eigenschaften der Polymere auf Basis der Milchsäure entsprechen denen konventioneller Thermoplaste. Die Verarbeitung von Polylactid ist durch Extrusion, Schmelzspinnen oder Druckschmelzprozesse möglich, jedoch ist vor der Verarbeitung die Trocknung des Polymers notwendig *(ENTEN)*. Besondere Vor-

züge von Produkten aus Polylactid sind die hohe Festigkeit, Thermoplastizität, biologische Abbaubarkeit und besonders ihre biologische Verträglichkeit, die den Einsatz in der Medizin möglich machen (z.B. für Implantate). Für eine erfolgreiche Polymerisation ist die Reinheit der Ausgangsstoffe von Bedeutung. Dies erweist sich jedoch als großer Nachteil, wenn geringe Kosten verlangt werden. Um Polylactid den Weg als Massenkunststoff zu ebnen, ist vor allem die Verbesserung von Produktionstechnologie und Produktanwendung vonnöten *(UTZ)*. Durch verbesserte Technologie und durch Produktion hinreichend großer Mengen könnten die Preise in die Größenordnung von PHB/PHV gelangen *(ENTEN)*.

3.3 Pullulan

Pullulan entsteht durch Fermentation von Stärke mit dem Pilz Aureobasidium pullulans (früher Pullularia pullulans) und setzt sich aus linearen Ketten von poly-α-1,6-glykosidisch verknüpften D-Maltotriose-Einheiten zusammen *(FRITZ)*. Neben Maltotriosen sind auch Maltotetraosen und α-1,3-Verknüpfungen nachweisbar *(RÖMPP)*.

Abbildung 3.3: Strukturformel von Pullulan *(UTZ)*



Bei der Verarbeitung von Pullulan wird die Pseudoplastizität des Kunststoffs für die Herstellung von Platten und anderen Formkörpern ausgenutzt. Pullulan kann formgepreßt und extrudiert werden *(UTZ)*. Es ist farblos, transparent, besitzt eine Lichtdurchlässigkeit von 95% und hat einen guten Glanz. Für den Einsatz zum Schutz von gefrorenen oder fetthaltigen Lebensmitteln ist Pullulan durch seine Ölbeständigkeit, Sauerstoffundurchlässigkeit und Flexibilität auch bei tiefen Temperaturen geeignet. Weder optische noch mechanische Eigenschaften von Pullulan werden durch Alterung beeinträchtigt *(UTZ; FRITZ; RÖMPP)*.

3.4 Thermoplastische Stärke

Stärke wird in einem Compoundierprozeß zu Granulat - der sogenannten thermoplastischen Stärke (TPS) - umgesetzt. TPS-Granulate lassen sich spritzgießen und eignen sich für die Profilextrusion. Besonders interessant sind maßgeschneiderte Polymere, die durch Reaktion der Stärke mit Copolymeren (Polyalkohole, Polycaprolacton) in der Schmelze entstehen und neue abbaubare Polymerwerkstoffe mit hohem Anteil an nachwachsenden Rohstoffen bilden. Auf thermoplastische Stärke wird in Kapitel 4.2 genauer eingegangen.

3.5 Geschäumte Stärke

Geschäumte Stärke besitzt isolierende und stoßabsorbierende Eigenschaften. Der Stärkeschaum zeichnet sich durch antistatische Eigenschaften aus *(LÖRKS)*. Die Herstellung von dickwandigen Stärkeschäumen erfolgt bevorzugt durch Extrusion. Dieser Schaum wird u.a. als "loose fill" Verpackungschips verwendet. Die Herstellung dünnwandiger und geformter Stärkeschaummaterialien (z.B. Eßschalen) erfolgt im Spritzexpansionsverfahren. Eine weitere Bearbeitung ist durch Verformen, Prägen, Stanzen, Bedrucken und Beschichten möglich. Genauere Angaben für geschäumte Stärke finden sich in Kapitel 4.2.

3.6 Regenerat-Cellulose (Zellglas)

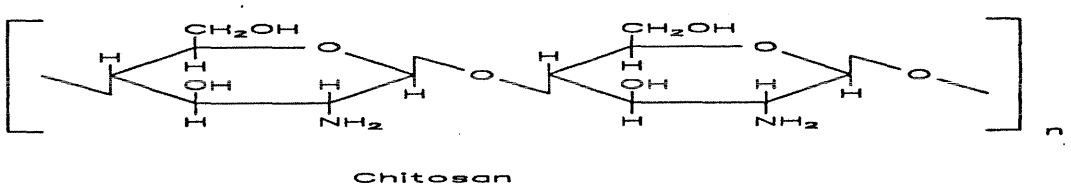
Regenerierte Cellulose ist aus Viskoselösung[2] durch Fällprozesse wiedergewonnene Cellulose. Durch den Fällungsprozeß wird meist schon die Formgebung zu Filmen, Folien oder Fasern bestimmt *(RÖMPP)*.
Das so gewonnene Zellglas zeichnet sich durch hohen Glanz und Klarsicht aus, besitzt einen großen Gebrauchstemperaturbereich und eine große Steifigkeit. Zudem ist Zellglas nicht elektrostatisch aufladbar, wodurch die Verarbeitung auch auf schnellaufenden Verpackungsmaschinen möglich ist *(RÖMPP; ULLMANN)*. Zellglas kann durch vielfältige Bedruckbarkeit und Beschichtungen verschiedenen Ansprüchen angepaßt werden *(ULLMANN)*.
Erdölstämmige Kunststoffe, insbesondere Polypropylen, haben Zellglas zunehmend vom Markt verdrängt.

[2] Als Viskoselösung bezeichnet man Natriumcellulosexanthat, das in wässrigem Ätznatron diespergiert wurde, was zur teilweisen Hydrolyse führt. Xanthat erhält man aus Zellstoff, der nach Tauchen in Natronlauge als Alkalicellulose zerfasert und mit Schwefelkohlenstoff behandelt wird.

3.9 Chitosan

Chitosan ist ein polykationisches Polysaccharid und entsteht durch alkalische Hydrolyse der N-Actylgruppe des Chitins (Deacetylierung). Chitin ist ein hoch acetyliertes Polymer aus β-1,4-glykosidisch verknüpften N-Actyl-D-Glycosamin, das unter anderem als Gerüstsubstanz in Schalentieren, Insekten und in Pilzen vorkommt. Chitosan kommt natürlich in einigen Pilzen vor, der übliche Weg zur Gewinnung ist jedoch die Deacetylierung von Chitin tierischen Ursprungs *(PETER; RÖMPP).*

Abbildung 3.4: Strukturformel von Chitosan *(UTZ)*



Die Verarbeitung des hydrophilen, aber wasserunlöslichen Polymers Chitosan erfolgt durch Gießen. Chitosan-Folien haben gegenüber Celluloseacetatmembranen den Vorteil geringerer Permeabilität gegen Sauerstoff, Stickstoff und Kohlendioxid und bieten sich dadurch als neues, biologisch abbaubares Verpackungsmaterial für Lebensmittel an. Bei der Gewinnung von Chitin fällt auch die Umweltbelastung im Vergleich zur Produktion von Cellulose geringer aus. Als nachwachsender Rohstoff kann Chitosan bezüglich der Rohstoffverfügbarkeit jedoch nicht mit Cellulose und Stärke konkurrieren *(PETER).*

3.10 Fasal

Die Hauptkomponenten dieses thermoplastischen Kunststoffs sind Abfallholz, Mais sowie Naturharze, die bei der Zellstoffproduktion anfallen. Unter Zusatz von geringen Mengen an Verarbeitungsmitteln, die ebenfalls aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden, wird die Mischung zu einem rieselfähigen Produkt compoundiert. Daraus wird auf einem Doppelschneckenextruder ein thermoplastisches Granulat erzeugt. Die Weiterverarbeitung erfolgt auf Spritzgußmaschinen. Fasal besitzt holzähnliche Eigenschaften und kann wie Holz gestaltet

und veredelt werden. Für Fasal liegen die Marktchancen dort, wo die Fertigung aus Holz zu aufwendig ist, oder im Kunststoffbereich, wo gängige Thermoplaste die Qualitätsanforderungen übererfüllen *(KGK; ÖSTERR).*

3.11 Polyurethan

Die chemische Umsetzung von Polyolen mit Diisocyanaten führt in einer Additionsreaktion zur Bildung von Polyurethan *(GARDILL).* In der Polymerchemie wird die Bezeichnung Polyole für Polyalkylenglykole, d.h. höhermolekulare Glykole wie Polyethylenglykole oder Polyetherpolyole verwendet *(RÖMPP).* Als Ausgangsmaterial für Polyole können nachwachsende Rohstoffe eingesetzt werden *(APME).* Aufgrund des Glycerin- und Zuckereinsatzes beträgt der Anteil nachwachsender Rohstoffe in konventionellen Polyolen im europ. Mittel 2-3% und maximal 25% *(APME; GARDILL).* Durch Verwendung von Naturpolyolen anstelle petrochemischer Polyole könnte der Anteil nachwachsender Rohstoffe in Polyurethanen beträchtlich gesteigert werden. Bereits entwickelte Polyole auf Sonnenblumenöl- und Rübenölbasis sollen mit konventionellen Polyolen konkurrenzfähig sein.

Ferner zielen die FuE-Bemühungen darauf ab, auch die Isocyanatkomponente in Polyurethansystemen aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, wodurch im Erfolgsfall ein konkurrenzfähiger Werkstoff erzeugt werden könnte, der ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen bestünde *(GARDILL).* In jüngster Zeit wird auch in diesem Bereich von vielversprechenden Erfolgen berichtet *(EMPE).*

Tabelle 3.3(1)

Nr.	Produkt	Rohstoff	Grundstoff	Prozeßschritte	Prozeßenergie	Kosten
1.)	PHB/V	Stärke Zucker	Glucose Fructose Olivenöl Kokosnußöl Sorbitol Ölsäure Saccarose	Fermentation, Separation, Extraktion, Abtrennung der Zellrückstände, Fällung, Trocknen	el. Energie: 9,4 MJ/kg Produkt	8,50 - 13,00 DM/kg
2.)	Polylactid	Molke Maiszucker	Milchsäure	Fermentation, Polymerisation oder Polykondensation	Herstellung von Milchsäure: el. Energie: 5,4 MJ/kg Dampf: 5,3 t/kg Brennstoff: 6,07 MJ/kg	1000 DM/kg für Medizintechnik 5 DM/kg wird für den Einsatz als Massenkunststoff angestrebt
3.)	Pullulan	Kartoffel Weizen Mais	Stärke	Fermentation		43,- DM/kg (Pulver) 4,30 DM/m³ (Folien)
4.)	Thermoplast. Stärke	Kartoffel Weizen Mais	Stärke	Herstellung handelsüblicher Stärke, Gelatinierung, Extrusions-Compoundierung	el. Energie: 0,8- 2,56 MJ/kg	8,- DM/kg 40,- - 98,- DM/m³
5.)	geschäumte Stärke	Kartoffel	Stärke	Extrusion oder Spritzexpansion, Granulierung, Verpackung	el. Energie: 2,5 MJ/kg	3,- DM/kg
6.)	Zellglas	Holz	Cellulose	analog Viskose-Herstellung	Herstellung von Viskose-spinnfasern: el. Energie: 3,6-5,4 MJ/kg Dampf: 1,2 kg/kg Produkt Kälte: 4 MJ/kg	10,- DM/kg

Tabelle 3.3(2)

Nr.	Weiterverarbeitung	Endprodukte	Märkte Gebiet	Märkte Stand/ Aussichten	Firma	Quelle
1.)	auf herkömmlichen Anlagen verform-, spinn-, extrudier-, blas- und tiefziehbar	Filamente Kapseln Fasern Folien Spritzgußteile	Medizin Gartenbau Verpackungs-bereich	650 t/a weltweit	Zeneca Biomer	*UTZ* *RÖMPP* *FRITZ* *LUCK*
2.)	Verarbeitung mit gängigen thermoplastischen Verarbeitungs-maschinen	Implantate chirurgisches Nahtmaterial Schmelzspinn-fasern Extrusionsfolien bioabbaubare Behälter Windeln	Medizintechnik Agrarbereich Verpackungs-bereich	20 000 t/a (1988) weltweit	Ecochem (Joint Venture von DuPont und ConAgra) Boehringer Neste	*UTZ* *ENTEN* *FRITZ* *BIOMASS* *RÖMPP*
3.)	Extruder Formpresse	Folien Platten	Verpackungs-bereich			*UTZ* *RÖMPP* *FRITZ*
4)	Extruder tiefziehbar blas- und formspritzbar	Abfallbeutel Agrarfolien	Abfallwirtschaft Landwirtschaft		Biotec Novamont 4P Folie Frische Biopac	*UTZ* *FRITZ* *LÖRKS* *TOMKA*
5.)	Waffelbackverfahren	Folien Loose-Fill-Material Trays	Verpackungs-füllstoff		Südstärke Novamont Folag PSP-Papier-schaum Priehs Gümo Storopack	*UTZ* *FRITZ* *LÖRKS*
6.)	Verarbeitung auf gängigen Verpackungs-maschinen	Umhüllungs-material in der Nahrungsmittel- und Tabak-industrie, Folien	Verpackungs-bereich	abnehmende Tendenz		*RÖMPP* *UTZ* *ULLMANN* *FRITZ* *WINNACKER*

Tabelle 3.3(3)

Nr.	Produkt	Rohstoff	Grundstoff	Prozeßschritte	Prozeßenergie	Kosten
7.)	Celluloseacetat	Holz Linters (Baumwolle)	Cellulose	Zerfaserung, Quellen, Veresterung, Erwärmung	Vergleichbar mit Viskose-herstellung	10,- - 40,- DM/kg
8.)	Cellulosenitrat	Linters (Baumwolle)	Cellulose	Salpetersäure/ Schwefelsäure-mischung, Waschen, Stabilisation, Waschen, Pressen		
9.)	Chitosan	Algen Crustaccen Insekten Pilze	Chitin	Deacetylierung des Chitins, Behandlung mit konz. Alkalilauge in Ethanol/ Ethylenglykol		100,- - 300,- DM/kg für Spezial-anwendungen 10,- DM/kg (Rohchitin)
10.)	Fasal	Holz und Mais	Holzschnitzel Maisgries	Mischen, Compoundierung, thermoplastische Weiterverarbeitung		
11.)	Polyurethane	Zuckerrüben Zuckerrohr Fette/ Öle Stärke	Polyole (aus: Glycerin, Saccharose, D-Sorbit)	Polyolherstellung: Anlagerung eines Alkylenoxids unter Alkalikatalyse an die OH-Gruppe des Startermoleküls, Neutralisation, Aufarbeitung	Polyolherstellung: (pro kg Polyetherpolyol) el. Energie: 16,7 MJ Brennstoff: 30,2 MJ andere: 41,0 MJ	

Tabelle 3.3(4)

Nr.	Weiterverarbeitung	Endprodukte	Märkte Gebiet	Märkte Stand/ Aussichten	Firma	Quelle
7.)	tiefzieh-, stanz-, schneid-, schweiß-, bördel-, heißpräg- und metallisierbar	Folien (Zeichen-, Overheadfolien, Sichtfenster) Klebebänder Selbstklebe-etiketten	Verpackungs-bereich graphisches Gewerbe	47 000 t/a (1985) weltweit	Courtaulds (Ultraphan) Rhône Poulenc (Bioceta)	*RÖMPP UTZ ULLMANN FRITZ IKARUS QUANT SIEMANN*
8)		Fotofilme Celluloid Tischtennisbälle Messergriffe	Verpackungs-bereich Werkzeuge	100 000 t/a (1985) weltweit	Wolff Walsrode	*RÖMPP FRITZ ULLMANN UTZ*
9.)	Gießen	Folien (in Verbindung mit Cellulose) Membrane (Blut-Dialyse) Kontaktlinsen Implantate	Medizintechnik soll für Verpackungs-zwecke eingesetzt werden	Produktions-potential wird auf 1000 Mio. t geschätzt	Katokichi Co. Herkules Inc.	*PETER UTZ RÖMPP FRITZ LUCK*
10.)	Schneckenextruder Spritzguß	Möbelhalbzeug Spielwaren Sportartikel Verzierungen technische Teile	Haushalt Bau Spritzguß		IFA Tulln	*KGK ÖSTERR*
11.)		Polstermaterial Stoßstangen Isolierung Skischuhe Auto-Innenver-kleidung	Sportartikel Automobil-industrie Dämmschutz	4,6 Mio t/a (Weltjahres-verbrauch an PUR 1991)		*VORSPOHL APME GARDILL*

4. Detailrecherche

4.1 Polyhydroxybutyrat/-valerat

4.1.1 Materialeigenschaften

Genau wie die Familie der Polyhydroxyfettsäuren selbst eine große Bandbreite unterschiedlicher Polymere zeigt, sind auch die Materialeigenschaften dieser Polymere sehr unterschiedlich.

Am besten untersucht wurde das Homopolymer Polyhydroxybutyrat (PHB). Dieser Werkstoff ist vergleichbar mit PP, jedoch ist PHB spröder und steifer. PHB besitzt kein breites Verarbeitungsfenster. Deshalb muß bei der Verarbeitung darauf geachtet werden, daß die Temperatur nur sehr kurzzeitig und geringfügig über der Schmelztemperatur liegt *(LUCK)*. Die Lösungsmittelresistenz ist bei PHB zwar geringer als bei PP, die Resistenz gegenüber Wasser und Öl kann aber als gut bezeichnet werden. In Säuren und Basen hydrolysiert PHB schnell *(UTZ)*.

Werden Polyhydroxyvalerat-Anteile (PHV) in die Strukturkette des PHB eingeflochten, so wird die Kristallbildung gestört und Eigenschaften wie Sprödigkeit und Steifigkeit von PHB können verbessert werden. Gleichzeitig sinkt die Schmelztemperatur und die Glasübergangstemperatur des Copolymers PHB/V. Es verbessert sich die Elastizität und die Reißdehnbarkeit wird erhöht. So wird aus dem spröden Werkstoff PHB durch Zusatz von Valerat-Anteilen ein Werkstoff, der mit dem zähen elastischen Polyethylen verglichen werden kann.

Als sehr gut kann die Sauerstoffsperrwirkung sowohl des Homopolymers als auch des Copolymers eingestuft werden. Beide Polymere weisen eine hohe Resistenz gegen UV-Strahlung auf, ohne daß wie bei petrochemischen Kunststoffen UV-Stabilisatoren zugesetzt werden müssen *(LUCK)*. In Tabelle 4.1 findet sich eine Auflistung von Materialeigenschaften zum Vergleich von PHB und PHB/V gegenüber PE und PP. Tabelle 4.2 zeigt die Veränderung der Eigenschaften durch steigenden Valerat-Anteil im Polymer.

Tabelle 4.1: Materialeigenschaften im Vergleich *(KOTHUIS)*

Kenngröße	PHB	PHB/V	PP	PE
Schmelztemperatur (°C)	173-180	150	176	102-112
Glasübergangstemperatur (°C)	10	4	-10	-140
Kristallinität (%)	60-80	52-62	50-70	45-50
Zugfestigkeit (MPa)	40	35	38	6.9-16
Biegemodul (GPa)	3,5	1,5	1,7	102-240
Reißdehnung (%)	6	108[1)]	400	100-800
Ultraviolettresistenz	gut		schlecht	
Lösungsmittelresistenz	schlecht		gut	
Sauerstoffdurchläßigkeit ($cm^3m^{-2}at^{-1}d^{-1}$)	45	60[2)] 150-220[1)]	1700	7000

[1)] biaxial gestreckte Folie [2)] Zeneca: HV 5-12%

Tabelle 4.2: Änderung der Eigenschaften durch HV-Anteile *(UTZ)*

Anteil an Valerat im Polymer in %	0	20	30
Schmelztemperatur (°C)	180	165	150
Zugfestigkeit (MPa)	40	25	20
Biegemodul (GPa)	3,5	1,2	0,8
Reißdehnung (%)	8	20	100
Izod-Kerbschlagzähigkeit (J/m)	60	110	350

4.1.2 Polymerisationsprozeß

Polyhydroxyfettsäuren werden von Mikroorganismen produziert, um ihnen als Quelle für Kohlenstoff und Energie zu dienen. Dieser Prozeß ist ungefähr vergleichbar mit der Art, wie

der menschliche Körper Fett für "Notzeiten" speichert *(LUZIER)*. Technisch werden Polyhydroxyfettsäuren in absatzweise betriebenen Fermentationsprozessen hergestellt *(LUCK)*. Wird bei der Fermentation nur ein Substrattyp (z.B. Zucker) eingesetzt, so entsteht in den Mikroorganismen ein Homopolymer, wie z.B. PHB. Wird zusätzlich zum Zucker noch eine organische Säure zugeführt, dann bilden sich Copolymere (z.B. PHB/V).
Für die **Fermentation** von Polyhydroxfettsäuren existieren drei verschiedene Prozeßvarianten, die in Tabelle 4.3 aufgelistet sind.

Tabelle 4.3: Prozeßvarianten *(LUCK)*

Firma	Fermentations-produkt	Mikroorganismus	Substrat
1. BSL Olefinverbund GmbH, Schkopau[1]	PHB	Methylobacterium rhodesianum	Methanol
2. Biomer GmbH Krailling bei München[2]	PHB	Alcaligenes latus	Saccharose (Rohr- bzw. Rübenzucker)
3. Zeneca BioProducts Billingham, England	PHB/V	Alcaligenes euthrophus	Glucose und Propionsäure

[1] ehemals Buna AG
[2] Inhaber des Patents der Biotechnologischen Forschungsgesellschaft BtF, Linz, Österreich

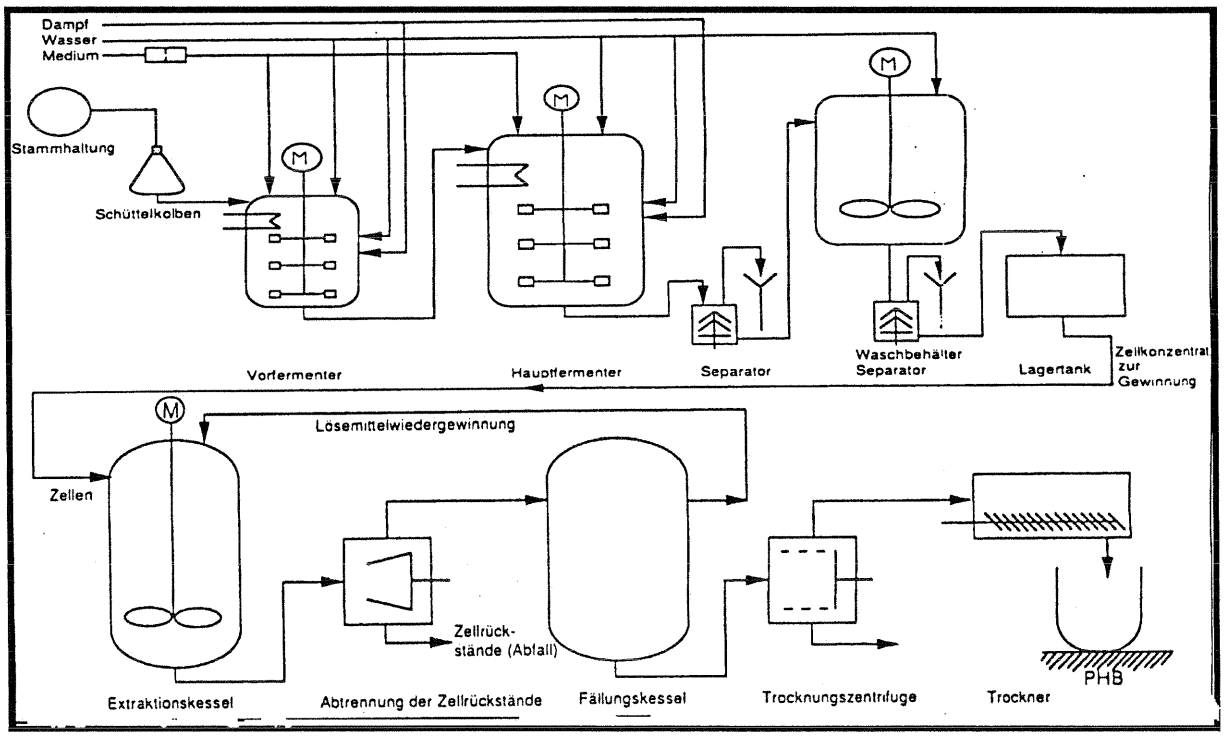
Die Prozesse der ersten beiden Firmen werden im Pilot- bzw. Technikumsmaßstab betrieben. Nur der Zeneca-Prozeß produziert im industriellen Maßstab *(LUCK)*. Abhängig von der Art der Mikroorganismen werden die Prozesse **ein- oder zweistufig** betrieben. Der Biomer-Prozeß wird einstufig durchgeführt, da der Mikroorganismus Alcaligenes latus schon während der Wachstumsphase PHB speichert. Dagegen reichern die in den Prozessen der Firmen BSL und Biomer verwendeten Mikroorganismen Alcaligenes euthropus und Methylobacterium rhodesianum PHB bzw. PHB/V nur unter Mangelbedingungen an, d.h., wenn ein für das Wachstum der Zellen notwendiger Nährstoff (z.B. Stickstoff) fehlt. In diesem Fall ist eine zweistufige Führung des Prozesses notwendig. Die erste Stufe dient dem Wachstum der Zellen. Die zweite Stufe dient dann der Anreicherung des Polymers in den Zellen.

Auch für die **Abtrennung** des Polymers aus der Biomasse existieren **zwei Varianten**. In den Prozeßvarianten der Firmen Biomer und BSL Olefinverbund wird das Polymer durch

Lösungsmittelextraktion[3] aus den Zellen gewonnen. Durch die hohe Selektivität dieses Verfahrens wird eine hohe Produktreinheit erzielt. Es besteht jedoch die Gefahr von Lösungsmittelrückständen *(LUCK)*. Dagegen erfolgt die Produktabtrennung beim Zeneca-Prozeß durch enzymatischen Zellaufschluß mit nachgeschalteter Reinigungsstufe.

Das **Produktionsschema der Firma Biomer** ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Bei diesem Verfahren dient der Vorfermenter nur der kurzzeitigen Anzucht der Mikroorganismen. Nach der Fermentation im Hauptfermenter werden die Zellen in Separatoren abgetrennt und gewaschen. Das so erhaltene Zellkonzentrat wird dem Extraktionskessel zugeführt. Das aus dem Fällungskessel ausgefallene PHB läßt sich durch Zentrifugieren abtrennen. Es wird anschließend getrocknet und granuliert *(UTZ)*.

Abbildung 4.1: Produktionsschema der Firma Biomer *(UTZ)*

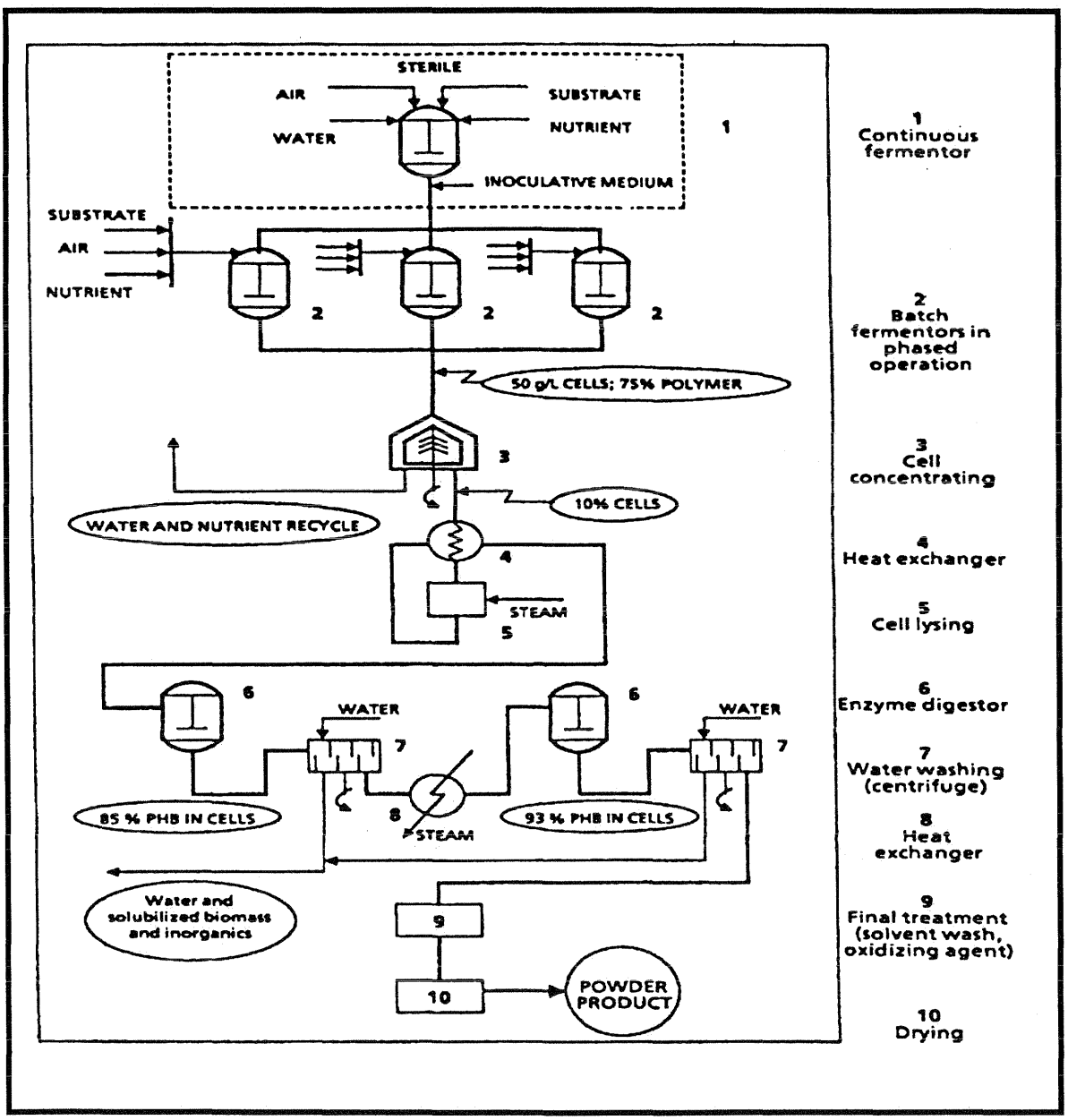


Auch im **Zeneca-Prozeß** (siehe Abbildung 4.2) dient der kontinuierliche Vorfermenter der Anzucht der Zellen. Der Hauptfermenter wird batchweise und in 2 Stufen betrieben. Die Fermentation wird bei einem Zellgehalt an PHB/V von 75% gestoppt *(KOTHUIS)*. Zur Abtrennung des Polymers wird die Biomasse einem Hitzeschock ausgesetzt. Hierdurch

[3] Als Lösungsmittel dienen Methylenchlorid (Biomer-Prozeß) und Essigsäure (BSL-Olefinverbund).

werden die Zellwände aufgebrochen und DNA-Komponenten abgebaut. Der Zusatz von Enzymen führt dazu, daß die Zellwände in Lösung gehen und anschließend weiter abgebaut werden. Das Polymer wird in einer Zentrifuge abgetrennt, und nach einer zusätzlichen Reinigungsstufe erhält man das Polymer als weißes Pulver *(LUCK)*.

Abbildung 4.2: Produktionsschema der Firma Zeneca *(LUCK)*



4.1.3 Prozeßkettenvergleich

Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen stehen in einem direkten Konkurrenzkampf mit konventionellen Kunststoffen. Nicht nur gleiches Aussehen, sondern vor allem die gleichen mechanischen Eigenschaften wie bei konventionellen Kunststoffen werden von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen erwartet. Zusätzlich stellt die Diskussion um Energieeinsparung und Emissionsminderung einen hohen Anspruch an den Produktionsprozeß dieser teilweise neuen Polymere. Auf keinen Fall sollte mehr Energie verbraucht werden, als für die hochentwickelten Produktionsprozesse konventioneller Kunststoffe benötigt wird. Dieser Anspruch ist für die teilweise noch in den Kinderschuhen steckenden oder lange Zeit vernachlässigten Produktionsprozesse vielfach schwer zu erfüllen. Um die Vergleichbarkeit der Energieverbräuche zu gewährleisten, muß eine Bilanz der Energieeinsätze über den gesamten Lebensweg erfolgen. Die später präsentierten Daten (Tabelle 4.5) schließen deshalb die gesamte Prozeßkette inklusive folgender Stufen ein:

- Produktion von Melasse aus Zuckerrüben incl. Anbau der Zuckerrüben;
- Produktion von Glucose aus Stärke incl. Anbau von Saatkartoffeln und Kartoffeln für die industrielle Verwertung und die Stärkeproduktion;
- Produktion von Propionsäure aus Naphtha (incl. Gewinnung und Raffination von Rohöl);
- Produktion von Ammoniumsulfat;
- Tensid-Produktion[4].

Der zum Vergleich dienende Prozeß der Herstellung von PE unterteilt sich in
- Produktion von Naphtha (incl. Gewinnung und Raffination von Rohöl);
- Produktion von Ethylen;
- Polymerisation des Ethylens.

Wie schon erwähnt, lassen sich Polyhydroxyfettsäuren aus einer Vielfalt von Substraten herstellen. Beispielhaft findet sich in Tabelle 4.4 eine Auflistung von Rohstoffen, die für die Herstellung von PHB aus Glucose und Melasse benötigt werden.

4 dient der Auslaugung der Fermentationsbrühe, so daß der Anteil an Nicht-PHB/V-Material auf 3 Gewichts-% sinkt;

Tabelle 4.4: Benötigte Mengen an Rohstoffen zur Herstellung 1 t PHB *(KOTHUIS)*

Rohstoffe	Mengenangabe (t)
Glucose	1,9
Melasse	1,27
Propionsäure	0,13
Ammoniumsulfat	0,35
anionische Tenside	0,03
Enzyme	$6{,}66*10^{-3}$

In Tabelle 4.5 sind die Energieverbräuche für die Gesamtproduktion nach allen vorliegenden Datenquellen aufgelistet.

Tabelle 4.5: Energiebedarf für die Gesamtproduktion von 1 kg PHB

Prozeßstufe	Energieart	KEA_{fossil} in MJ/kg		
		MONSANTO	*LUCK*	*KOTHUIS*
Anbau	Energie[1)]	18[2)]	[3)]	[3)]
Fermentation	el. Energie Dampf	92,6 30,9	66-154	26,9 16,7
Extraktion	el. Energie Dampf	4,9 15,2	[3)]	[3)]
Trocknung und Granulierung	Erdgas el. Energie Dampf	20,0 5,1	8-12[4)]	[3)]
Abwasser-reinigung	el. Energie	4	[3)]	8,3
$\sum KEA_{fossil}$		190[5)6)]	74[5)]-166[5)]	123

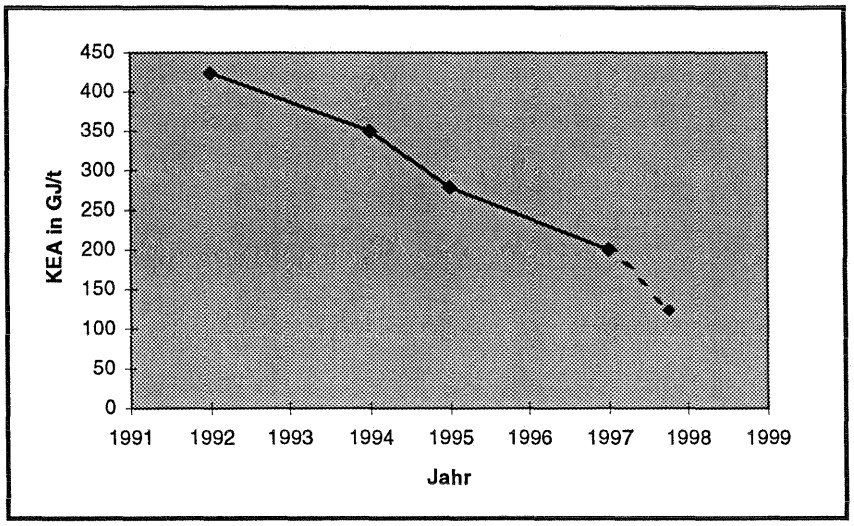
[1)] vorwiegend Brennstoffe
[2)] eigene Abschätzung.
[3)] keine Einzelangaben vorhanden
[4)] nur Trocknung
[5)] Eigene Berechnung, auf Basis von: Stromerzeugung $\eta = 0{,}35$; Dampferzeugung $\eta = 0{,}89$
[6)] Dieser Wert aus *(MONSANTO)* gibt einen veralteten Stand der Technik wieder. Als aktuellerer Wert werden 125 GJ/t angegeben.

Der Datensatz in der ersten Spalte stammt direkt vom PHB-Produzenten *MONSANTO* und wurde von einem unabhängigen Institut ermittelt. Die anderen beiden Datensätze stammen aus Studien, deren Autoren unter Nutzung von Informationen unterschiedlicher Qualität zu diesen Abschätzungen gelangen. Die letzte Zeile von Tabelle 4.5 gibt den kumulierten Energieaufwand (KEA) wieder, d.h. den primärenergetisch bewerteten Energiebedarf von der Ressource bis zum Produkt. Dabei handelt es sich teilweise um selbst berechnete und teilweise um zitierte Angaben.

Beim Vergleich der einzelnen Datensätze treten Unklarheiten und Unstimmigkeiten auf. Zum Beispiel weisen die beiden Datensätze *(LUCK)* und *(KOTHUIS)* Lücken auf (siehe Tabelle 4.5). Bei allen Datensätzen ist der hohe Energieverbrauch im Fermentationsschritt erkennbar, wobei eine sehr hohe Schwankungsbreite festzustellen ist.

Abbildung 4.3 zeigt, daß bei der Herstellung von PHB durch Verbesserungen im Produktionsprozeß schon einige Fortschritte hinsichtlich des benötigten Energieverbrauchs erzielt wurden.

Abbildung 4.3: Entwicklung des energetischen Verbrauchs bei der Produktion von PHB (MONSANTO)



Im einzelnen traten folgende Schwierigkeiten bei der Datenauswertung auf:

- Den Daten *MONSANTO* konnte nicht entnommen werden, ob bei der betrachteten Produktion Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) vorlag. Da die Produktion von PHB momentan aber an einem größeren Standort erfolgt, ist KWK sehr wahrscheinlich. Allerdings ist nicht

bekannt, welcher Anteil des Bedarfs über KWK gedeckt wird und mit welchen Wirkungsgraden dies geschieht.

- Der KEA-Wert nach *MONSANTO* in Höhe von 190 GJ/t gibt einen veralteten Stand der Technik wieder. Als aktuellerer Wert wurden 125 GJ/t genannt (siehe Abbildung 4.3); allerdings liegt für diesen Summenwert keine Differenzierung nach Prozeßstufen analog zu Tabelle 4.5 vor.
- Bei den Daten von *LUCK* ist der Energieverbrauch des Anbaus, der Extraktion und der Wasseraufbereitung nicht ausgewiesen und damit in der Summe des Primärenergieverbrauchs nicht enthalten. Es fehlen auch Angaben über den Dampfverbrauch. Der Energieverbrauch liegt aus diesen Gründen vermutlich zu tief.
- Bei dem Datensatz von *KOTHUIS* stellte sich das Problem der Unübersichtlichkeit. Die Daten sind bruchstückhaft und die dargestellten Endergebnisse nur schwer nachvollziehbar. Laut Angaben im Text und Aussage des Autors ist in dieser Studie der Anbau mit eingerechnet, was jedoch bei Vergleich mit den Daten der anderen Quellen sehr stark angezweifelt werden muß.
- Beim Vergleich mit *MONSANTO* stellt sich zusätzlich das Problem, daß bei *KOTHUIS* nicht die Herstellung aus Glucose, sondern aus einem Gemisch von Glucose und Melasse betrachtet wurde. Ein direkter Vergleich der beiden Datensätze ist aus diesem Grund nicht möglich. Prinzipiell könnte die Produktion von PHB sogar durch den ausschließlichen Einsatz von Melasse erfolgen. Bei reibungsfreier Umsetzbarkeit wäre ein derartiger Prozeß ökologisch günstiger als die Produktion aus Glucose, da Melasse als Nebenprodukt in anderen Prozeßketten anfällt. Allerdings ist hierfür noch der Nachweis zu erbringen, denn zusätzliche Reinigung, geringere Ausbeuten und eine höhere Störanfälligkeiten des Prozesses bereiten Schwierigkeiten.

Wegen der Verfügbarkeit von originären Anlagedaten und der zusätzlichen Nutzung von externem Expertenwissen kann davon ausgegangen werden, daß der Datensatz von *MONSANTO* mit der größten Wahrscheinlichkeit dem tatsächlichen Verbrauch entspricht. Ein weiteres Qualitätsmerkmal besteht darin, daß bei dieser Quelle nicht nur eine Momentaufnahme erstellt wurde, sondern auch die Fortschritte über einen längeren Zeitraum (ca. 5 Jahre) aufgezeigt wurden Abbildung 4.3). Aus diesen Gründen werden die KEA-Werte nach *(MONSANTO)* für den folgenden Vergleich mit vollsynthetischen Kunststoffen herangezogen.

Für den Vergleich der KEA-Werte wird als konventioneller Kunststoff Polyethylen (PE) ausgewählt. Tabelle 4.6 zeigt, daß auch hier eine erhebliche Schwankungsbreite der unterschiedlichen Quellenangaben vorliegt.

Tabelle 4.6: Energieverbrauch zur Herstellung von PE *(ISI)*

GJ/t	ISI	APME	BUWAL
Prozeßenergie	21,6	36,9	
Energie des gebundenen C	43,0	47,7	
KEA_{fossil}	64,6	84,6	69-107 Mittel: 85,8

Sowohl in Tabelle 4.5 als auch in Tabelle 4.6 ist zu beachten, daß die Energiedaten nur den Verbrauch fossiler Energieträger umfassen. Nicht enthalten sind Einträge durch nichtfossile Energieträger. Diese nichtfossilen Anteile wurden ausgegrenzt, da nachwachsende Rohstoffe bei nachhaltigem Anbau unerschöpflich sind und weil sie nur soviel CO_2 freisetzen, wie zuvor beim Wachstum aufgenommen wurde.

Vergleicht man nun den Summenwert von 190 GJ/t nach Tabelle 4.5 (*MONSANTO*) mit den Daten aus Tabelle 4.6, so wird ersichtlich, daß der kumulierte Energieaufwand (KEA) zur Herstellung von PHB um einen **Faktor von 2 bis 3** höher liegt als für die Herstellung von PE. Unterstellt man jedoch, daß der Wert von 85 GJ/t (Quelle *AMPE*) und der neue Stand der PHB-Herstellung mit 125 GJ/t korrekt sind, so verringert sich der Abstand auf einen **Faktor von 1,5**.

Die hier verwendeten KEA-Daten umfassen neben den prozeßenergetischen Aufwendungen in den einzelnen Umwandlungsschritten auch den fossilen Rohstoffeinsatz[5]. Damit handelt es sich gleichzeitig um eine Kenngröße für die fossilen CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus inklusive Abfallbehandlung über Verbrennung.

Somit kommt man zu den Schlußfolgerungen, daß

- die Substitution von PE durch PHB nach dem heutigen Stand der Technik noch keine Einsparmöglichkeiten bezüglich des kumulierten Energieaufwands (KEA) und der fossilen CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bietet.

[5] sog. Feedstock; siehe auch Energie des gebundenen Kohlenstoffs in Tabelle 4.6;

- andererseits in den letzten Jahren bereits erhebliche Fortschritte bei der fermentativen Gewinnung von PHB erzielt wurden.
- weitere Fortschritte denkbar sind, die zu einer deutlich günstigeren Gesamtbeurteilung bezüglich der Parameter KEA und fossiles CO_2 führen würden:
  a) In den einzelnen Schritten der industriellen Stoffumwandlung dürften weitere Optimierungspotentiale vorhanden sein (Lernkurve).
  b) Der Übergang zur landwirtschaftlichen Erzeugung von Zuckerrohstoff in tropischen Klimazonen könnte erhebliche Effizienzgewinne mit sich bringen.
  c) Die Fermentation ist hervorragend geeignet, um nicht nur PHB, sondern eine Vielzahl anderer, den jeweiligen Bedürfnissen angepaßte PHF-Kunststoffe herzustellen. Deren Realisierung erfordert zuvor noch einen erheblichen FuE-Aufwand. Andererseits wäre im Erfolgsfall nicht PE, sondern ein Spezialkunststoff auf fossiler Rohstoffbasis zu Vergleichszwecken heranzuziehen, und der KEA für dessen Produktion läge mit großer Wahrscheinlichkeit höher als derjenige von PE.
  d) Aufgrund der Hoffnungen und Erwartungen durch den Einsatz der Gentechnik eine deutliche Steigerung der Ausbeute und eine Verkürzung der Prozeßkette zu erreichen, gehen die Bemühungen dahin, PHB direkt durch landwirtschaftliche Produktion in Nutzpflanzen zu erzeugen. Nach Expertenmeinung wird die Kommerzialisierung dieses Verfahrens schon in näherer Zukunft möglich sein. Es wird also erwartet, daß gentechnologisch erzeugtes PHB im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen durchaus wettbewerbsfähig sein wird. Außerdem soll die Ökobilanz dem Vergleich mit konventionellen Kunststoffen standhalten können.

Am Beispiel von PHB zeigt sich, daß längerfristig die Chance besteht, einen hochwertigen Kunststoff zu entwickeln, der in Massenmärkten zum Einsatz kommt und gegenüber den heutigen Lösungen ökologische Vorteile hat. Als temporäre Zwischenlösung wird zunächst die Optimierung des Fermentationsschrittes stehen. Die Produktion durch Fermentation wird aber vermutlich auf Kunststoffe für Spezialanwendungen, z.B. in der Medizin, beschränkt bleiben *(LUCK)*.

4.2 Stärkekunststoffe

4.2.1 Materialeigenschaften

Geschäumte Stärke ist vom Aussehen dem Polystyrolschaum ähnlich, besitzt aber eine wesentlich höhere Wärmeresistenz und ist in organischen Lösungsmitteln unlöslich. Stärkeschaum zeichnet sich durch wärmeisolierende Eigenschaften aus. Besonders hervorzuheben sind seine hohen Dämpfungseigenschaften und seine antistatischen Eigenschaften. Diese Charakteristika ermöglichen den Einsatz als Verpackungsmaterial auch in hochwertigen Anwendungen, z.B. für Computer- und andere Elektronikgeräte *(UTZ)*. Tabelle 4.7 zeigt den Vergleich einiger Eigenschaften von geschäumter Stärke mit Polystyrolschaum auf.

Tabelle 4.7: Vergleich von extrudierten Stärken mit geschäumtem Polystyrol *(UTZ)*

Probe	Zellstruktur	Elastizität (%)	Kompressibilität (g/cm^2)
Weizenstärke	offen	spröde	>1000
Hylon V[1)]	teilw. geschlossen	zerbrechlich	192
Hylon VII[1)]	teilw. geschlossen	63,3	128
Hylon V, 5% P.O.[2)]	geschlossen	66,4	703
Hylon VII, 5% P.O.[2)]	geschlossen	73,2	508
EPS Loose Fill[3)]	geschlossen	73,8	588

[1)] extrudierte Stärke aus Hochamylostärke
[2)] extrudierte Stärke aus hydroxypropylierter Hochamylostärke
[3)] Expanded Polystyrene Loose Fill

Aufgeschäumte Stärkematerialien mit geöffneten Poren sind in der Lage, größere Mengen an Flüssigkeit aufzunehmen und eignen sich deshalb als Absorptionsmaterial für Flüssigkeiten, Öle oder Aromastoffe *(UTZ)*. Wird das Stärkematerial als Dämmstoff verwendet, so können bei der Herstellung flammhemmende Stoffe zugegeben werden, oder es entsteht durch Zugabe von Calciumcarbonat und Phosphorsäure in situ Calciumphosphat als flammhemmendes Mittel im Schaumprodukt.

Thermoplastische Stärke (TPS) kann bezüglich ihrer Materialeigenschaften mit Polyethylen verglichen werden. Die Materialeigenschaften von thermoplastischer Stärke sind teilweise

von Feuchtigkeit und Temperatur abhängig. Zur Veranschaulichung zeigt die Tabelle 4.8 die Werkstoffdaten zweier Stärkekunststoffe der Firma Novamont und vergleicht diese mit denen von L-LDPE. Die Novamont Produkte ändern ihre Eigenschaften bei einer relativen Luftfeuchte von 25-80% und Temperaturen zwischen 0°C und 40°C nicht. Bei direktem Kontakt mit Wasser quillt das Material teilweise auf. Folienrandabschnitte oder Angüsse, die produktionsbedingt bei der Herstellung anfallen, können mehrmals extrudiert - also rezykliert - werden *(FACCO)*.

Tabelle 4.8: Typische Filmeigenschaften und Anwendungsparameter von Mater-Bi-Produkten der Z-Klasse *(FPZ)*

Kenngröße	Methode	ZF02U[1)]	ZF03U[1)]	L-LDPE
Schmelztemperatur (°C)		130	130	
Zugfestigkeit (N/mm²)	ASTM D882	28	30	16
Streckspannung (N/mm²)	ASTM D882	12	12	8,5
Bruchdehnung (%)	ASTM D882	700	800	873
Zugmodul (N/mm²)	ASTM D882	371	296	191
Reißdehnung (%)	ASTM D882	650	890	
Wasserdurchläßigkeit (g 30m/m²d)	ASTM E398	189	368	18

[1)] Zusammengesetzt aus TPS und Polycaprolacton

4.2.2 Aufbau der Prozeßkette

Die zur Herstellung von Stärkekunststoffen verwendete Stärke wird in Europa hauptsächlich aus Mais, Weizen und Kartoffeln gewonnen. In einem Naßprozeß wird aus Kartoffeln durch Aufschlämmen die Stärke von den Begleitstoffen abgetrennt und in wäßriger Suspension gereinigt. Getreidesamen gelangen im allgemeinen lufttrocken zur Verarbeitung und müssen erst einem Weich- und Quellvorgang unterworfen werden, bevor sie durch Naßvermahlung in eine wäßrige Suspension überführt und daraus die Stärke abgetrennt und gereinigt werden kann *(WINNACKER)*.

Bei der Weiterverarbeitung der Stärke zu einem thermoplastischen Kunststoff wird die Stärke über die Glas- und Schmelztemperatur erhitzt *(JOPSKI)*. Somit wird eine fließfähige Schmelze erhalten, die anschließend durch Extrusion in ein thermoplastisches Granulat überführt wird *(LÖRKS)*. Das in der Stärke enthaltene Wasser dient gleichzeitig als Weichmacher, kann aber durch Übergang in die Gasphase zu störenden Blasen führen *(RÖPER)*. Erhöhte Temperatur, Druck und Scherenergie können eine Zerstörung der Makromoleküle bewirken *(LÖRKS)*. Um dies zu verhindern, ist auf die Einstellung kontrollierter Bedingungen wie Feuchtegehalt der Stärke, Druck und Temperatur besonders zu achten. Als Weichmacher werden oft mehrwertige Alkohole, z.B. Sorbit oder Glycerin, zugesetzt. Reine thermoplastische Stärke neigt zur Versprödung durch Austrocknung. Um die Flexibilität zu erhalten und allgemein die Eigenschaften zu verbessern, werden der Stärke Copolymere (z.B. Polyvinylalkohole, Polycaprolacton) zugefügt, die in der Schmelze zu einem neuen abbaubaren Polymerwerkstoff reagieren *(UTZ; LÖRKS)*.

Während bei der thermoplastischen Stärke die Gasblasenbildung störend wirkt, wird zur Herstellung geschäumter Stärke gerade dieser Effekt ausgenutzt. Im Extruder verursachen die Scherkräfte eine Erwärmung des Stärkematerials, wobei das Reaktionsgemisch gegebenenfalls durch zusätzliche Wärmezufuhr auf die gewünschte Temperatur gebracht wird. Durch Gasentwicklung bei der Reaktion der Treibmittelzusätze tritt in Gegenwart des vorhandenen Wassers durch die Hitze gelierende Stärke aus der Extrudierdüse aus. Es erfolgt eine Aufblähung und Schaumbildung unter gleichzeitiger Verfestigung der verkleisterten Stärkemasse *(UTZ)*. Durch das Extrusionsverfahren erhält man einen relativ starren Schaum, der sich besonders als Verpackungs- und Polstermaterial (Loose Fill) eignet. Wird die Stärkesuspension in Formwerkzeuge gespritzt, lassen sich durch die Formgebung Trays für die Verpackungsindustrie oder kompostierbares Einweggeschirr für die Gastronomie herstellen *(LÖRKS)*. Ein anderes Verfahren ist das "Backen". Dabei werden pulverförmige Zutaten mit Wasser angemischt und nach der Einstellung einer gleichmäßigen Textur und Produktfeuchte auf modifizierten Waffelbackmaschinen weiterverarbeitet *(UTZ)*.

Auch die Stärkekunststoffe stehen in einem direkten Konkurrenzkampf mit konventionellen Kunststoffen. Sie sollen möglichst ähnliche Materialeigenschaften besitzen, gleichzeitig aber auch einen geringeren Energieverbrauch bei ihrer Herstellung benötigen. Hier liefert besonders die Herstellung der nativen Stärke einen wesentlichen Beitrag zum Energieverbrauch.

Zur Schaffung einer geeigneten Vergleichsbasis wird wieder die gesamte Prozeßkette der Herstellung in die Analyse einbezogen.

Diese umfaßt:
- Bereitstellung der Grundstoffe (Anbau von Mais und Kartoffeln),
- Weiterverarbeitung zu Rohstoffen (z.B. Sorbit, Stärke) und
- Verarbeitung von TPS zu Endprodukten.

Der zum Vergleich dienende Prozeß der Herstellung von LDPE unterteilt sich in
- Produktion von Naphtha (incl. Gewinnung und Raffination von Rohöl),
- Produktion von Ethylen und
- Polymerisation des Ethylens.

4.2.3 Daten der Prozeßstufen

Zur Herstellung von thermoplastischer Stärke werden die in Tabelle 4.9 aufgelisteten Rohstoffe bzw. Zwischenprodukte benötigt. Die wichtigsten Einflußgrößen für den Energieeinsatz bei landwirtschaftlichen Erzeugnissen sind die Anbaumethode, die Lage des Anbaugebietes und der Aufwand der Weiterverarbeitung (vgl. Tabelle 4.10).

Tabelle 4.9: Benötigte Mengen an Rohstoffen zur Herstellung 1 t TPS *(BUWAL)*

Rohstoffe/Zwischenprodukte	Mengenangabe (t)
Kartoffeln	2,33
Mais	0,385
Stärke (aus Kartoffeln)	0,67
Stärke, Sorbit (aus Mais)	0,33

Tabelle 4.10: Kumulierter Energieaufwand für die Stärkeherstellung

KEA in GJ/t Stärke	aus *TFA*[1]			aus *BUWAL*[2]	
	Kartoffeln	Mais	Weizen	Kartoffeln	Mais(Sorbit)[3]
Anbau	4,07	5,94	4,89	3,78	1,72
Stärkegewinnung	4,40	3,50	3,30	7,16	17,94
Insgesamt	8,47	9,44	8,99	10,94	19,66

[1] ohne Energiebedarf der Bereitstellung der Energieträger (v.a. Raffination); mit Transportenergie;

[2] inklusive Energiebedarf für die Bereitstellung der Energieträger und für die Bereitstellung der Düngemittel; ohne Transportenergie;

[3] nicht vergleichbar mit Daten aus Technologiefolgenabschätzung (*TFA*), da hier Sorbitherstellung betrachtet wird;

Die Tabellen 4.11 und 4.12 zeigen, sowohl für die TPS-Herstellung als auch für die PE-Herstellung, wie hoch die Verbräuche an fossilen energetischen Ressourcen sind und wie hoch der Ausstoß treibhausrelevanter Gase ist.

Tabelle 4.11: Verbrauch fossiler Energieträger und Treibhauspotential für die Herstellung von 1t TPS (*BUWAL Nr. 271)*

	KEA in GJ/t Produkt	**Treibhauspotential**[*] in kg CO_2 Äq.
Anbau Mais	0,57	49,7
Anbau Kartoffeln	2,53	177
Stärkeproduktion aus Kartoffeln	4,8	248
Sorbitproduktion	5,92	283
Transport LKW	0,36	22,5
Verarbeitungsenergie (Strom)	11,2	363
Summe	25,38 (KEA_{fossil})	1143,2

[*] Berücksichtigte treibhausrelevante Emissionen: CO_2, CH_4 und Lachgas.

Tabelle 4.12: Umweltbelastung bei der Herstellung von 1t PE (*BUWAL Nr. 271*, eigene Berechnungen)

	KEA in GJ/t Produkt	Treibhauspotential in kg CO_2 Äq.
Naphtha ab Raffinerie	77,8	1070
Verbrennung Gase,Heizöl	17 *)	1160
Verarbeitungsenergie (Strom)	13,9	450
Entsorgung Kunststoffe (mit Energiegutschrift bei Verbrennung)	0,1 (-16 *))	3140 (2140) *)
Summe	109 (93) **)	5820 (4820) **)

*) eigene Berechnung **) inklusive selbst berechneter Anteile (siehe *); Summe entspricht $KEA_{fossil;}$

Zur Verbesserung der Produkteigenschaften werden der Stärke oft Copolymere zugesetzt. Als Copolymere werden meist Polyvinylalkohol, Polycaprolacton oder PE als Blend verwendet. Für Stärkepolymere, mit diesen Zusatzstoffen wurden entsprechende Auswertungen durchgeführt, die im folgenden (Tabelle 4.13 bis Tabelle 4.15) diskutiert werden.

Verändert man nun die Anteile dieser Copolymere, so läßt sich eine Vergrößerung des Verbrauchs an elektrischer Energie im letzten Schritt der TPS-Herstellung bei steigendem Anteil an nachwachsenden Rohstoffen feststellen (siehe Tabelle 4.13). Wichtiger als derartige Vergleiche für eine einzelne Stufe in der Prozeßkette ist jedoch der Vergleich über den gesamten Lebenszyklus, welcher im nächsten Kapitel präsentiert wird.

Tabelle 4.13: Aufwand an elektrischer Energie für Herstellung (*persönliche Mitteilungen*)

Anteil an Nachwachsenden Rohstoffen	elektrische Energie in GJ/t Produkt
ca. 30%	0,8
40 - 60%	1,8 - 1,9
> 85%	2,5 - 2,6

4.2.4 Vergleich über den Lebenszyklus

In Tabelle 4.14 ist der kumulierte fossile Energieaufwand für die Gesamtproduktion, d.h. der primärenergetisch bewertete Energiebedarf von der Ressource bis zum Produkt, angegeben

(inklusive Prozeß- und Feedstockenergie). Diese Daten wurden, sofern in den Fußnoten nicht anders vermerkt, selbst berechnet. Als Datengrundlage wurden persönliche Mitteilungen von Herstellern, Angaben in einschlägigen Studien (z. B. *TFA*, *BUWAL*) sowie Berechnungen des ISI herangezogen.

Tabelle 4.14 zeigt, daß der kumulierte fossile Energieaufwand mit steigendem Anteil an fossilen Rohstoffen zunimmt. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu Tabelle 4.13, in welcher der Energiebedarf nur für einen ausgewählten Schritt der Prozeßkette angegeben ist. Aus diesem Gegensatz wird ersichtlich, daß es nicht ausreichend ist, nur einzelne Teilschritte der Prozeßkette zu betrachten.

Tabelle 4.14: Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung der ausgewählten Kunststoffe in Abhängigkeit vom Anteil fossiler Rohstoffe

Zusammen-setzung	Anteil an fossilen Rohstoffen in %	KEA_{fossil} in GJ/t
TPS	0	(20,8) – 25,4 [1)]
TPS/ Polyvinylalkohol	15	23,9 – 25,9
TPS/ PE	40	43,8 – 59,8 [2)]
TPS/ Polycaprolacton	52,5	46,7 – 49,9
TPS/ Polycaprolacton	60	52,0 – 52,6
PE	100	64,6 – 85,8 [3)]

Die Wertebereiche wurden über Sensitivitätsanalysen ermittelt. Variiert wurden die Energiedaten

- der natürlichen Rohstoffe, unter Nutzung diverser Angaben in *BUWAL* und *TFA* und
- für Polyethylen (PE) nach
  a) *ISI*: KEAfossil = 64,6 GJ/t
  b) *APME*: KEAfossil = 84,6 GJ/t
  c) *BUWAL*: KEAfossil = 85,8 GJ/t (*BUWAL Nr. 250*, S. 121).

Fußnoten:

1) 25,4 GJ/t nach *BUWAL Nr. 271*, Band I, S. 51; eingeklammerter Wert geht auf eigene Berechnungen zurück und ist mit größeren Unsicherheiten behaftet.
2) 59,8 GJ/t nach *BUWAL Nr. 271*, Band I, S. 54. Sensitivitätsanalysen für natürliche Rohstoffe (kleiner Einfluß) und für PE (großer Einfluß) liefern Wertebereich zwischen 43,8 GJ/t und 54,8 GJ/t.
3) In *BUWAL Nr. 250* (S. 121) wird eine Bandbreite von 69-107 GJ/t und ein durchschnittlicher Wert von 85,8 GJ/t angegeben; vgl. auch Tabelle 4.12 mit Werten nach *BUWAL Nr. 271*.

Bei der Datenauswertung zur Erstellung von Tabelle 4.14 traten folgende Schwierigkeiten auf:

- Stärke läßt sich aus Mais, Weizen, Kartoffeln oder Mischungen dieser Stärkesorten herstellen. *BUWAL* verwendete für ihren TPS-Kunststoff zusätzlich noch aus Mais hergestelltes Sorbit, was zu vergleichsweise hohen KEA-Werten führt.
- Die im Rahmen dieser Arbeit für die Stärkeherstellung herangezogenen Datengrundlagen *TFA* und *BUWAL* sind nur bedingt miteinander vergleichbar, wie Tabelle 4.10 zeigt.
- Besonders große Wertespannen liegen bei Polyethylen (PE) vor, mit entsprechenden Konsequenzen auch für den Werkstoff TPS/PE.

Die in Tabelle 4.14 angegebenen Werte sind in Abbildung 4.4 graphisch aufgetragen. Dabei ergibt sich die Balkenhöhe aus dem arithmetischen Mittel der in Tabelle 4.14 genannten Minimal- und Maximalwerte; letztere sind über die Fehlerbalken dargestellt.

Wie Tabelle 4.14 und Abbildung 4.4 zeigen, liegt zwischen dem fossilen kumulierten Energieaufwand (KEA_{fossil}) für reine thermoplastische Stärke und dem vollsynthetischen Kunststoff PE ein Faktor von 3 bis 4. Für die hochwertigeren Stärkekunststoffe mit größeren Materialanteilen auf fossiler Rohstoffbasis[6] ist der Abstand zu PE entsprechend kleiner.

[6] Polycaprolacton: KEA_{fossil} = 77GJ/t
Polyvinylalkohol: KEA_{fossil} = 58GJ/t

Abbildung 4.4: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung von ausgewählten Stärkekunststoffen und PE

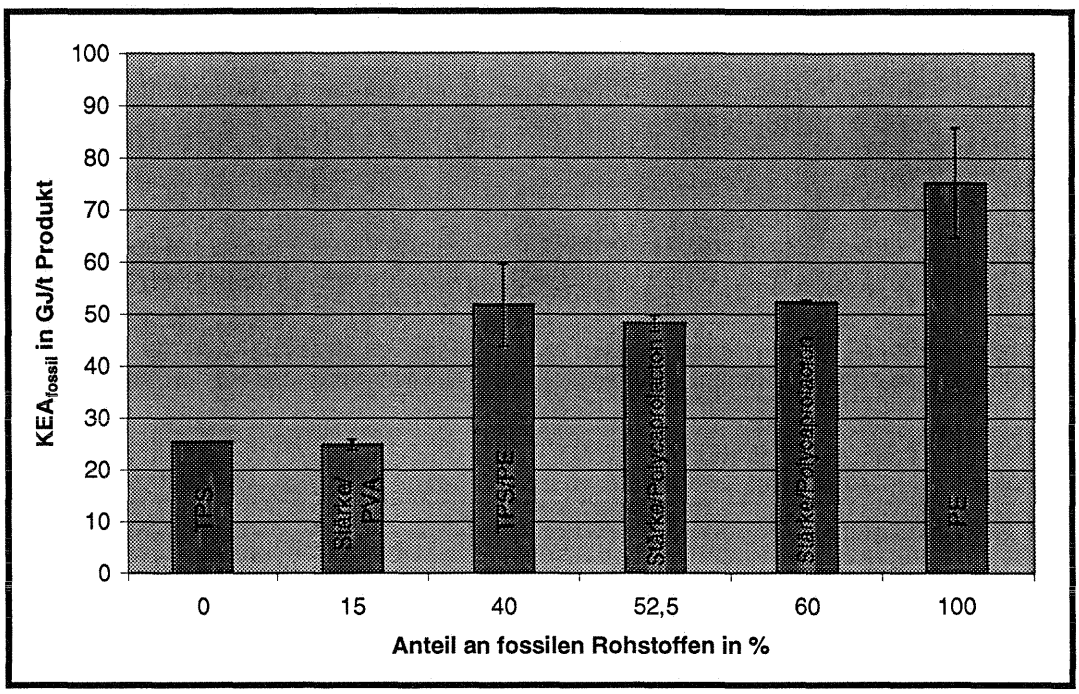
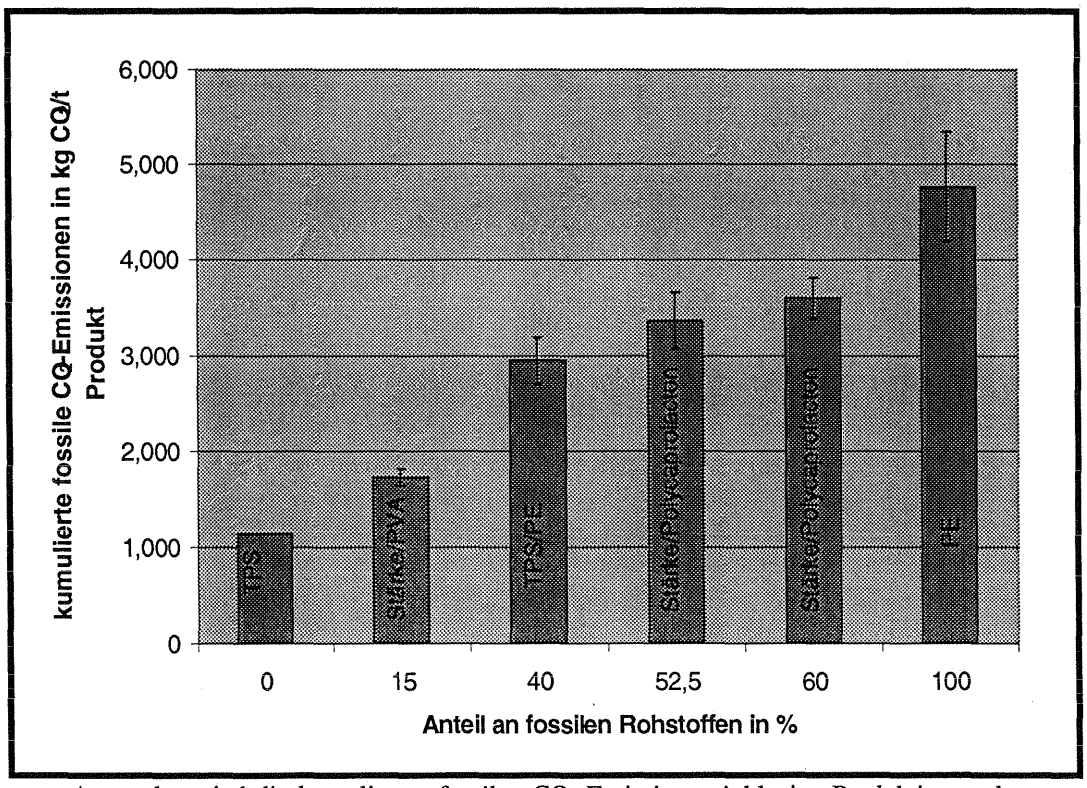


Abbildung 4.5: CO_2-Emissionen für ausgewählte Stärkekunststoffe und PE



Angegeben sind die kumulierten fossilen CO_2-Emissionen inklusive Produktion und Abfallbehandlung durch Verbrennung.

Wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt wurde, stellt der kumulierte fossile Energieaufwand eine gute Kenngröße für die kumulierten fossilen CO_2-Emissionen über den gesamten Lebensweg inklusive Abfallbehandlung durch Verbrennung dar. Dies wird durch Tabelle 4.15 und Abbildung 4.5 bestätigt. Die Berechnung und Darstellung der CO_2-Emissionen erfolgte analog zum Vorgehen beim kumulierten Energieaufwand (s.o.).

Tabelle 4.15: Kumulierte fossile CO2-Emissionen in Abhängigkeit vom Anteil fossiler Rohstoffe

Zusammen-setzung	Anteil an fossilen Rohstoffen in %	Kumulierte fossile CO_2-Emissionen in kg CO_2/t [1)]
TPS	0	1140[1) 2)] - 1190
TPS/ Polyvinylalkohol	15	1640 - 1810
TPS/ PE	40	2700 - 3190[3)]
TPS/ Polycaprolacton	52,5	3060 - 3660
TPS/ Polycaprolacton	60	3380 - 3810
PE	100	4200 - 5340

Angegeben sind die kumulierten fossilen CO_2-Emissionen inklusive Produktion und Abfallbehandlung durch Verbrennung.

Die Wertebereiche wurden über Sensitivitätsanalysen ermittelt. Variiert wurden die Energie- und CO_2 – Daten

- der natürlichen Rohstoffe, unter Nutzung diverser Angaben in *BUWAL* und *TFA*
- der petrochemisch hergestellten Comonomere
  a) Polycaprolacton: kumul. foss. CO_2 = 5000 – 5700 kg/t
  b) Polyvinylalkohol: kumul. foss. CO_2 = 4100 – 4300 kg/t
- für Polyethylen (PE) nach
  a) *ISI*: kumul. foss. CO_2 = 4380 kg/t
  b) *APME*: kumul. foss. CO_2 = 4190 kg/t
  c) BUWAL: kumul. foss. CO2 = 5340 kg/t (BUWAL Nr. 250, S. 123, eigene Berechnungen) = 2200 (S.123) + 857*44/12; nach Tabelle 4.12 bis 5820 kg/t nach BUWAL Nr. 271 und eigenen Berechnungen.

Fußnoten:
1) 1140 kg/t nach *BUWAL Nr. 271*, Band I, S. 51;
2) CO_2-Äquivalente (GWP), d.h. inklusive anderer Klimagase außer CO_2
3) 3000 kg/t nach *BUWAL Nr. 271*, Band I, S. 54; dieser Wert gilt für das Abfallbewirtschaftungsszenario 80% Verbrennung / 20% Deponie; angegeben sind die CO_2-Äquivalente (vgl. Fußnote 2).

Stärkekunststoffe bieten im Vergleich zu Kunststoffen auf fossiler Rohstoffbasis ein Potential zur Einsparung von Energieträgern und zur Minderung der fossilen CO_2-Emissionen. Dieses

Stärkekunststoffe bieten im Vergleich zu Kunststoffen auf fossiler Rohstoffbasis ein Potential zur Einsparung von Energieträgern und zur Minderung der fossilen CO_2-Emissionen. Dieses Potential kann eventuell noch ausgebaut werden. Denn Kunststoffe auf fossiler Basis greifen bereits auf eine über Jahrzehnte hinweg optimierte Prozeßtechnologie zurück, während Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe noch relativ neue Materialien sind, weswegen die Prozeßtechnologie noch nicht ausgereift ist. Findet also eine Verbesserung der Produktionstechnologie für die Herstellung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen statt, so ist mit der Vergrößerung des Vorsprungs hinsichtlich der CO_2-Emissionen und des Energieaufwandes zu rechnen.

Abschließend müssen zwei Einschränkung gemacht werden:

- Bedingt durch die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften können Stärkekunststoffe vollsynthetische Kunststoffe jedoch nur in bestimmten Einsatzgebieten ersetzen. Vor allem bei kurzlebigen Produkten bieten sich Stärkekunststoffe aufgrund ihrer Bioabbaubarkeit an. Auch bieten Beschichtungen und neue Rezepturen zunehmend einen besseren Schutz gegen die Feuchteempfindlichkeit der Stärkekunststoffe. Damit stehen den Stärkekunststoffen einerseits weitere Wege offen, um neue Marktanteile auf dem Kunststoffmarkt zu erobern, aber andererseits handelt es sich ohne Zweifel um einen begrenzten Gesamtmarkt.
- Die Wahl des Abfallbehandlungsverfahrens am Ende des Lebenswegs hat einen wesentlichen Einfluß auf die ökologische Positionierung. Die durchgeführten Berechnungen gehen davon aus, daß sowohl die Stärkekunststoffe als auch Polyethylen der Abfallverbrennung zugeführt werden. Liegt jedoch der Fall vor, daß PE z.B. in einer Müllverbrennungsanlage mit Energierückgewinnung verbrannt wird, während die Stärkekunststoffe deponiert[7] werden, so verkleinert sich der ökologische Vorteil der Stärkepolymere. Neben der Berechnung dieser Variante wäre ferner die Kompostierung der bioabbaubaren Kunststoffe in den Vergleich einzubeziehen. Diese Untersuchungen sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Seminararbeit.

[7] führt zusätzlich zu CH_4-Emissionen

4.3 Schlußfolgerungen

Die in Kapitel 4.1 und 4.2 behandelten "Biokunststoffe" stehen für zwei unterschiedliche Strategien, im Kunststoffmarkt Fuß zu fassen.

Der Ausgangspunkt der Kommerzialisierung von PHFs bestand darin, einen hochwertigen Spezialkunststoff für den Einsatz in kleinen, möglichst lukrativen Märkten anzubieten. Durch die vielfältige Kombinierbarkeit von Substratgrundlage und Kulturen wird die Herstellung einer Vielzahl von Werkstoffen möglich, die mit ihren jeweiligen Materialeigenschaften mit den konventionellen Kunststoffen in Konkurrenz treten. Bei erfolgreicher Weiterentwicklung könnten PHFs zukünftig auch in weniger anspruchsvollen, aber größeren Märkten Anteile gewinnen.

Eine in gewisser Hinsicht spiegelbildliche Situation liegt bei den Stärkekunststoffen vor, wo ausgehend von sehr einfachen Materialien (z.B. loose-fill) das Ziel verfolgt wird, neue Marktsegmente durch qualitativ hochwertigere Produkte für sich zu gewinnen.

Wie in Kapitel 4.1 gezeigt wurde, wirkt sich der aufwendige Herstellprozeß bei PHFs nachteilig auf den kumulierten Energieaufwand und die kumulierten CO_2-Emissionen aus. Folglich können die PHFs nach vorliegenden Informationen zum gegenwärtigen Zeitpunkt keinen Beitrag zur Minimierung des fossilen Ressourceneinsatzes im Kunststoffsektor und den daraus resultierenden Emissionen leisten. Allerdings könnte sich dieses Bild bei zukünftigen Erfolgen in FuE zugunsten der PHFs ändern. Die deutlichen Fortschritte in den vergangenen Jahren sowie die noch nicht ausgeschöpften technischen Möglichkeiten lassen ein erhebliches Innovationspotential vermuten, so daß eine abschließende Beurteilung noch nicht möglich ist.

Mit Stärke, einem im Überschuß vorhandenem nachwachsendem Rohstoff, wurde ein Ausgangsmaterial gewählt, das sich für die Herstellung eines Massenkunststoffs anbietet. Der günstige Preis und die Bioabbaubarkeit der Stärkekunststoffe ermöglichen bereits den Einsatz in Teilgebieten der Massenkunststoffe. Ein großer Nachteil der Stärkekunststoffe ist jedoch die Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit. Andererseits verfolgt die Entwicklung hochwertiger Stärkekunststoffe das Ziel, diese und andere Nachteile zu beseitigen. Der vielversprechende Vergleich der Energieverbräuche zeigt, daß Stärkepolymere bereits heute einen Beitrag zur Schonung der Ressourcen und zur Minderung des CO_2-Ausstoßes leisten können.

Sowohl für PHFs als auch für die Stärkekunststoffe wurden im Rahmen dieser Arbeit nur zwei umweltrelevante Parameter untersucht (KEA und CO_2). Dagegen kann ein umfassender Einblick erst durch Erweiterung um die für eine Ökobilanz entscheidenden Größen gewonnen werden. Ferner sollten insbesondere im Bereich der Abfallwirtschaft weitere Varianten berechnet und einander gegenübergestellt werden.

Die Frage, in welchem Umfang die untersuchten Kunststoffe einen nennenswerten Beitrag zur Einsparung erschöpflicher Energieträger und zum Klimaschutz beitragen können, hängt auch wesentlich davon ab, welches Marktvolumen faktisch besetzt werden kann. Dies hängt außer von den gesamtwirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen und den weiteren FuE-Fortschritten bei PHFs und Stärkepolymeren auch von der Entwicklung bei den in Konkurrenz stehenden Polymeren ab - seien es andere Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen oder aber z.B. ein verstärktes Recycling von Kunststoffen auf petrochemischer Basis. In diesen Punkten besteht weiterer Untersuchungsbedarf, der über den Gegenstand dieser Seminararbeit hinausgeht.

5. Zusammenfassung

Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind keine neue Entwicklung. Vor 1930 wurden Kunststoffe ausschließlich aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Mit der Herstellung von vollsynthetischen preiswerten Kunststoffen wurden sie jedoch zunehmend vom Markt verdrängt. Durch die Diskussionen über treibhausrelevante Gase und Probleme in der Abfallwirtschaft wurde das Interesse an Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen wieder geweckt. Denn nachwachsende Rohstoffe nehmen bei ihrem Wachstum CO_2 auf und geben damit bei ihrer Entsorgung nur die zuvor gebundene Menge an CO_2 wieder ab. Damit stellt sich die Frage, inwieweit Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zur Minderung der fossilen CO_2-Emissionen beitragen können.

Der erste Teil dieser Seminararbeit liefert einen Überblick über plastische Polymere aus nachwachsenden Rohstoffen. Für eine Auswahl von elf Materialien, welche die zur Zeit am intensivsten diskutierten Vertreter darstellen, wird eine knappe Übersicht zu den Herstellverfahren, Anwendungsfeldern, Charakteristika und Markt- und Entwicklungsperspektiven gegeben. Die Gruppe der elf Kunststoffe umfaßt sowohl "sehr alte" Materialien wie Zelluloid, die sich bis in die heutige Zeit Marktsegmente erhalten konnten, als auch neue, weitestgehend noch unbekannte Kunststoffe wie Chitosan, die noch einen längeren Entwicklungsprozeß bis zur Ausreifung der Prozeßtechnologie vor sich haben.

Genauer untersucht wurden zwei Kunststoffe - PHB und Stärkekunststoffe. Bei diesen beiden Kunststoffarten wurde untersucht, wie groß ihre Möglichkeiten sind, konventionelle Kunststoffe zu ersetzen. Dabei stellte sich heraus, daß PHB hinsichtlich der Materialeigenschaften hervorragend dafür geeignet ist, konventionelle Kunststoffe zu ersetzen. Gegenwärtig ist der Energieaufwand für den aufwendigen Produktionsprozeß von PHB jedoch noch deutlich höher als für die Herstellung eines konventionellen Kunststoffes. Folglich bietet die Substitution von PE durch PHF nach heutigem Stand der Technik keine Einsparmöglichkeiten bezüglich des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und der fossilen CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. Genau spiegelbildlich ist die Situation bei den Stärkekunststoffen. Dies benötigen einen wesentlich geringeren Energieaufwand zu ihrer Herstellung als konventionelle Kunststoffe, sind also als "Ersatzkunststoffe" zur Energieeinsparung fossiler Ressourcen und Minderung treibhausrelevanter Gase geeignet. Jedoch könnte eine andere Wahl der Abfallbehandlung von Stärkekunststoffen und PE eine andere Positionierung unter

den Aspekten des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen ergeben. Aber auch die Materialeigenschaften bereiten bei den Stärkekunststoffen Schwierigkeiten. Durch Feuchteempfindlichkeit werden die Einsatzgebiete dieser Kunststoffe sehr eingeschränkt.

Für die beide ausgewählten Kunststoffe wird aber schon nach Lösungen für ihre Probleme gesucht. Bei PHB schlägt man einen völlig neuen Weg der Herstellung ein. Durch Verkürzung der Produktionswege, indem man in gentechnisch veränderte Nutzpflanzen direkt PHB produziert, werden vermutlich nicht zu vernachlässigende Energieeinsparungen möglich sein. Auch der Übergang zum Anbau von Zuckerrohstoffen in tropischen Klimazonen könnte erhebliche Effizienzgewinne mit sich bringen. Noch weitere Optimierungspotentiale dürften im industriellen Herstellungsprozeß vorhanden sein. Bei den Stärkekunststoffen wurden durch neue Rezepturen bzw. Copolymere bereits erhebliche Verbesserungen der Materialeigenschaften erzielt. Weitere Fortschritte sind auch hier denkbar.

Zu beachten ist, daß in dieser Studie nur zwei Faktoren einer Lebenszyklusanalyse betrachtet wurden (Energie, CO_2). So können auf der Basis dieser Studie keine Rückschlüsse bezüglich sonstiger Faktoren, wie z. B. zum Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen und an Deponieflächen oder zum Einfluß auf Luft und Wasser durch sonstige Emissionen beim Anbau der nachwachsenden Rohstoffe oder bei der Entsorgung der Kunststoffe, gezogen werden.

Literaturverzeichnis

APME: I. Boustead: Eco-profiles of the European plastics industry. Association of Plastics Manufactures in Europe (APME), Brüssel.

- Report 9, Polyurethane Precursors. Brüssel, 1996.
- Report 3: Polyethylene and Polypropylene. Brüssel, 1993

BECKER: G. W. Becker, D. Braun: Kunststoff Handbuch,Band 4 Polystyrol. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1996.

BIOMASS: Biomass Process Handbook, A Production/Economic Guide to 42 chemical processes that use biomass as a raw material. Technical Insights Inc., New Jersey, Fort Lee, 1983.

BUWAL: Bundesamt für Umwelt und Landschaft (BUWAL), Bern

- F. Dinkel, C. Pohl, M. Ros, B. Waldeck: Ökobilanz stärkehaltiger Kunststoffe (Nr. 271), Band I und II.,1996.
- K. Habersatter, I. Fecker, S. Dall'Aqua, M. Fawer, F. Fallscheer, R. Förster, C. Maillefer, M. Ménard, L. Reusser, C. Som, U. Stahel, P. Zimmermann: Ökoinventare für Verpackungen (Nr. 250), Band I und II, 1996

EMPE: Persönliche Mitteilung;

ENTEN: G. Entenmann: Abbaubare Kunststoffe aus Milchsäure.
In: A. Pfeil: Biologisch abbaubare Kunststoffe, Band 425. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994, S. 91-101.

FACCO: S. Facco, Eschborn: Mater Bi - Stärkewerkstoff und seine Anwendungen. In: Fachtagung Biologisch abbaubarer Werkstoffe. Festung Marienberg, Würzburg, 28./29. Februar 1996.

FPZ: U. Witt, R.-J. Müller, J. Klein: Biologisch abbaubare Polymere - Status und Perspektiven. Franz-Patat-Zentrum, Braunschweig, 1997.
ISBN 3-00-001529-9.

FRITZ: H.-G. Fritz, H Seidenstücker, U. Bolz, M. Juza: Study on Production of Thermoplastics and Fibres mainly based on biological materials
European Commission EUR 16102 EN, Directorate-General XII, Science, Research and Development,1994.

GARDILL: R. Gardill, R. Poltrock: Polyurethan-Schaumstoffe auf Basis von Pflanzenölen für den Automobilinnenausbau. In: 5. Symposium " Im Kreislauf der Natur - Naturstoffe für die moderne Gesellschaft". Würzburg, 8.-9. Juli 1996.

GIERNAPP: C. Giernapp: Trends und Perspektiven in Forschung und Entwicklung. In: Dechema Regional Kolloquium: Industrielle Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Rostock, 28.Januar 1997.

GRUPPE: H. Gruppe: Anwendung von Biopol im Kontakt mit Lebensmitteln.
In: Fachtagung Biologisch abbaubarer Werkstoffe. Festung Marienberg, Würzburg, 28./29. Februar 1996.

IKARUS: E. Jochem, H. Bradke: Energieeffizienz, Strukturwandel und Produktionsentwicklung der deutschen Industrie. Instrumente für Klimagas- Reduktionsstrategien IKARUS, Abschlußbericht ,Teilbereich 6 "Industrie". Forschungszentrum Jülich, 1996.

ISI: M. Patel: Carbon for Materials - Production and Recycling, Innovation and Technical Opportunities for Responsible Care. Workshop Proceedings. Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe, 1998.

JOPSKI: T. Jopski: Biologisch abbaubare Kunststoffe
In: Kuststoffe 83 (1993). Carl Hanser Verlag, München, 1993.

KGK: Biokunststoff auf Holzbasis.
In: KGK Kautschuk Gummi Kunststoff, 49. Jahrgang, Nr. 9, 1996.

(KI): Kunststoff Information: Biologisch abbaubare Polymere. 27. Jahrgang ,
Nr 1349,14. Juli 1997. Bad Homburg. ISSN 0930-7451.

KOTHUIS: B. Kothuis, F. Schellemann: Environmental economic comparison of biotechnology with traditional alternatives (final report). Institute for Applied Environmental Economics (TME), Den Haag, 1996.

LÖRKS: J. Lörks: Biokunststoffe auf Stärkebasis.
In: Fachtagung Biologisch abbaubarer Werkstoffe. Festung Marienberg, Würzburg, 28./29. Februar 1996.

LUCK: T. Luck; A. Mäurer; M. Menner; A. Starnecker; B. Spitzer; H. Utz: Feasability-Studie zur Abschätzung des Marktpotential neuer Polyhydroxyfettsäuren (Abschlußbericht). Fraunhofer Institut für Lebensmitteltechnologie und Verpackung (ILV), München, 1996.

LUZIER: William D. Luzier: Materials derived from biomass/biodegradable materials. Proc. Natl. Acad. USA, Vol. 89, pp. 839-842, Feb.1992, Colloquium Paper.

MONSANTO: Daten eines PHB-Produzenten;

ÖSTERR: Neuartiger Kunststoff auf Holzbasis.
In: Österreichische Kunststoff-Zeitschrift, 27.1996, 5/6, Wien, S. 107-108.

PETER: M. G. Peter, L. A. Köhler: Chitin und Chitosan: nachwachsende Rohstoffe aus dem Meer. In: Horst Eierdanz: Perspektiven nachwachsender Rohstoffe für die Chemie. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996.

RÖMPP: J. Falbe(Hrsg.), M. Regitz (Hrsg.): Römpp-Lexikon Chemie
Band 1 A-Cl, 10. Auflage,1996;Band 2 Cm-G, 10. Auflage,1997;
Band 3 H-L, 10. Auflage, 1997; Band 4 M-PK,9. Auflage,1991;
Band 5 Pl-S, 9. Auflage, 1992; Band 6 T-Z, 9. Auflage, 1992;
Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.

RÖPER: H. Röper: Stärke als Industrierohstoff.
In: 3. Symphosium Nachwachsende Rohstoffe - Perspektiven für die Chemie, Tagungsband, 4./5. Mai 1994. Landwirtschaftsverlag: Münster, 1994.

SARTORIUS: I. Sartorius: Abbaubare Kunststoffe aus der Sicht der kunststofferzeugenden Industrie. In: Fachtagung Süddeutsches Kunststoff-Zentrum. Würzburg, Februar 1997.

SCHWARZ: I. Schwarz-Quant: BIOCETA - ein glasklarer, biologisch abbaubarer thermoplastischer Kunststoff auf Celluloseacetatbasis. In: A. Pfeil: Biologisch abbaubare Kunststoffe, Band 425. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim,1994, S. 21-26.

SIEMANN: U. Siemann: Celluloseacetat - ein Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen. In: A. Pfeil: Biologisch abbaubare Kunststoffe, Band 425. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994, S.18-20.

TFA: D. Winter, B. Fürniß, S. Klein-Vielhauer, L. Leible, E. Nieke, Ch. Rösch, H. Taugen: Technologiefolgenabschätzung zum Thema Nachwachsende Rohstoffe. Landwirtschaftsverlag, Münster, 1993.

TOMKA: I. Tomka: Folien aus nachwachsenden Rohstoffen: Stärke als Kunststoffersatz - Produktideen - Anwendungen. In: A. Pfeil: Biologisch abbaubare Kunststoffe, Band 425. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994, S. 46-61.

ULLMANN: E. Bartholome, E. Biekert, H. Hellmann, H. Ley, W. M. Weigert: Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, Band 9. Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstraße, 1975.

UMBACH: W. Umbach: Chemieprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen - Antworten auf die Herausforderungen der Zukunft. In: Horst Eierdanz: Perspektiven nachwachsender Rohstoffe für die Chemie. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1996, S. XXIX-XLI.

UTZ H. Utz, M.Korn, D. Brune: Untersuchung zum Einsatz bioabbaubarer Kunststoffe im Verpackungsbereich. Fraunhofer Gesellschaft für Lebensmittel und Verpackung, München, Karlsruhe, 1991.
BMFT Forschungsbericht Nr. 01-Zv8904

VORSPOHL: K. Vorspohl, W. Hinz, B. Güttes: Einsatz nachwachsender Rohstoffe in Polyurethanen. In: M, Eggersdorfer; S. Warwel; G. Wulff (Hrsg.): Nachwachsende Rohstoffe - Perspektiven für die Chemie. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993, S. 383-388.

WINNACKER: K. Winnacker, L. Küchler: Chemische Technologie. Band 5, 4. Auflage. Carl Hauser Verlag, München, Wien, 1981.

WULFF: G. Wulff: Übersicht über neue polymere Materialien auf Basis nach-wachsender Rohstoffe. In: M, Eggersdorfer; S. Warwel; G. Wulff (Hrsg.): Nachwachsende Rohstoffe - Perspektiven für die Chemie. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim,1993.