

# **Biologisch abbaubare Kunststoffe Im Besonderen auf Basis von Stärke**



Maturitätsarbeit von Jann Koch  
MNG Rämibühl Klasse 4b

Betreuer: Herr Lorenz Marti

Eingereicht am 1. März 2006

Quellenangabe des Titelbildes:  
Kennzeichen für zertifizierte BAW (IBAW, 1999), bearbeitet und stilisiert  
[Wolfram Tänzer, 2000, p38]

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. VORWORT</b>	<b>3</b>
1.1. Motivation	3
1.2. Begriffsdefinition	3
<b>2. ABSTRACT</b>	<b>5</b>
<b>3. EINLEITUNG</b>	<b>6</b>
3.1. Untersuchungsgebiet	6
3.2. Ansprüche	6
3.3. Theorie	7
3.3.1. Stärke	7
3.3.2. Amylose	7
3.3.3. Amylopektin	8
3.3.4. Verhältnis Amylose zu Amylopektin	9
3.3.5. Entstehung der Folie	9
3.3.6. Abbau	10
3.4. Kartoffeln vs. Mais und Weizen	11
<b>4. MATERIAL UND METHODEN</b>	<b>12</b>
4.1. Kunststoff auf Basis von Stärke	12
4.1.1. Herstellung der Stärke	12
4.1.2. Herstellung des Kunststoffes	12
4.1.3. Bedeutung des Glycerins	13
4.1.4. Variation der Parameter	13
4.2. Schäumen des Stärkekunststoffes	13
4.3. Polylactid	14
4.4. Stärkefolie und Polylactid	14
4.5. Abbauversuche	15
4.5.1. Herkömmliche Kunststoffe	15
4.5.2. Stärkefolie	15

<b>5. RESULTATE</b>	<b>16</b>
5.1. Stärkefolie	16
5.2. Kombination von Stärkefolie und Polylactid	17
5.3. Schwefelzugabe	18
5.4. Schäumen von Stärke	19
5.5. Abbauversuche	19
5.5.1. Herkömmlichen Kunststoffe	19
5.5.2. Stärkefolie	19
<b>6. DISKUSSION</b>	<b>20</b>
6.1. Amylopektin, Amylose	20
6.2. Wasserbeständigkeit	20
6.3. Schwefelzugabe	20
6.4. Einfluss der Wassermenge	21
6.5. Einfluss des Glycerins	21
6.6. Abbauversuche	22
6.7. Verwendungsmöglichkeit	22
6.7.1. Verpackungsfolie	22
6.7.2. Stärke-Schaum	23
6.7.3. Klebstoff	23
6.8. Wirtschaftlicher Standpunkt	24
6.8.1. Stärke	24
6.8.2. Rohöl	24
6.8.3. Vergleich Stärke und Rohöl	25
<b>7. QUELLEN</b>	<b>26</b>
7.1.1. Im Text verwendete Literatur	26
7.1.2. Allgemeine Literatur	27

# 1. Vorwort

## 1.1. Motivation

In dieser Arbeit möchte ich mich mit biologisch abbaubaren Kunststoffen auseinandersetzen, insbesondere mit solchen auf der Basis von Stärke, welche ich aus Kartoffeln gewinne.

Das Bevölkerungswachstum in den letzten Jahrzehnten führte direkt auch zu einem Wachstum der Abfallmenge, unter anderem verursacht durch Verpackungsmaterial aus Kunststoffen. Da die herkömmlichen verwendeten Kunststoffe meist nicht abbaubar sind, sammeln sich immer grösser werdende Abfallberge, vorwiegend aus nicht mehr gebrauchten Kunststoffprodukten, an. Nicht abbaubar heisst, dass diese Kunststoffe über lange Zeit hinweg unverändert in der Natur liegen bleiben. Solche Berge häufen sich vor allem in der Natur an, so zum Beispiel an Stränden, Flussufern und in den Wäldern. Dieses Problem ist in der Schweiz bisher noch nicht allzu deutlich zu sehen, da es dank unserer Regierung und unserem Umweltbewusstsein bis anhin mehr oder weniger gut bewältigt werden konnte. Doch bei der Ausübung meines Sports, dem Rudern, in anderen europäischen Ländern wird einem diese Verschmutzung durch Kunststoffe erst richtig bewusst. Lange Flussabschnitte, vor allem die Ufer, sind mit Plastiksäcken, Folien und anderem Verpackungsmaterial überzogen.

Dieses Problem wurde in letzter Zeit diskutiert und nach Lösungen gesucht. Eine Möglichkeit wären abbaubare Kunststoffe. Diese Kunststoffe würden sich unter gegebenen Voraussetzungen resp. Bedingungen zersetzen.

## 1.2. Begriffsdefinition

Nun ist jedoch eine Begriffsdefinition von Nöten, denn was versteht man eigentlich unter biologisch abbaubar, degradierbar?

Darüber herrschen verschiedene Definitionen, die variieren können. Ich persönlich möchte folgende Definition verwenden:

“Als Biologisch abbaubar darf ein Kunststoff nur dann bezeichnet werden, wenn alle organischen Bestandteile einem durch biologische Aktivität verursachten vollständigen Abbau unterliegen. Zum Nachweis der biologischen Abbaubarkeit wurden spezielle Testverfahren entwickelt, die beim Abbau im aeroben Milieu auf

der Messung der CO<sub>2</sub>-Bildung bzw. der O<sub>2</sub>-Zehrung und im anaeroben Milieu auf der Messung der CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Bildung basieren“. [Roempp, Bioabbaubare Polymere]

Zur Kompostierbarkeit wird weiter geschrieben: “Der Nachweis der Kompostierbarkeit erfolgt gemäss DIN 54900-4. Nach dieser Norm wird zunächst der Werkstoff analysiert, dann die prinzipielle Abbaubarkeit geprüft und anschliessend die Kompostierbarkeit unter Praxisbedingungen untersucht. Bioabbaubare Polymere, welche die DIN-Prüfung erfolgreich durchlaufen haben, können nach DIN CERTCO zertifiziert und gekennzeichnet werden.“ [Roempp, Bioabbaubare Polymere]

## 2. Abstract

In dieser Arbeit wird der biologisch abbaubare Kunststoff auf Basis von Stärke untersucht. Er besteht aus feuchter Stärke, Wasser (dest.) und Glycerin. Das Glycerin dient als Weichmacher und zur Vernetzung. Es wurden Versuchsreihen durchgeführt, in denen die Anteile der verwendeten Stoffe variiert wurden. Das Ziel war eine optimale Mischung zu finden. Ausserdem sollte der Einfluss der verschiedenen Komponenten auf das Produkt gezeigt werden. Wasser beeinflusst die Dicke, Glycerin die Elastizität des Kunststoffes. Die nicht reissfeste Folie sollte verbessert werden. Dazu wurde eine Kombination mit Polylactid getestet, dies führte jedoch zu keinem Erfolg. Das Beimischen von Schwefel (etwa 0.5-1% Massenanteil der Stärke) ergab gute Resultate.

Es zeigte sich, dass 22ml Wasser, 2ml Glycerin (50% wässrige Lösung) und 0.02g Schwefel eine optimale, reissfeste Folie ergeben. Diese Folie kann enzymatisch abgebaut werden. Das heisst, Enzyme zersetzen die Folie, indem sie an bestimmten Verbindungen der Folie ansetzen und diese lösen. In mehreren Schritten wird so das hochmolekulare Produkt in niedermolekulare Stoffe umgewandelt. Als Endprodukte der Zersetzung bleiben Maltose und Glucose zurück.

## 3. Einleitung

### 3.1. Untersuchungsgebiet

Es soll ein bekannter biologisch abbaubarer Kunststoff gewählt und untersucht werden. Seine Abbaubarkeit soll bekannt sein. Untersucht werden soll er insbesondere auf seine Beschaffenheit und eine allfällige praktische Anwendung. Ebenfalls sollen seine Eigenschaften wenn möglich verändert und optimiert werden. Aus den Untersuchungen soll ebenfalls hervorgehen, welche Komponente (verwendete Chemikalie) welchen Einfluss auf das Produkt hat. Als Endprodukt soll eine vorgegebene Zusammensetzung für ein abbaubares Polymer speziell für eine Anwendung verbessert und abgeändert werden.

Da die Abbaubarkeit im Prinzip schon bekannt ist, wird diese nicht als zentrales Thema der Arbeit behandelt. Dennoch soll in einem kleinen Abbauversuch die Abbaubarkeit gezeigt werden.

Als Grundlage hierfür wurde eine Kunststoff-Folie auf Basis von Stärke gewählt.  
[Prof. Blume, Herstellung einer Folie aus Kartoffelstärke]

Die Stärke soll aus Kartoffeln verwendet werden, da dies eine heimische Pflanze ist, die in genügend grossen Mengen vorhanden ist. Die Stärkegewinnung aus Kartoffeln ist sehr effizient, dank des grossen Stärkeanteils in der Kartoffel und dem daraus folgenden grossen Stärkeertrag.

### 3.2. Ansprüche

Ein biologisch abbaubarer Kunststoff soll meiner Meinung nach folgenden Kriterien genügen, um eine industrielle Erfolgchance in der Zukunft zu haben:

- Ein abbaubares Polymer soll der DIN 103.2.3 entsprechen
- Der Kunststoff soll mit den heute üblichen Verfahren, möglichst auch den verwendeten Maschinen ver-/ bearbeitet werden können.
- Seine Herstellung / Verarbeitung soll keine fossilen Brennstoffe benötigen, darüber hinaus soll seine Herstellung nicht mehr Energie benötigen, als ein vergleichbarer nichtabbaubarer Kunststoff.
- Das Rohmaterial für das Polymer soll in genügenden Mengen vorhanden sein, es soll keine Knappheit daran herrschen.



- Das Polymer soll gesundheitlich unbedenklich sein, damit es auch als Verpackungsmaterial von Nahrungsmitteln verwendet werden kann.
- Bei der Produktion sollen keine umweltbedenklichen Abfälle oder Nebenprodukte entstehen.
- Das Produkt soll preislich konkurrenzfähig zu herkömmlichen Kunststoffen sein.

### 3.3. Theorie

#### 3.3.1. Stärke

Eine Kartoffel besteht zu etwa 18% aus Stärke. Stärke ist ein "komplex aufgebautes Kohlenhydrat mit der allgemeinen chemischen Formel  $(C_6H_{10}O_5)_n$ " [Microsoft Encarta, Stärke], wobei sich  $n$  zwischen 50 und mehreren tausend bewegt. Stärke ist auch in Maispflanzen, Reis und vielen anderen Getreide- sowie Knollenpflanzen anzufinden. Sie entsteht als Produkt der Photosynthese und dient als Energiespeicher in den Pflanzen. Uns Menschen dient die Stärke vor allem als Nahrungsmittel.

Stärke tritt in den zwei verschiedenen Molekülformen Amylose und Amylopektin auf.

#### 3.3.2. Amylose

Die Glucosemoleküle ( $C_6H_{10}O_5$ -Gruppen) sind in der Amylose zu einer weitgehend unverzweigten Kette verbunden, welche in Form einer spiralförmigen Helix auftritt. Diese Helix wird durch Wasserstoffbrücken gestützt. Amylose tritt zu etwa 20-30% in herkömmlicher Stärke auf. [Roempp, Amylose]

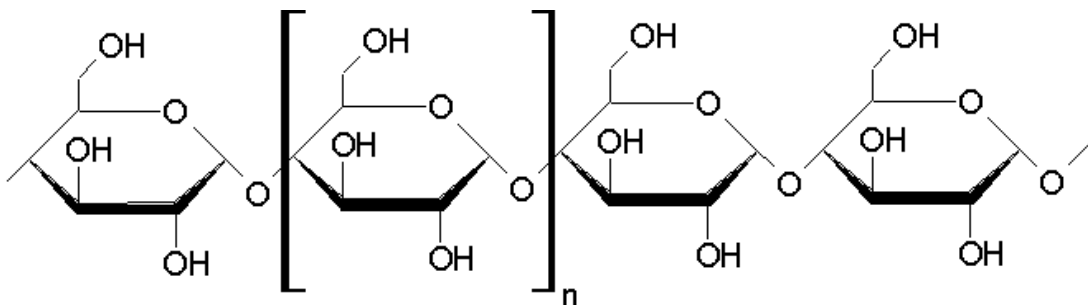


Abbildung 1: Aufbau von Amylose [<http://de.wikipedia.org/wiki/Amylose>]

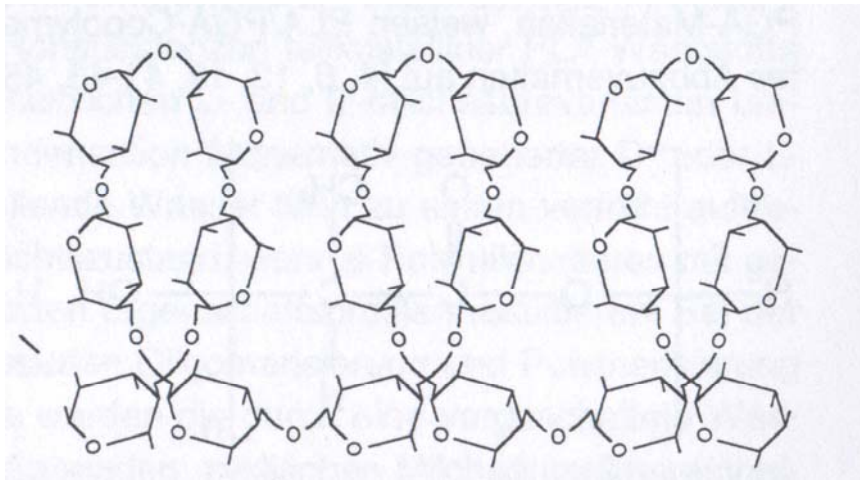


Abbildung 2: Struktur von Amylose [Aichholzer, p 20]

### 3.3.3. Amylopektin

Das Amylopektin ist ebenfalls verkettet, es bildet buschartige Verzweigungen aus. Diese Ketten sind jedoch einiges kürzer und beinhalten nur "20 bis 25 Glucoseeinheiten" [Microsoft Encarta, Stärke]. Der Anteil an Amylopektin in der Stärke schwankt sehr von Pflanze zu Pflanze. Kartoffelstärke verfügt über etwa 78% Amylopektin.

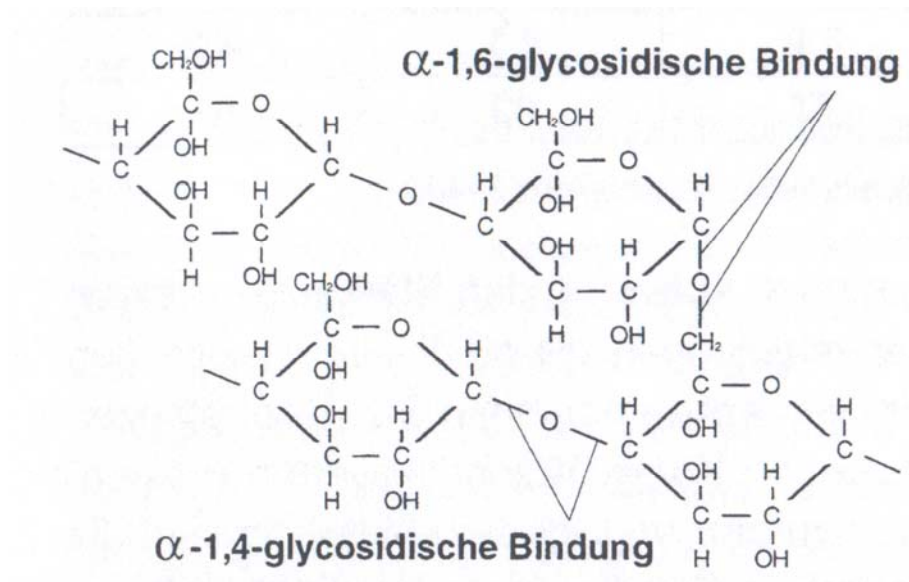


Abbildung 3: Aufbau von Amylopektin [Aichholzer, p 21]

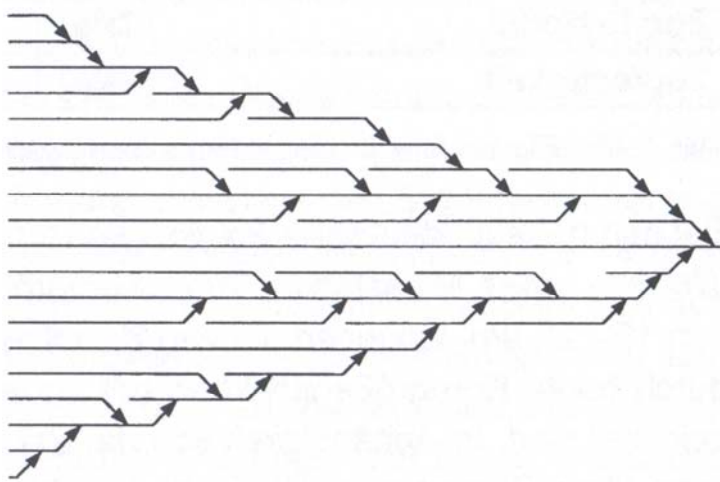


Abbildung 4: Struktur von Amylopektin [Aichholzer, p 21]

### 3.3.4. Verhältnis Amylose zu Amylopektin

Das Verhältnis zwischen Amylose und Amylopektin ist entscheidend für die Eigenschaften der Folie. Amylose ist filmbildungsfördernd, das heißt wichtig für die Ausbildung einer Folie. Das Amylopektin ist wichtig für die Bindekraft. Diese wird durch den höheren Vernetzungsgrad erreicht.

Mittels gentechnologischen Mitteln könnte man dieses Verhältnis von Amylose zu Amylopektin in Pflanzen regeln. Dadurch könnten spezifische Pflanzen für spezifische Anwendungen der Stärkefolie gezüchtet werden.

### 3.3.5. Entstehung der Folie

Eine Polykondensation unter Abspaltung eines Wassermoleküls ist bei der industriellen technischen Herstellung von Stärkefolien möglich. Dabei wird Aldehydstärke verwendet, eine partiell oxidierte Form der Stärke. Diese Produkte sind dann aber weniger gut abbaubar, darum möchte ich nicht weiter auf diese Art der Folienherstellung eingehen.

In dieser Arbeit wird herkömmliche Stärke verwendet. Stärke neigt im Allgemeinen schon zu einer Folienbildung. Damit die Stärke nicht kristallisiert und spröde wird, wird Glycerin beigemischt. [Prof. Blume, Von der Kartoffel zur Stärkefolie].

Glycerin (Propan-1,2,3-triol) verfügt über 3 Alkoholgruppen und erfüllt mehrere Funktionen bei der Gelbildung. Es schiebt sich zwischen die Stärkemoleküle und verhindert somit eine Kristallisation der Stärke. Glycerin hat ebenfalls starke hygroskopische Eigenschaften, das heißt es ist stark wasseranziehend. Dadurch wird die Folie immer etwas feucht und geschmeidig, elastisch gehalten. Im

weiteren ist das Glycerin fähig, Wasserstoffbrücken auszubilden. Gemäss Prof. Blumes Medienangebot werden die Stärkemoleküle (Amylopektin und Amylose) durch diese Wasserstoffbrücken besser zusammengehalten. Glycerin kann man also im Allgemeinen hier als Weichmacher bezeichnen.

Es ist erdenklich, dass beim Kochen der Stärke teilweise Glycerol zwischen den glycosidischen Bindungen eingebaut wird. Das heisst, das Glycerin vernetzt das Produkt in einem grösseren Grad. Somit würde die Stärke chemisch verändert. .

### 3.3.6. Abbau

Die Stärke wird zweistufig enzymatisch abgebaut. Iniziiert wird der Stärkeabbau (eine Stärkehydrolyse) durch  $\alpha$ - und  $\beta$ -Amylase. Diese Enzyme werden von den Bakterienstämmen "Arthrobacter" und "Lactobazillus Amylovorus" produziert. Über Oligosaccharide entstehen Dextrine und Maltosen, diese werden dann durch Glucoamylasen und weiteren Enzymen zu niedermolekularen Glucosen zersetzt. Siehe dazu Abbildung 5: enzymatischer Abbau von Stärke. Als Abbauprodukte bleiben Maltose und Glucose zurück.

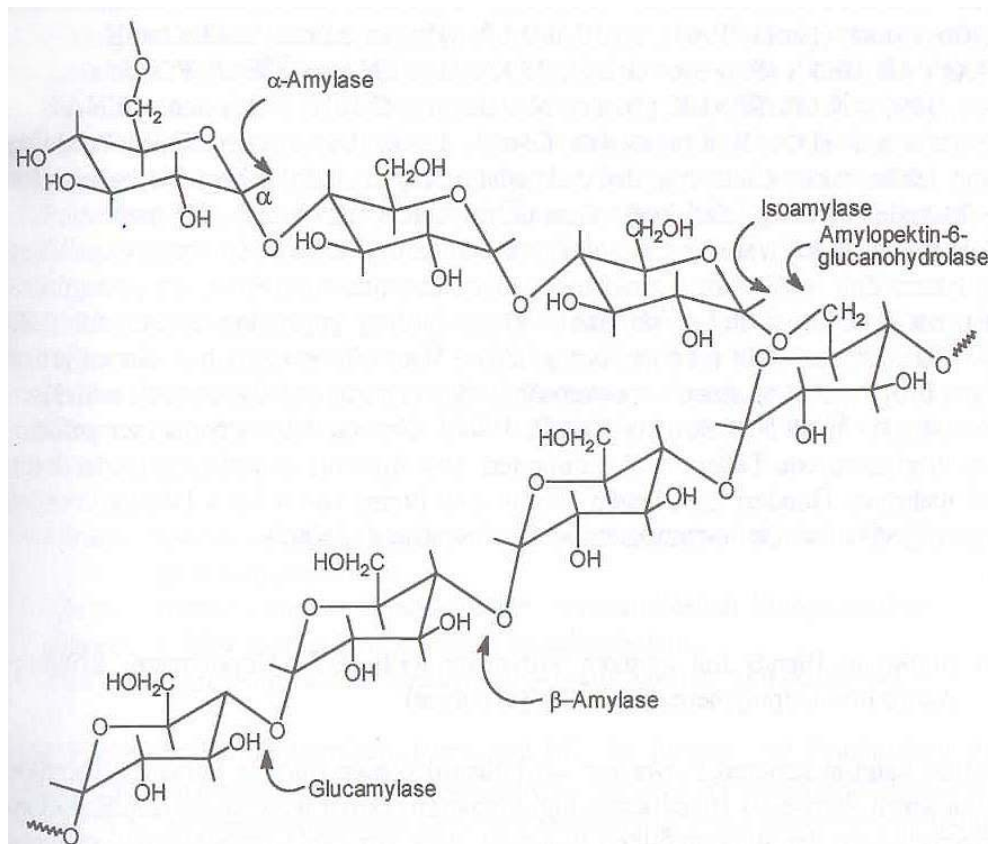


Abbildung 5: enzymatischer Abbau von Stärke

### 3.4. Kartoffeln vs. Mais und Weizen

	Weizen	Mais	Kartoffel
Amylosegehalt [mol-%]	25	24	23
Korndurchmesserspektrum [ $\mu\text{m}$ ]	20-40	10-20	20-175
Mittlerer Korndurchmesser	25	15	35
Feuchtegehalt [Gew.-%]	14	14	21
Verkleisterungstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	80-85	75-80	56-66
Zersetzungstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	180-230	180-230	180-230
Zugfestigkeit [MPa]	77	82	83

*Tabelle 1: Eigenschaftsprofile und Verarbeitungscharakteristika von nativen Stärken  
[W. Aichholzer, p22]*

In der Tabelle 1 sind für die Herstellung relevante sowie produktcharakterisierende Daten aufgelistet. Verglichen werden die Weizen-, Mais- und Kartoffelstärke. Es zeigt sich, dass in allen Pflanzen der Amylosegehalt gleich gross ist. Nachteilig in der industriellen Produktion wirkt sich bei der Kartoffel wohl das grosse Korndurchmesserspektrum aus, da in der Industrie möglichst mit Normgrössen gearbeitet werden will. Jedoch liegt die Verkleisterungstemperatur der Kartoffelstärke deutlich unter der von Weizen und Mais, was zu einer Energieeinsparung beim Erhitzungsprozess führt. Die Zugfestigkeit der Kartoffelstärke ist ebenfalls am grössten. Jedoch liegen Mais und Weizen nicht extrem unter dem Wert der Kartoffelstärke, was eine Verwendung von Maisstärke oder Weizenstärke nicht ausschliesst.

## 4. Material und Methoden

### 4.1. Kunststoff auf Basis von Stärke

#### 4.1.1. Herstellung der Stärke

Die Kartoffeln werden geschält und geraffelt. Danach werden sie mit Wasser aufgeschlämmt. Der Brei wird filtriert, um die Kartoffelmasse von der herausgelösten Stärke zu trennen. Die filtrierte Menge wird etwa 15 Minuten in einem Becherglas stehen gelassen. Nachdem eine Sedimentierung eingetreten ist (die Stärke setzt sich auf dem Boden ab), kann die überschüssige Flüssigkeit abdekantiert werden. [Brückmann, NMG 1]

In einem zweiten Ansatz werden die aufgeschlämmten Kartoffeln eine gewisse Zeit lang stehen gelassen, ohne dass die Masse zuvor filtriert wurde. Eine Sedimentierung tritt nach ca. 15min ein. Die Stärke setzt sich unten ab. Das Wasser kann abdekantiert, die Kartoffeln abgelöffelt werden. Ein erneutes Aufschwemmen und filtrieren durch ein einfaches Küchensieb trennt die Stärke schlussendlich ganz von den Kartoffelresten.



Abbildung 6: Sedimentation der Stärke

#### 4.1.2. Herstellung des Kunststoffes

In 20ml Wasser (dest.) werden 4.0g feuchte Stärke und 2.5ml Glycerin (50% wässrige Lösung) gelöst. Dann erhitzt man das Gemisch unter ständigem Rühren auf ca. 70°C. Verdunstet zuviel Wasser, so muss wieder Wasser zugegeben werden. Nach etwa 4-5 Minuten tritt eine Gelbildung ein und die Substanz bekommt eine gelartige Konsistenz. Nach dieser Reaktion wird der erhaltene Kunststoff auf eine Plexiglasscheibe ausgeschüttet und verstrichen. Das noch überschüssige Wasser dampft nach etwa 24h vollkommen ab, und es bleibt eine Folie zurück. [Prof. Blume, Versuch 3: Herstellung einer Folie aus Kartoffelstärke]

### 4.1.3. Bedeutung des Glycerins

In diesem Versuch wird 5.5g Stärke auf 50ml Wasser verwendet. Es werden 3 Proben hergestellt, mit 0, 3 und 6 ml Glycerin. Dieses Vorgehen soll die Bedeutung und die Auswirkungen des Glycerins aufzeigen.

### 4.1.4. Variation der Parameter

Um die Eigenschaften des Produkts zu verändern werden der Glycerin- sowie Wasseranteil variiert. Der Stärkeanteil bleibt konstant, er bestimmt lediglich die Masse des Produkts. Um einen eventuellen Einfluss von Schwefel (Schwefelbrücken) auf das Produkt zu testen, wird ebenfalls mit einer Schwefelzugabe variiert. Die Konzentrationen sind aus der Tabelle 2 zu entnehmen.

Probe Nr.	Stärke [g]	Glycerin [ml]	Schwefel [g]	Wasser [ml]
1	4.01	0.2	0.14	22
2	4.06	0.2	0.06	22
3	4.00	0.2	0.02	22
4	4.09	0.2	0.14	35
5	4.10	0.2	0.06	35
6	4.10	0.2	0.02	35
7	4.05	0.1	0.14	22
8	4.00	0.1	0.06	22
9	4.06	0.1	0.02	22
10	4.00	0.1	0.14	35
11	4.05	0.1	0.06	35
12	4.02	0.1	0.02	35

*Tabelle 2: Variation der Parameter*

## 4.2. Schäumen des Stärkekunststoffes

Man gibt dem Stärkekunststoff nach dem Erhitzen ein Treibmittel (hier Backpulver) hinzu. Das Treibmittel wird in die gelartige Masse rasch eingerührt. Zur Verbesserung des Resultates wird der Schaum anschliessend in ein vakuumiertes Gefäss gegeben, in dem er dann aushärtet. Die Konzentration des Treibmittels wird variiert. Die Parameter sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Probe Nr.	Stärke [g]	Glycerin [ml]	Schwefel [g]	Wasser [ml]	Backpulver [g]
13	4.02	0.01	0.06	30	0.68
14	4.00	0.01	0.14	30	0.71
15	4.11			20	

*Tabelle 3: Backpulverzugabe*



*Abbildung 7: Aushärten im Vakuum*

### 4.3. Polylactid

Zu 4.5ml Lactid wird eine kleine Spatelspitze Zinn(II)-Chlorid als Katalysator hinzugefügt. Das Gemisch wird in einem Reagenzglas unter konstantem Schütteln über einer Flamme erhitzt. Nach etwa 10min tritt eine Polymerisation ein. [Brückmann, PM5]

### 4.4. Stärkefolie und Polylactid

Um die Eigenschaften der Stärkefolie und des Polylactids zu kombinieren, werden die beiden Kunststoffe vermengt. Das sehr feste, jedoch auch brüchige Polylactid soll die Stärkefolie reissfester machen. Parallel wird Stärke (4.03g Stärke, 20ml Wasser, 1.25ml Glycerin) und Lactid polymerisiert. Vor dem Ausgießen des Stärkekegels werden die beiden Substanzen zusammengerührt.



## **4.5. Abbauprobungen**

### **4.5.1. Herkömmliche Kunststoffe**

Es wurden handelsübliche Produkte aus den Kunststoffen Polyethylen, Polypropylen, Polyvinylchlorid und Polystyrol in Blumentöpfen mit Erde aus dem Garten bedeckt. Die aus dem Garten verwendete Erde wird käuflicher Blumenerde vorgezogen, da die Blumenerde meist desinfiziert ist und über keine Bakterien verfügt. Bakterien sind jedoch erwünscht, schließlich sollen sie den Kunststoff zersetzen. Die Versuchstöpfe wurden über einen Zeitraum von 2 Monaten hinweg täglich mit Wasser benetzt, damit die Erde immer schön feucht blieb.

### **4.5.2. Stärkefolie**

Die Rückstände in den Bechergläsern der Proben Nr. 1-12 wurden mit Wasser aufgefüllt. Zuvor wurden die aus der Stärkegewinnung zurückgebliebenen Kartoffelrückstände in Wasser 2 Tage stehen gelassen. Es setzte sich ein schwarzer Pilz darauf ab, welcher in die Bechergläser mit den Kunststoffrückständen gegeben wurde. Diese Versuchsanordnung wurde über 3 Wochen hinweg stehen gelassen.

## 5. Resultate

### 5.1. Stärkefolie

Die anfänglich hergestellte Stärkefolie war für die praktische Verwendung zu brüchig (ohne Glycerin) und zu flüssig (mit Glycerin). Während des Erhitzens trat keine richtige Gelbildung ein. Die Substanz blieb sehr flüssig, wurde nicht gelartig. Um etwas nachzuhelfen wurden 2-3 Spatelspitzen Gelatine hinzugefügt. Die ausgegossene Masse zeigte aber auch nach mehreren Wochen keine Folieneigenschaften. Es wurde kommerzielle Stärke von der Firma Fluka (Dextrin from potato starch 31400, EG/EC Nr. 2326754) verwendet.

Der Versuch wurde mehrmalig wiederholt unter Ausschluss jeglicher Fehlerquellen. So wurde zuerst über eine Fehlfunktion der Heizplatte, respektive eine zu geringe Heizleistung der Heizplatte nachgedacht und zur Abhilfe ein Bunsenbrenner verwendet. Es wurde mit der Gelatinemenge variiert, jedoch stellte sich auch hier der Erfolg nicht ein.

Trotzdem konnte der Einfluss und die Bedeutung des Glycerins deutlich gezeigt werden. Die Masse ohne Glycerin wurde nach einiger Zeit trocken und ganz spröde (Abbildung 8). Die Massen mit Glycerin sind sehr klebrig. Je grösser der Glycerinanteil, desto klebriger war auch die Masse. Dies spricht dafür, dass Glycerin als Weichmacher des Kunststoffes fungiert (Abbildung 9).



*Abbildung 9: Stärkefolie ohne Gelbildung*



*Abbildung 8: Stärkefolie ohne Glycerin*

Nach diesem anfänglichen Misserfolg ohne eine mögliche Fehlerquelle bis auf die Stärke selber gefunden zu haben, wurde entschieden die Stärke selber herzustellen. Eine Anleitung dazu war schnell gefunden [Brückmann, NMG1]. Jedoch führte diese Methode zu einem nur minimalen Stärkegewinn. Aus 137g geschälten und geraffelten Kartoffeln konnten nur 1.61g Stärke gewonnen werden. Bedenkt man, dass Kartoffeln zu 18% aus Stärke bestehen, muss davon ausgegangen werden, dass das verwendete Filterpapier den grössten Anteil der Stärke zurückgehalten hat. Nach einigem Überlegen war eine Lösung des Problems gefunden, indem man die aufgeschwemmten Kartoffeln sedimentieren liess (siehe Material und Methoden). Durch dieses Vorgehen konnte immerhin aus 951g Kartoffeln 70.70g Stärke gewonnen werden, was für etwa 17 Proben reicht. Die total verwendeten Kartoffeln enthielten theoretisch in etwa 171g Stärke, die Ausbeute lag also bei etwa 40%. Dieser Wert kann bei einem industriellen, optimierten Vorgehen bestimmt maximiert werden.

Der Versuch zur Herstellung der Folie wurde wiederholt. Bereits nach ca. 5min wechselte der Ansatz seine Konsistenz schlagartig von flüssig zu gelartig. Das Problem scheint also tatsächlich an der Stärke gelegen zu haben.

Die gewonnene reine Kartoffelstärkefolie besitzt gute Eigenschaften, durch den relativ hohen Glycerinanteil (5ml Glycerin auf 8.13g Stärke und 40ml Wasser) wird die Folie sehr elastisch und zu einem gewissen Grad klebrig. Leider weist sie aber keine gute Reissfestigkeit auf. Um diese Eigenschaft zu verbessern wird später versucht die Folie mit Polylactid, dann auch mit Schwefel zu mischen.

## **5.2. Kombination von Stärkefolie und Polylactid**

Die Kombination von Stärkefolie und Polylactid ergab kein homogenes Gemisch. Vielmehr entstand eine Stärkefolie mit kleinen Polylactideinlagerungen. Die Folie ist zudem kaum von der Unterlage wegzubringen. Allfällige Parameteränderungen und weitere Versuche könnten die Eigenschaften eventuell verbessern, doch versprechen die Resultate der Schwefelbeigabe viel mehr.

### 5.3. Schwefelzugabe

Die ersten Versuche der Schwefelbeigabe ergaben eine viel reissfestere und bruchfestere Folie, zudem bleibt die Elastizität erhalten. Jedoch scheint der anfängliche Schwefelanteil zu gross zu sein, da sich heterogene Schwefelklumpen gebildet haben. Motiviert durch diesen Erfolg werden nun der Schwefelanteil in 3 Schritten, der Wasseranteil sowie der Glycerinanteil in 2 Schritten variiert. Siehe dazu Tabelle 2. Die trockenen Kunststoffe wurden qualitativ beurteilt. Dabei wird eine Skala von 1 bis 3 verwendet, wobei 3 die beste Wertung ist. Siehe dazu Tabelle 4.

Probe Nr.	Stärke [g]	Glycerin [ml]	Schwefel [g]	Wasser [ml]	Elastizität	Zugfestigkeit	Reissbarkeit	Pkt. Total
1	4.01	2.00	0.14	22	2	3	3	8
2	4.06	2.00	0.06	22	2	3	2	7
3	4.00	2.00	0.02	22	3	3	3	9
4	4.09	2.00	0.14	35	3	2	3	8
5	4.10	2.00	0.06	35	3	1	1	5
6	4.10	2.00	0.02	35	3	2	3	8
7	4.05	1.00	0.14	22	2	2	1	5
8	4.00	1.00	0.06	22	2	3	1	6
9	4.06	1.00	0.02	22	2	3	1	6
10	4.00	1.00	0.14	35	1	3	1	5
11	4.05	1.00	0.06	35	1	3	1	5
12	4.02	1.00	0.02	35	1	3	1	5

*Tabelle 4: qualitative Bewertung der Proben*



*Abbildung 10: Stärkefolie mit Schwefel*

## **5.4. Schäumen von Stärke**

Der erste Versuch zur Schäumung der Stärkefolie lieferte keinen Erfolg. Zur Verbesserung wurde der Versuch wiederholt, wobei das Produkt unter Vakuum zum Aushärten gebracht wurde. Durch das Vakuum sollte der Schaum nicht wieder in sich zusammenfallen. Dies geschah dennoch.

## **5.5. Abbauversuche**

### **5.5.1. Herkömmlichen Kunststoffe**

Die vergrabenen Kunststoffe zeigten keine klar erkennbaren Erscheinungen eines Abbaus. Obwohl sie etwas verdreht waren, entsprachen sie mehrheitlich der Ausgangsform

### **5.5.2. Stärkefolie**

Nach 3 Wochen war das Wasser vollkommen verdampft. Der Pilz hat sich auf den zurückgebliebenen Kunststoffresten angesetzt. Die Resten zeigten erste Erscheinungen eines Abbaus, die Oberfläche zeigte verschieden grosse Löcher auf. Zudem waren alle Proben spröder als die Ausgangsform. Ein möglicher Einfluss der Schwefelmenge auf den Abbau war nicht zu erkennen.

## 6. Diskussion

### 6.1. Amylopektin, Amylose

Der Misserfolg mit der anfänglichen Folienherstellung lag eindeutig an der industriellen Stärke. Diese Stärke enthält im Gegensatz zur selber gewonnenen Stärke praktisch kein Amylopektin, welches für die Folienbildung sehr wichtig ist. Amylopektin und Amylose sind Bestandteile der Stärke. Sie bestimmen die Eigenschaften des Kunststoffes. Das Fehlen der Amylose hat gezeigt, dass ohne diese keine Folienbildung möglich ist.

### 6.2. Wasserbeständigkeit

Die Stärkefolie ist nicht sehr wasserbeständig. In Wasser quillt die Folie auf und wird zu einem gewissen Grad wieder gelförmig. Eine Schwefelbeigabe ändert diese Eigenschaft nicht. Dies ist ein Vorteil beim Abbau in der Natur, sowie bei gewissen Anwendungen. Hier als konkretes Beispiel als Verpackung von vorportioniertem Waschmittelpulver, welches dann mitsamt Verpackung in die Waschmaschine gegeben werden kann. Bei anderen Anwendungen kann sich diese Eigenschaft jedoch auch als Nachteil erweisen. Chemische Veränderung, Behandlung des Kunststoffes können ihn hydrophob machen, so zum Beispiel eine Silanisierung. [Prof. Blume, Versuch 4: Silanisierung von Stärkefolie] Jedoch sollte dabei darauf geachtet werden, dass das neu erhaltene Produkt ebenfalls biologisch abbaubar ist, ohne dass allfällige Schadstoffe zurückbleiben.

### 6.3. Schwefelzugabe

Die Zugabe von Schwefel hat zu einem deutlich reissfesteren Produkt geführt. Dies ist wohl auf die Bildung von Schwefelbrücken zurückzuführen.

Die Variation der Parameter hat jedoch in Bezug auf die Reissfestigkeit in Abhängigkeit des Schwefels keine grossen Unterschiede ergeben. Daraus lässt sich ableiten, dass auch noch die im Experiment kleinste verwendete Menge Schwefel durchaus genügend ist. Sinnvollerweise wäre in einem weiteren Versuch die genaue Mindestmenge Schwefel zu eruieren. Eine quantitative Messung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Schwefelbeigabe wäre ebenfalls interessant.

Nachteilig wirkt sich der Schwefel wohl in Bezug auf die Naturverträglichkeit aus. Zu grosse Mengen an Schwefel in der Natur würden unter anderem zu bekannterweise saurem Regen führen. Jedoch würde auch eine grosse Produktion dieses Kunststoffes keinen Einfluss auf die aktuelle Lage haben, im Vergleich zu Diesel, respektive Heizöl. Eine minimale Schwefelbeigabe wäre sinnvoll, jedoch müsste auch über eine alternative Methode zur Verbesserung der Reissfestigkeit nachgedacht werden.

#### **6.4. Einfluss der Wassermenge**

Durch den grösseren Wasseranteil wurde das Gel flüssiger, es liess sich leichter ausgiessen. Die geringere Viskosität führte dazu, dass das Gel besser, sowie dünner auf der Plexiglasunterlage zerfloss. Die daraus erhaltene Folie wurde dementsprechend auch dünner. Über den Wasseranteil kann also die Dicke der Folie reguliert werden.

#### **6.5. Einfluss des Glycerins**

Bereits in den ersten Versuchen hat sich gezeigt, dass sich das Glycerin direkt auf die Härte, respektive die Elastizität der Folie auswirkt. Nach einiger Zeit blieb die Substanz, welche kein Glycerin enthielt, als spröde zerklüftete Masse zurück. Je höher der Glycerinanteil war, desto klebriger und leimartiger war das Produkt. In den späteren Versuchen hat sich gezeigt, dass sich die Eigenschaften der Folie sehr gut über den Glycerinanteil steuern lassen. Will man eine härtere, weniger elastische Folie, so senkt man den Glycerinanteil. Senkt man ihn jedoch zu sehr ab, so wird die Folie spröde. Je höher der Glycerinanteil, desto weicher, elastischer und auch klebriger wird die Folie. Diese Klebrigkeit kann je nach Verwendungszweck des Produktes gewünscht sein. Um diese Eigenschaft jedoch zu verhindern, kann über eine Verwendung von höherwertigen Alkoholen (Polyole) nachgedacht werden. In einem weiteren Versuch wäre es sinnvoll, das Glycerin durch andere Polyole zu ersetzen, und die Auswirkungen davon festzuhalten.

## 6.6. Abbauprobieren

Dass die herkömmlichen Kunststoffe innerhalb zwei Monaten keine Abbauprobieren aufzeigten ist weiter nicht verwunderlich. Es ist allgemein bekannt, dass diese Kunststoffe über lange Zeit hinweg bestehen bleiben. Die Enzyme der Bakterien können keine C-C Ketten spalten.

Der Abbauprobieren der Stärkefolie hat gezeigt, dass die Schwefelmenge im hier verwendeten Rahmen keinen Einfluss auf den Abbau hat. Es wurde auch gezeigt, dass die Folie abgebaut werden kann. Der vollkommene Abbau konnte aufgrund des Zeitmangels nicht gezeigt werden. Es steht auch zur Frage, ob alle für den vollständigen Abbau benötigten Bakterien anwesend waren. Jedoch war es auch nicht das Ziel dieser Untersuchung den Abbau nachzuweisen. Er sollte lediglich in einem gewissen Masse aufgezeigt werden, um einen allfälligen Einfluss des zugefügten Schwefels aufzuzeigen.

## 6.7. Verwendungsmöglichkeit

### 6.7.1. Verpackungsfolie

Die Versuche haben gezeigt, dass die Stärkefolie gute Eigenschaften aufweist, die einen Verwendungszweck als Frischhaltefolie ermöglichen. Die Folie ist elastisch, dünn und haftet an sich selbst, was ein Einpacken ermöglicht.

Oft werden zum Beispiel selbst belegte Brötchen auf dem Pausenhof, auf Exkursionen, im Freien verzehrt. Nicht jeder bringt das Verpackungsmaterial zum nächsten Mülleimer, meist ist das achtlose Wegwerfen in die Natur der schnellere und bequemere Weg. Dort bleibt dann das heutzutage verwendete Polyethylen auf unbestimmt lange Zeit liegen, da es sich bekanntlich kaum abbaut.

Hier eingesetzte Stärkefolie ist sinnvoll, da sie in der Natur abgebaut wird. Das unüberlegte Fortwerfen der Stärkefolie ist dennoch nicht zu fördern, jedoch wären die Auswirkungen davon weniger schlimm. Sinnvoller als das Fortwerfen wäre eine Kompostierung. Die Biomasse kommt wieder an ihren ursprünglichen Ort zurück, der Kreislauf ist geschlossen und CO<sub>2</sub>-neutral. Es wird beim Abbau nicht mehr CO<sub>2</sub> freigesetzt, als die ursprüngliche Pflanze zuvor dem Kreislauf entzogen hat.



Als Verpackungsfolie die in der Natur abgebaut werden soll, ist eine herkömmliche Stärkefolie ohne Schwefelzugabe wohl ideal.

Für eine reissfestere, wohl etwas weniger naturverträglichere (aufgrund der Schwefeleinlagerungen) Folie stellte sich die Probe Nr. 3 als beste Kombination heraus. Siehe dazu Tabelle 4. Sie verfügt über die grösste Punktzahl und ist in allen getesteten Bereichen überzeugend.

Ist für eine Anwendung eine stabilere, unelastischere Folie gefragt, so kommen die Proben Nr. 10-12 in Frage. Probe Nr. 12 ist hier zu bevorzugen, da sie mit der kleinsten Menge an Schwefel auskommt. Eine kleinere Menge Schwefel bedeutet eine grössere Bioverträglichkeit sowie günstigere Produktionskosten.

### **6.7.2. Stärke-Schaum**

Der Versuch zur Aufschäumung des Stärkegels blieb erfolglos. Der Kunststoff müsste schneller aushärten, sowie bereits beim Ausgiessen über eine gewisse Mindeststabilität verfügen, damit er nicht in sich zusammenfällt. Als Treibmittel erwies sich Backpulver als geeignet, es führte zu dem gewünschten Effekt. Da das Backpulver vor allem bei höheren Temperaturen aktiv ist, ist es auch ideal für den Produktionsprozess geeignet, da es in das noch heisse Stärkegel eingerührt wird.

### **6.7.3. Klebstoff**

Im Weiteren könnte man eine Verwendung des Stärkegels als wasserlöslichen Klebstoff überprüfen. Das Produkt sollte sehr reissfest und klebrig sein, ein hoher Schwefel und Glycerinanteil wären angebracht. Die Wassermenge müsste auf die Anwendung bezogen ermittelt werden. Ein grösserer Wasseranteil führt zu einem flüssigeren Klebstoff, jedoch dauert der Trocknungsprozess auch entsprechend länger, bei dem das mehr enthaltene Wasser verdampfen muss. Dieser Klebstoff ist jedoch nur industriell verwendbar, er muss direkt nach dem Erhitzen verarbeitet werden.

## 6.8. Wirtschaftlicher Standpunkt

### 6.8.1. Stärke

Momentan wird in der EU Stärke im Übermass produziert. Eine Verwendung der Stärke als Basismaterial für einen Kunststoff ist demzufolge auch wirtschaftlich gesehen nicht problematisch, der hierzulande produzierte Überschuss kann sinnvoll verwendet werden. Es bleibt die ethische Frage, ob es richtig ist, überschüssig produzierte Nahrung für andere Zwecke zu verwenden, während in anderen Regionen täglich Menschen in Hungersnot sterben. Der Preis der Stärke kann auch in der Zukunft als stabil betrachtet werden.

Der Mindestpreis für Stärke liegt bei 178.31 €, umgerechnet 213 USD pro Tonne. [<http://www.starch.dk>, Arable Crops: Prices and Payments]

### 6.8.2. Rohöl

Rohöl wird für die Herstellung der gebräuchlichen petrochemischen Kunststoffe gebraucht. Der Vorrat an fossilen Brennstoffen wird in Zukunft immer knapper. Es wird darüber gestritten wann die Rohölvorräte vollkommen aufgebraucht sind, es steht aber fest, dass sie in nicht allzu ferner Zukunft aufgebraucht sein werden.

Spätestens seit den Oelkrisen in den 70er-Jahren hat sich gezeigt, dass der Oelpreis auch von politischen Einflüssen abhängig ist, und stark ansteigen kann.

Für die Zukunft wird ein tendenziell steigender Rohölpreis prognostiziert. Diese Tatsachen zeigen auf, dass Rohöl keine zukunftssichere Ressource ist.

Das Barrel Rohöl (159.1 Liter) beläuft sich momentan auf 60.54 USD (Stand: 23.02.06) [Finanz und Wirtschaft, 25.02.2006, p M13, Rohstoff-Futures]. Rechnet man mit einer mittleren Dichte von  $869 \text{ kg/m}^3$  [<http://www.vs-c.de/>, Klassifizierung Rohöl] erhält man 438 USD pro Tonne Rohöl.

### 6.8.3. Vergleich Stärke und Rohöl

Kunststoffe auf der Basis von Stärke haben im Vergleich zu denjenigen aus Rohöl klar den Vorteil, dass auch in Zukunft genügend Stärke als Rohstoff vorhanden sein wird. Wie aus den vorangehenden Angaben herausgeht liegt der Rohstoffpreis von Stärke (213 USD / t) deutlich unter dem von Rohöl (438 USD / t). Die Herstellung petrochemischer Polymere erfordert einen enorm hohen Energieaufwand. Bei der Herstellung von Stärkefolien muss im Prinzip der Ansatz lediglich erhitzt werden, der Energieverbrauch liegt unter dem von petrochemischen Polymeren.

Aus diesen Gründen sind stärkebasierende Polymere gegenüber den petrochemischen als wirtschaftlich und ökologisch überlegen anzusehen.

Eine Ablösung der heutzutage mehrheitlich verwendeten petrochemischen Kunststoffe wird in Zukunft aufgrund der ausgehenden Oelressourcen nötig sein. Ein möglicher Ersatz dafür können biologisch abbaubare Kunststoffe auf Basis von nachwachsenden, pflanzlichen Rohstoffen sein. Diese Tendenz zeichnet sich bereits heute ab, man trifft immer häufiger abbaubare Polymere im Alltag an. Um die Verbreitung dieser Kunststoffe zu fördern wird auch in Zukunft weiterhin eine Investition in die Erforschung dieser Substanzen erforderlich sein. Junge motivierte Forscher sind gefragt!

## 7. Quellen

### 7.1.1. Im Text verwendete Literatur

1. *Biologisch abbaubare Polymere*,  
Wolfram Tänzer, VG-Verlag, 2000
2. *Herstellung, Verarbeitung sowie Charakterisierung von bioabbaubaren Verbundwerkstoffen auf Basis der nachwachsenden Rohstoffe Stärke und Flachs*  
Walter Aichholzer, Institut für Kunststofftechnologie Uni Stuttgart, 1999
3. *Experimente zu Makromolekülen*,  
Arbeitskreis im Kölner Modell am Institut für Anorganische Chemie der Universität Köln, Redaktion Jutta Brückmann
4. *Finanz und Wirtschaft*  
Nr. 15, 25. Februar 2006, 79. Jahrgang
5. *Roempp, Thieme Chemistry*  
[www.roempp.de](http://www.roempp.de)
6. *Prof. Blumes Medienangebot: Von der Kartoffel zu Stärkefolie*  
[http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/nachwroh/nrt\\_01.htm](http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/nachwroh/nrt_01.htm)
7. *Freie online Enzyklopädie*  
[www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de)
8. *International Starch Institute*  
<http://www.starch.dk/isi/market/EUtm.htm>

9. *Vernetztes Studium Chemie*

<http://www.vs-c.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/erdoel/rohoel/rohoel.vlu/Page/vsc/de/ch/10/erdoel/rohoel/klassifizierung/klassifizierung.vscml.html>

10. *Microsoft Encarta Enzyklopädie Plus 2002*

**7.1.2. Allgemeine Literatur**

11. *Chi CD v2.0*

Dr. sc. Nat. Christian Ammann, Workshop Software Labs 2001

12. *Chemie heute, Teil 2 Organische Chemie*

Wolfgang Asselborn, Schroedel-Verlag, 2005