

Lehrerinformation zum Stoffkreislauf: Recycling/Kompostierung

Inhalt

1	Einleitung	2
2	Recycling von Kunststoffen	5
2.1	Versuche zum Recycling von Kunststoffen	5
<i>Versuch 1.1</i>	<i>Umformen von Polystyrol und Herstellung einer Polystyrol-Folie</i>	5
<i>Versuch 1.2</i>	<i>Wiederaufschäumen von Polystyrol</i>	7
<i>Versuch 2.1</i>	<i>Synthese von PLA und Herstellung einer PLA-Folie</i>	7
Versuch 2.2	Abbau der PLA durch Hydrolyse	9
<i>Versuch 3.</i>	<i>Herstellung einer Stärkefolie</i>	9
3	Kompostierung von Kunststoffen	12
3.1	Versuche zur Kompostierung von Kunststoffen	12
<i>Versuch 4.1</i>	<i>Kompostierung einer Polystyrol-, PLA- und Stärkefolie</i>	12
<i>Versuch 4.2</i>	<i>Kompostierung der drei Folien und anschließender qualitativer CO₂-Nachweis</i>	14
4	Schlussbemerkung zum Stoffkreislauf Recycling/ Kompostierung von Kunststoffen	16
5	Quellenverzeichnis	17

1 Einleitung

Müll ist Rohstoff zur falschen Zeit am falschen Ort. Die Wieder- und Weiterverwendung von Abfällen jeglicher Art nennt man **Recycling**. Durch die Anwendung von Recyclingverfahren werden weniger Deponien oder Müllverbrennungsanlagen benötigt und geringere Mengen umweltbelastender Stoffe freigesetzt. Zusätzlich werden Rohstoffe eingespart, was sich in der heutigen Zeit infolge der Knappheit der Ressourcen und Rohstoffe positiv auswirkt.

Recycelt werden Glas, Papier, Kartonagen, Metalle, wie Eisen und Aluminium, und Kunststoffe. Die Voraussetzung ist die sortenreine Trennung von Abfällen. Im Folgenden wird nur auf die Wiederverwertbarkeit von Kunststoffen eingegangen.

Beim Kunststoffrecycling unterscheidet man zwischen drei Verfahren:

- Werkstoffliches (physikalisches) Recycling
- Rohstoffliches Recycling
- Energetisches (thermisches) Recycling

Unter werkstofflichem Recycling versteht man das Nutzen von Altkunststoffen unter weitgehender Wahrung der stofflichen Eigenschaften. Hierzu gehört z.B. das Umformen von Kunststoffen.

Beim rohstofflichen Recycling gewinnt man durch Zerlegen der Makromoleküle in kleinere Moleküle neue Rohstoffe, die zur chemischen Synthese dienen können.

Das thermische Recycling bezeichnet die Verbrennung von Altkunststoffen unter Nutzung der dabei entstehenden Wärmeenergie.

Die meisten Kunststoffe werden aus Erdöl hergestellt. Doch dieser fossile Rohstoff steht nicht unbegrenzt zur Verfügung. Diese Begrenztheit fossiler Rohstoffe, die allgemeine Diskussion treibhausrelevanter Gase und die Probleme in der Abfallwirtschaft trugen dazu bei, dass verstärkt nachwachsende Rohstoffe zur Herstellung von Biopolymeren zum Einsatz kommen. Diese makromolekularen Stoffe werden „Biokunststoffe“ (aus dem Englischen kommend: *bioplastics*) genannt und sind meistens biologisch abbaubar bzw. können durch **Kompostierung** in Anwesenheit von Sauerstoff, Feuchtigkeit und Mikroorganismen oder Pilzen weitgehend zu Wasser und Kohlenstoffdioxid (CO₂) abgebaut werden. Die wichtigsten unter ihnen sind Cellulose, Cellulosederivate, Stärke und Stärkederivate. Neben den „Biokunststoffen“ und den (Voll)synthetischen Kunststoffen existieren die Halbsynthetischen Kunststoffe, wie z.B. die Polymilchsäure (Polylactat, PLA), die durch Modifikation von aus der Natur kommenden Rohstoffe (Stärke) hergestellt wird. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick der organischen makromolekularen Stoffe mit einigen Beispielen (Tab-1).

Tab. 1: Kategorien organischer makromolekularer Stoffe mit Beispielen und Stoffklasse

Kategorie	Beispiele	Stoffklasse
Makromolekulare Naturstoffe (Biopolymere)	Stärke , Cellulose Seide, Wolle Lignin (im Holz) Kautschuk DNA (Träger d. Erbinformation)	Polysaccharide (Kohlenhydrate) Proteine (Eiweiß) Phenylpropane Polyterpen Nucleinsäuren
Halbsynthetische Kunststoffe (modifizierte Biopolymere)	PLA (Polylactat) Celluloid (Cellulosenitrat), Stärke- und Cellulosederivate, Vulkanfieber (pergamentierte Cellulose) Kunsthorn (mit Formaledhyd vernetztes Casein) Gummi (vulkanisierter Kautschuk)	Polysaccharide (Kohlenhydrate) Proteine (Eiweiß) Polyterpen
(Voll)synthetische Kunststoffe* (<i>de-novo</i> -Synthese-i.d.R. auf Erdölbasis)	Polystyrol (PS) Polyethylen (PE) Polyvinylchlorid (PVC) Perlon, Nylon (Helanca; Polyethylenterephthalat (PET) Polyacrylat (Plexiglas, Acrylfasern)	Aromatischer Kohlenwasserstoff gesättigter Kohlenwasserstoff chlorierter Kohlenwasserstoff Polyamide Polyester Polycarbonat

Die Hauptanwendungen biologisch abbaubarer Kunststoffe in Europa liegen im Verpackungs- und Cateringbereich. Daneben existieren Anwendungen in der Landwirtschaft und im Gartenbau sowie im Pharma- und Medizinbereich. Bereits in relativ breitem Umfang eingeführt sind Produkte wie:

- Abfallsäcke
- Tragetaschen
- Einweggeschirr (Becher, Tassen, Teller, Besteck)
- Verpackungsfolien
- Flaschen
- Obst- und Gemüseschalen
- Verpackungshilfsmittel (Loose-fill-Chips)
- Expandierte Schäume

- Mulchfolien

In Asien tauchen darüber hinaus vermehrt Anwendungen im technischen Bereich auf – etwa als Handy- oder PC-Gehäuse.

Die folgende Abbildung (s. Abb. 1) zeigt den Kreislauf von biologisch abbaubaren Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe. Sie werden in der Pflanze synthetisiert und gleichzeitig Wasser und CO₂ aus der Atmosphäre entnommen. Anschließend erfolgt die Aufarbeitung des Pflanzenmaterials zur Herstellung von biologisch abbaubaren Polymeren, die wiederum für die Herstellung von z.B. Verpackungen verwendet werden können. Nach der primären Nutzung der Verwendung können die durch Kompostierung abgebaut werden. Dabei entstehen Abbauprodukte (Kompost, Wasser, CO₂, Energie), mit denen die Pflanze wieder nachwachsende Rohstoffe (z.B. Stärke für die Milchsäureherstellung) herstellen kann. Im Rahmen des Rohstofflichen Recyclings werden daraus in der nächsten Generation bioabbaubarere Polymere produziert. Die Verpackungen aus dem „Biokunststoff“ können aber auch werkstofflich recycelt werden. D. h. Materialien aus „Biokunststoffen“ können sowohl rohstofflich als auch werkstofflich recycelt werden.

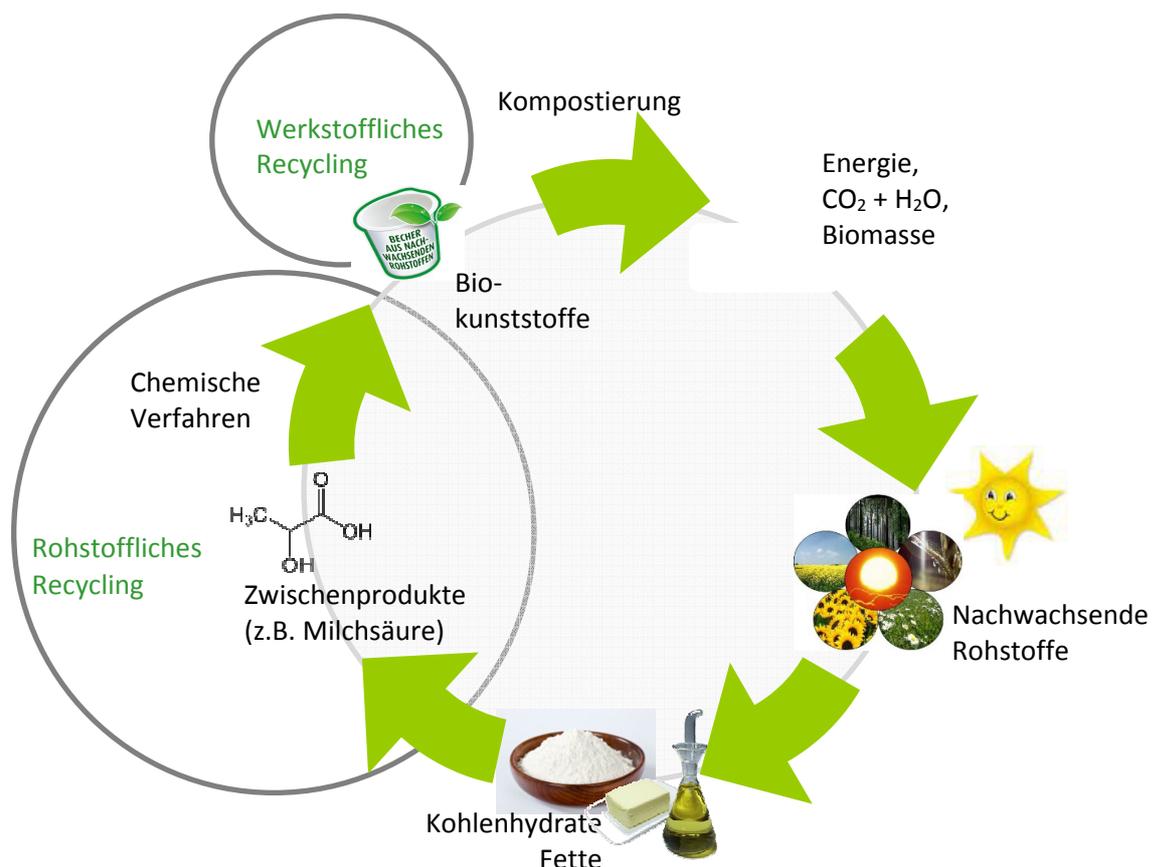


Abb. 1: Stoffkreislauf mit biologisch abbaubaren Produkten auf Basis nachwachsender Rohstoffe

Diese Versuchsreihe zum Thema Stoffkreislauf beinhaltet Experimente zum Recycling sowie zur Kompostierung am Beispiel verschiedener Kunststoffe. Ihre Verknüpfung veranschaulicht die Vermeidung von Verpackungsabfällen und wachsenden Müllbergen, indem sie hinsichtlich ihrer Entsorgung optimiert werden. Dies ist auf verschiedenen Wegen möglich. Eine davon stellt der Recyclingkreislauf dar, der aus sortenreinen Altkunststoffen hochwertige Recyclate (Materialien, die nach Gebrauch und geeigneter Aufbereitung wieder als Rohstoffe eingesetzt werden) [1] bildet, welche die erneute Verarbeitung von Erdöl überflüssig machen. Die umweltverträgliche Entsorgung nach einmaliger Verwendung, wie z.B. durch den biologischen Abbau (Kompostierung) zeigt eine weitere Möglichkeit der Vermeidung von Verpackungsabfällen auf. „Biokunststoffe“, die oft auch biologisch abbaubar sind, verbinden diese beiden Kreisläufe und bilden den biologischen Kreislauf des Stoffrecyclings.

2 Recycling von Kunststoffen

Der Recycling-Teil besteht aus folgenden Versuchen:

- 1.1 Umformen von Polystyrol und Herstellung einer Polystyrol-Folie
- 1.2 Wiederaufschäumen von Polystyrol
- 2.1 Synthese von PLA und Herstellung einer PLA-Folie
- 2.2 Abbau von PLA durch Hydrolyse (Versuch muss noch ausgearbeitet werden)
3. Herstellung einer Stärkefolie

2.1 Versuche zum Recycling von Kunststoffen

V 1.1 – Umformen von Polystyrol und Herstellung einer Polystyrolfolie

Polystyrol (PS) ist ein weit verbreiteter, thermoplastischer Kunststoff. Hergestellt wird er durch radikalische Polymerisation von Styrol (Vinylbenzol) (s. Abb. 2-5), das aus Erdöl gewonnen wird. Die radikalische Polymerisation läuft auch spontan beim Stehen ab, wobei die Zähigkeit der Flüssigkeit allmählich zunimmt.

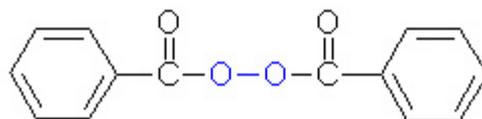


Abb. 2: Herstellung von Polystyrol: Benzoylperoxid dient als Starter der Radikalkettenreaktion [2]

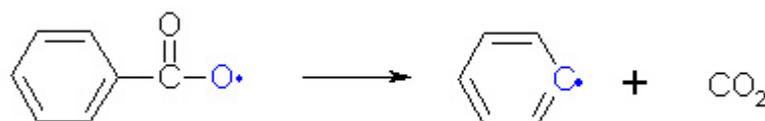


Abb. 3: Herstellung von Polystyrol: Startreaktion durch Bildung des Phenylradikals [2]

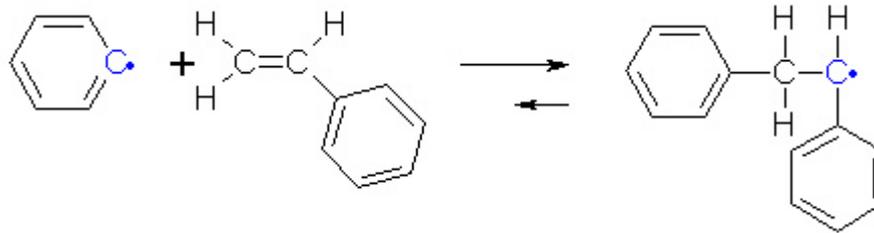


Abb. 4: Herstellung von Polystyrol: Reaktion des Phenylradikals mit einem Styrolmolekül [2]

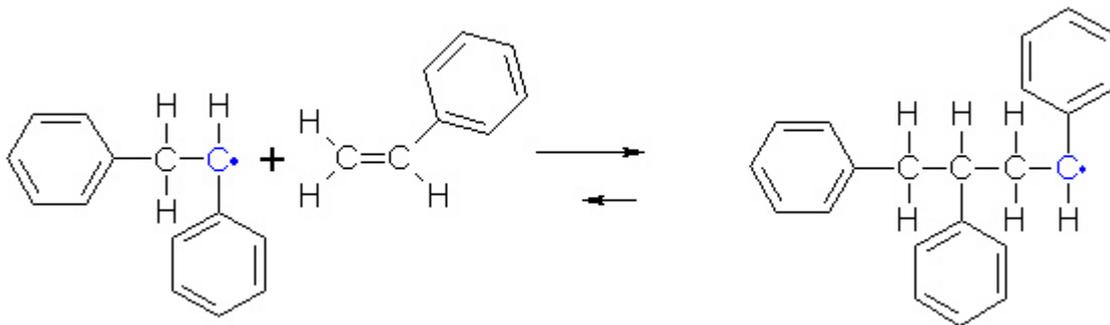


Abb. 5: Herstellung von Polystyrol: Kettenfortpflanzungsreaktion durch Reaktion des um ein Styrolmolekül verlängerten Radikals mit einem weiteren Styrolmolekül [2]

Styrolldämpfe reizen Augen und Atemwege, es wird als mutagen (erbgutverändernd) eingestuft. Bei der technischen Polymerisation fällt das Polystyrol jedoch in so großer Reinheit (frei von Mono- und Oligomeren) an, dass es sogar für Lebensmittelverpackungen verwendet werden kann. Des Weiteren findet es Einsatz in Kleiderbügeln, Wäscheklammern und CD-Hüllen. Reines Polystyrol ist hart, farblos und spröde. Es ist beständig gegen verdünnte Säuren, Laugen und Alkohol. Angegriffen wird es z.B. von Essigsäureethylester (Ethylacetat) oder Aceton, in denen man es ganz oder teilweise lösen kann.

Das Umformen von geschäumtem Polystyrol gehört zum werkstofflichen bzw. physikalischen Recycling. Polystyrol löst sich gut in Ethylacetat, weniger gut in Aceton, und wird jedoch auch in letzterem durch Zusammenbruch der Schaumstruktur im Volumen deutlich reduziert. Beim Lösen von Polystyrol in Ethylacetat lagern sich die relativ unpolaren Ethylacetatmoleküle um die gleichermaßen unpolaren Polystyrolmoleküle nach der Gesetzmäßigkeit: „Gleiches löst sich in Gleichem“. Nach Zusatz von nur wenig Lösungsmittel entsteht eine homogene zähflüssige Masse, die noch einige wenige unlösliche Pigmente oder feine Feststoffe aufweist. Durch weiteren Lösungsmittelzusatz entsteht eine leicht bewegliche Lösung, die noch Trübstoffe enthalten kann, die durch Filtration abgetrennt werden können. Aus der Lösung kann auf den Boden einer Glaspetrischale oder Kristallisierschale eine dünne transparente Folie gegossen werden, die nach dem Verdampfen des Lösungsmittels vorsichtig von der Petrischale abgezogen werden kann. Alternativ kann die Polystyrolfolie auch in eine

mit Aluminiumfolie ausgekleideten Glaspetrischale (die Aluminiumfolie zuerst glatt auf den Boden der Petrischale verlegen, damit ein ebener Untergrund vorliegt) gegossen werden, damit die SchülerInnen die Möglichkeit haben, die Folie, auch wenn das Lösungsmittel noch nicht vollständig entfernt ist und die Folie deshalb noch nicht abziehbar ist, mitzunehmen.

Die Umformung mit Aceton ist ein vollständig anderer Vorgang. Obgleich sowohl das Ethylacetat als auch das Aceton das Polystyrol angreifen und es dadurch im Volumen deutlich reduzieren, entsteht aus dem Aceton-Ansatz nur eine in sich zusammenfallende Masse. Es existiert keine homogene Lösung, aus der eine transparente Folie hervorgeht, sondern eine zähflüssige milchige Masse, die sich nicht zu einer Folie ausgießen lässt. Nach dem Verdampfen des Acetons bleibt eine milchig scheinende feste Substanz übrig. Aufgrund der Tatsache, dass das Ergebnis der Polystyrolumformung mit Aceton nur eine trübe feste Substanz ergibt, können bestimmte Rückschlüsse bezüglich der Anordnung der Moleküle im Polystyrol sowie auch der Löslichkeit in Aceton gezogen werden. Da in dem nicht-kristallinen bzw. nicht geordneten aufgeschäumten Polystyrol nach Zugabe von Aceton noch Bläschen mit Luft, die nach dem Aufbrechen der Lufteinschlüsse mit dem Lösemittel nicht vollständig entweichen können, vorhanden sind, erscheint das Ergebnis trüb-milchig. Eine transparente Folie kann man nur nach einer ausreichend verdünnten Lösung erhalten, in der die Moleküle annähernd molekulardispers gelöst sind. D. h. in Aceton konnte das Polystyrol nicht gut gelöst werden.

In der Industrie wird Polystyrolfolie durch Extrusion hergestellt. Extrusion (lat. extrudere = hinausstoßen, -treiben) bezeichnet das Herauspressen einer festen bis dickflüssigen härtbaren Masse unter Druck aus einer formgebenden Öffnung, z.B. Düse.

V 1.2 – Wiederaufschäumen von Polystyrol

Geschäumtes Polystyrol weist eine geringe Dichte auf und wird z. B. im Baubereich als Wärmedämmstoff genutzt. Als Verpackungsmaterial oder in Helmen soll es zum Schutz gegen Krafteinwirkungen dienen. Hergestellt wird es (z.B. Styropor® von BASF), indem Polystyrol-Perlen, in denen das Treibmittel Pentan eingearbeitet ist, durch Wärme aufgeschäumt werden (Expansion des Pentans, Siedepunkt 36 °C). Druck und Wärme bewirken, dass die in einer Form befindlichen Perlen miteinander verschweißt werden. Die Volumenvergrößerung kann hierbei mehr als das fünfzigfache betragen.

Im Labor kann aufgeschäumtes Polystyrol (Polystyrolchips) aus der Umformung mit Aceton durch Einblasen von Inertgasen wie CO₂ oder durch einfaches Erwärmen gewonnen werden. Auch diese Form des Recyclings gehört zum werkstofflichen Recycling. Die Schaumstruktur von einem aufgeschnittenen aufgeschäumten Polystyrolstück ist unter der Lupe und auch schon mit bloßem Auge gut zu erkennen.

V 2.1 – Synthese von PLA und Herstellung einer PLA-Folie

Polymilchsäure bzw. Polylactat (PLA) ist ein Biokunststoff der dreißiger Jahre. Ausgangsmaterial für PLA ist die Milchsäure, welche biotechnologisch mit Maisstärke, als Nährstoffquelle gewonnen wird. Sie gehört zur Gruppe der Polyhydroxyalkanoate die in C-Zahl und Position der OH-Gruppe variieren. Auch Co-Polymere, z. B. mit ε-Caprolacton oder Glycolsäure sind bekannt. Sie sind biologisch abbaubar, d.h. kompostierbar.

Anwendung findet PLA [3]:

- als Verpackungsmaterial (Einkaufsbeute, Abfallbeutel)
- im Landwirtschaft und Gartenbau (Mulchfolien)
- im Catering-Bereich (Wegwerf-Besteck, Trinkhalme)
- in der Medizintechnik (Nahtmaterial, Implantate).

Dieser Kunststoff gehört zu der Gruppe der Polyester. Seine Synthese verläuft nicht ausgehend von der freiliegenden Milchsäure (s. Abb. 6), sondern von den Lactiden (Dimere –cyclische Ester – der Milchsäure) (s. Abb. 7).

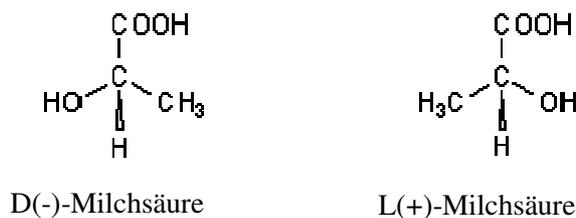


Abb. 6: Optische Aktivität der Milchsäure durch ihre zwei Enantiomere (D- und L-Enantiomer) [4]

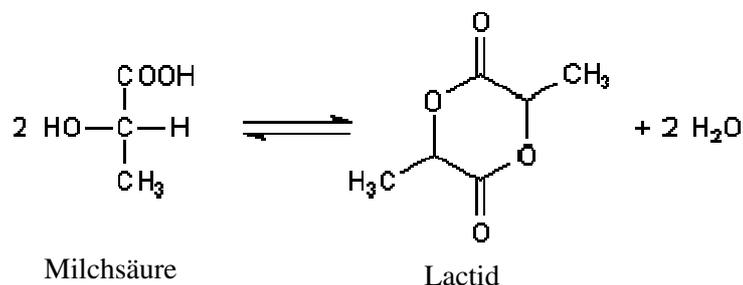


Abb. 7: Lactidbildung bei der Milchsäure [4]

Diese cyclischen Diester (= Lactid) reagieren beim Erhitzen (140 -180 °C) miteinander, wobei die Ringe geöffnet werden. Man spricht von Ringöffnungspolymerisation (s. Abb. 8).

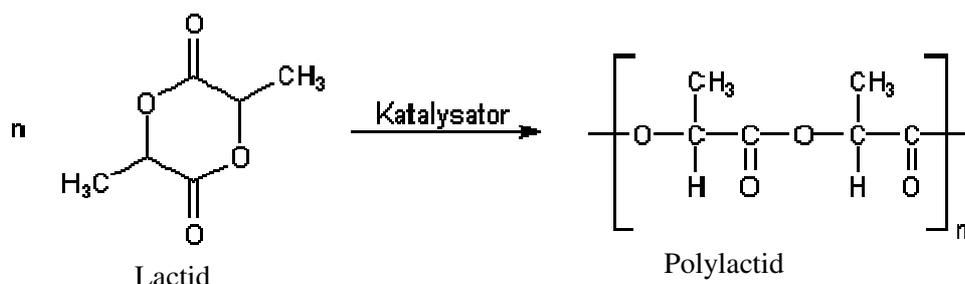


Abb. 8: Ringöffnungspolymerisation bei der PLA-Synthese [4]

Die Reaktion wird durch verschiedene Metallsalze katalysiert. In unserem Versuch wird Zinn(II)chlorid, eine typische Lewis-Säure, eingesetzt. Es bewirkt durch Komplexbildung, dass Bindungen wie C=O, an die das O-Atom der Esterbindung angreift, stärker polarisiert werden.

Als Produkt erhält man einen Kunststoff mit einer hohen Molekülmasse und Festigkeit (unsere Polylactatfolie). Die Polymerlösung kann ebenso wieder in einer mit Aluminiumfolie ausgekleideten Petrischale gegossen werden (s. Versuch 1.1). Das Produkt, eine feste gelblich-braune klare Folie, ist schon nach 10 Minuten abziehbar.

V 2.2 – Abbau der PLA durch Hydrolyse

Im Rahmen des rohstofflichen Recyclings soll das Polylactat wieder abgebaut werden. Dies kann mit Hilfe einer Hydrolyse (Spaltung einer Verbindung unter Anlagerung von Wasser;) (s. Abb. 9) schon in heißem Wasser erreicht werden.

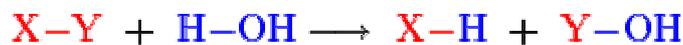


Abb. 9: Hydrolyse der Verbindung XY [5]

Unter diesen Bedingungen soll über oligomere Zwischenprodukte ein Abbau zu den Monomeren (Milchsäure-Moleküle) bzw. den mit der Milchsäure im Gleichgewicht befindlichen Lactiden erzielt werden. Der Abbau soll mit Hilfe eines geeigneten Dünnschicht-Chromatographie-Systems verfolgt werden.

Eine weitere Möglichkeit, den Abbau eines Makromoleküls in kleinere Bausteine zu registrieren, ist das Verschwinden des polymertypischen Verhaltens. Diese Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, wie z.B. Zähigkeit, Viskosität, Elastizität, Ausbildung von Filmen, Gelen oder Fasern, sind unmittelbar für die SchülerInnen erkenn- und nachvollziehbar.

V 3 - Herstellung einer Stärkefolie

Mit einem Marktanteil von 80 % bildet thermoplastische Stärke den derzeit wichtigsten und gebräuchlichsten Vertreter der „Biokunststoffe“ [6]. In dem thermoplastischen Polymer liegen die als Rohstoff dienenden Stärkekörner destrukturiert vor. Die wichtigsten Pflanzen, die in Europa zur Gewinnung von Stärke genutzt werden, sind aktuell Mais, Weizen und Kartoffeln. Der Rohstoff Stärke ist ein Polysaccharid mit der Formel $(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)_n$, das aus α -D-Glucose-Einheiten besteht. Das Makromolekül zählt daher zu den Kohlenhydraten. Aufgebaut ist die Stärke zu 20-30 % aus Amylose, d.h. aus linearen Ketten mit helicaler (Schrauben-)Struktur, die nur α -1-4-glycosidisch verknüpft sind, und zu 70-80 % aus Amylopectin, welches eine stark verzweigte Struktur mit α -1,6-glycosidischer Verknüpfung aufweist (s. Abb. 10).

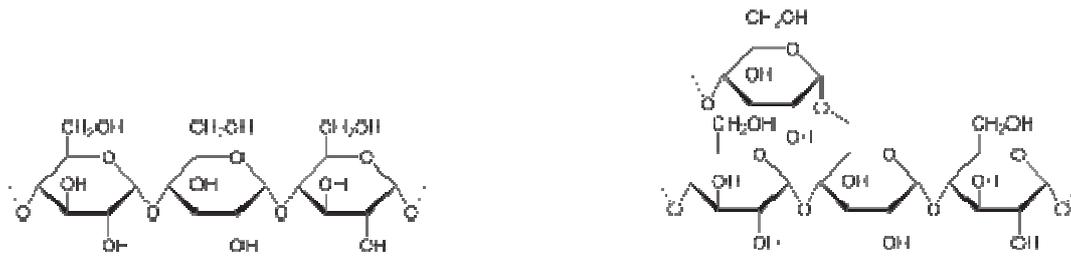


Abb. 10: Ausschnitt aus einem Amylose-Polymer (links) und Ausschnitt aus einem Amylopectinpolymer (rechts) [7]

Stärke kann unter Hitzeeinwirkung ein Vielfaches ihres Eigengewichtes an Wasser physikalisch binden, aufquellen und verkleistern. Beim Erhitzen mit Wasser quillt die Stärke bei 47-57 °C, die Schichten desaggregieren (platzen), und bei 55-87 °C (je nach Stärkeherkunft) entsteht Stärkekleister [8], der durch Verdunstung bzw. weitere Einlagerung des Wassers physikalisch abbindet. In diesem Stadium liegen die Stärkekörner nicht mehr in Gestalt eines kunstvoll aufgebauten Kornes vor. Sie sind als geplatzte Stärkekörner unter dem Mikroskop sichtbar. Die Stärkemoleküle liegen nicht mehr geordnet (teilkristallin) vor und erscheinen uns milchig trüb, sondern nehmen eine ungeordnete Struktur ein, was anhand der zunehmenden Transparenz während des Verkleisterungsprozesses sichtbar wird. Wird die verkleisterte Stärke nun in eine bestimmte Form gebracht (z.B. Folie), bleiben die Moleküle nach dem Verdunsten des Wassers in dieser Form bestehen.

Die Destrukturierung der Stärkekörner zur Herstellung der thermoplastischen Stärke erfolgt vorwiegend thermomechanisch im Extruder und ist abhängig von der zugegebenen Wassermenge, den wirkenden Scherkräften sowie der Temperatur. Durch die Polarität der Bestandteile Amylose und Amylopektin kommt es in der destrukturierten Stärke zu molekularen Wechselwirkungen, die zu einer schweren Extrudierbarkeit sowie zu einem spröden Material führen. Um diesem entgegen zu wirken, werden der Stärke zur Plastifizierbarkeit Hilfsstoffe wie Wasser und andere Weichmacher (z.B. Glycerin oder Sorbit) (s. Abb. 11), zugegeben. Diese Polyole können die Glasübergangstemperatur (Erweichungstemperatur) von etwa 80 °C der thermoplastischen Stärke, je nach Dosierung, stark verringern und verarbeitbar machen, indem sie sich zwischen die Stärke schieben und somit verhindern, dass sich brüchige Stärkekristalle bilden. Des Weiteren halten sie aufgrund der Wasserstoffbrückenbindungen die Stärkemoleküle zusammen. Die hygroskopische Eigenschaft der o. g. Stoffe bewirkt, dass die thermoplastische Stärke immer etwas feucht und daher geschmeidig bleibt.

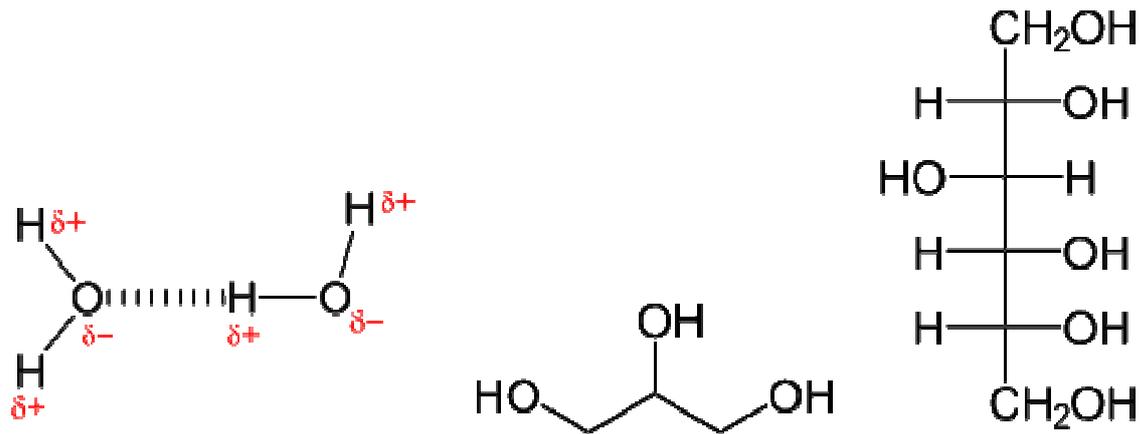


Abb. 11: Struktur zweier Wassermoleküle [9] eines Glycerin- [10] und eines Sorbitmoleküls [11]

Aufgrund der Eigenschaft der Stärke, Feuchtigkeit zu absorbieren, wird sie vor allem im Pharmabereich zur Erzeugung von Medikamentenkapselhüllen eingesetzt. Im medizinischen Bereich liegt der Fokus des Einsatzes von „Biokunststoffen“ vor allem in der Resorbierbarkeit der Produkte. Hier sind Substanzen erwünscht, die im therapeutischen Zeitfenster abgebaut und adsorbiert werden, während in der Industrie z.T. eher Produkte Verwendung finden, die feuchtigkeitsabwesend sind (Joghurtbecher, Trinkbecher). Für diesen Bereich wird die thermoplastische Stärke je nach Einsatzgebiet individuell für ihre weitere Nutzung durch Darstellung von sogenannten Blends, Mischungen mit erdölbasierten Kunststoffen wie wasserabweisenden, biologisch abbaubaren Polymeren z.B. Polyester, Polyesteramiden, Polyurethanen, Polyethylen oder Polyvinylalkohol modifiziert.

Im Versuch 3 wird aus Kartoffelstärke eine Stärkefolie hergestellt. Dies gelingt, da Stärke bereits zur Filmbildung neigt. Damit diese Filme nicht spröde werden, wird zusätzlich zum Wasser, das ebenfalls als Weichmacher agiert, Glycerin zugesetzt. Wie bereits erwähnt handelt es sich bei diesen Stoffen um Polyole (s. Abb. 11), die allerdings unterschiedlich flüchtig sind. Das Wasser als Weichmacher reicht allein nicht aus, da es infolge seiner Struktur relativ leicht flüchtig ist im Vergleich zum schwerer flüchtigen Glycerin. Somit kann die Zähigkeit der Folie länger erhalten bleiben. Des Weiteren haben die SchülerInnen die Möglichkeit, durch Zusatz von mischbaren Farbstoffen farbige Folien herzustellen. Eine ungefärbte Stärkefolie ist in Abb. 12 zu sehen.



Abb. 12: Stärkefolie: Hergestellt aus Maisstärke, Wasser, Glycerin und Wärme

Die Trocknung der Folie auf einer umgedrehten PE-Schüssel oder Kunststoff-Petrischale erfolgt über Nacht bei Raumtemperatur, kann aber auch für etwa 90 Minuten bei 90-100 °C im Trockenschrank erfolgen.

3 Kompostierung von Kunststoffen

Der Kompostierungs-Teil besteht aus folgenden Versuchen:

- 4.1. Kompostierbarkeit einer Polystyrol-, PLA- und Stärkefolie
- 4.2. Kompostierung der drei Folien und CO₂-Nachweis

3.1 Versuche zur Kompostierung von Kunststoffen

V 4.1 – Kompostierung einer Polystyrol-, PLA- und Stärkefolie

Beim Kompostieren (lat. compositum, aus mehreren Bestandteilen bestehend bzw. in mehrere Bestandteile zerlegen) verarbeiten Bakterien, Pilze und Kleintiere das organische Material zu Humus. Dieser Prozess, zu dem es unbedingt Sauerstoff braucht, heißt Rotte. Gelangt kein Sauerstoff zum organischen Material, beginnt es zu faulen und unangenehme Gerüche sind die Folge. Eine weitere entscheidende Voraussetzung beim Kompostieren ist, dass ausreichend Feuchtigkeit vorhanden ist.

Im vorliegenden Versuch sollen die SchülerInnen erkennen, welche Materialien kompostierbar sind. Sie untersuchen die Abbauprozesse dreier Folien (Polystyrol-, PLA- und Stärkefolie) und beobachten, dass sich bereits nach einer Woche die PLA- und Stärkefolie verändern, während die Polystyrolfolie gleich geblieben ist.

Anhand dieses Versuches sollen die SchülerInnen dafür sensibilisiert werden, dass nicht die Rohstoffquelle entscheidend für die Kompostierbarkeit ist, sondern die chemische Struktur der Polymere. Obgleich oft, wie auch in dem Versuch, die biologische Abbaubarkeit bevorzugt bei Biopolymeren anzutreffen ist, weil hierfür die passenden enzymatischen Systeme vorhanden sind, das Entscheidende jedoch, die chemische Bindung zwischen den Monomeren und die Zugänglichkeit ist. Schaut man sich das Polystyrol an, so erkennt man, dass die chemische Bindung, die vorliegt, eine Verknüpfung zwischen zwei Kohlenstoffatomen ist (s. Abb. 13). Diese C-C-

Einfachbindung ist sehr unpolar und widerstandsfähig, so dass Stoffe, die eine solche Bindung besitzen, meist reaktionsträge sind und somit auch nicht biologisch abbaubar.

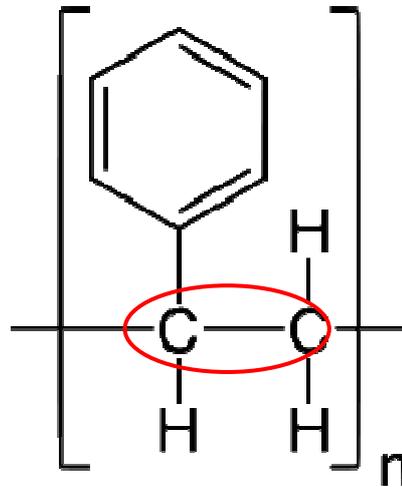


Abb. 13: Chemische Bindung von Polystyrol: C-C-Einfachbindung [12]

Im PLA, einem halbsynthetischen Kunststoff liegt eine C-O-Bindung in Form einer Esterbindung (s. Abb. 14) vor, die aufgrund ihrer Polarität leichter spaltbar ist als die C-C-Einfachbindung im Polystyrol. Im Unterschied zur Stärke, bei der ebenso eine C-O-Bindung (hier eine Acetalbindung, die glycosidische Bindung) vorliegt, verhält sich das PLA-Polymer aufgrund der Methylgruppe wasserabweisend (hydrophob). Dadurch sind die Wasseraufnahme und die Hydrolyserate der Hauptverbindung kleiner als bei der Stärke. Dennoch ist sie kompostierbar und lässt sich in heißem Wasser hydrolytisch abbauen.

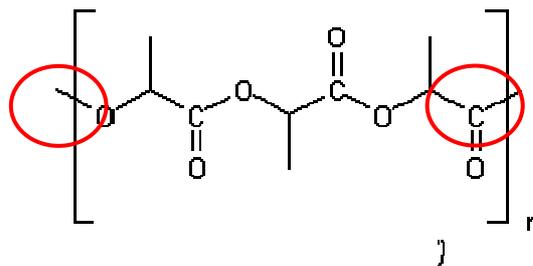


Abb. 14: Chemische Bindung von Polylactat: C-O-Einfachbindung [13]

Die Stärke weist, wie bereits erwähnt, eine C-O-Acetalbindung (glycosidische Bindung) auf (s. Abb. 15), die für die Kompostierbarkeit verantwortlich ist. Sie kann durch säurekatalysierte oder enzymatische Hydrolyse gespalten werden. Ein einfaches Kochen der Stärkelösungen bewirkt noch keine Hydrolyse zu den Monomeren. Wird das Wasser allerdings durch verdünnte Mineralsäuren ersetzt, ist ein hydrolytischer Abbau zu beobachten. In Gegenwart von Enzymen (Amylasen) ist ein Abbau auch schon bei Raumtemperatur möglich.

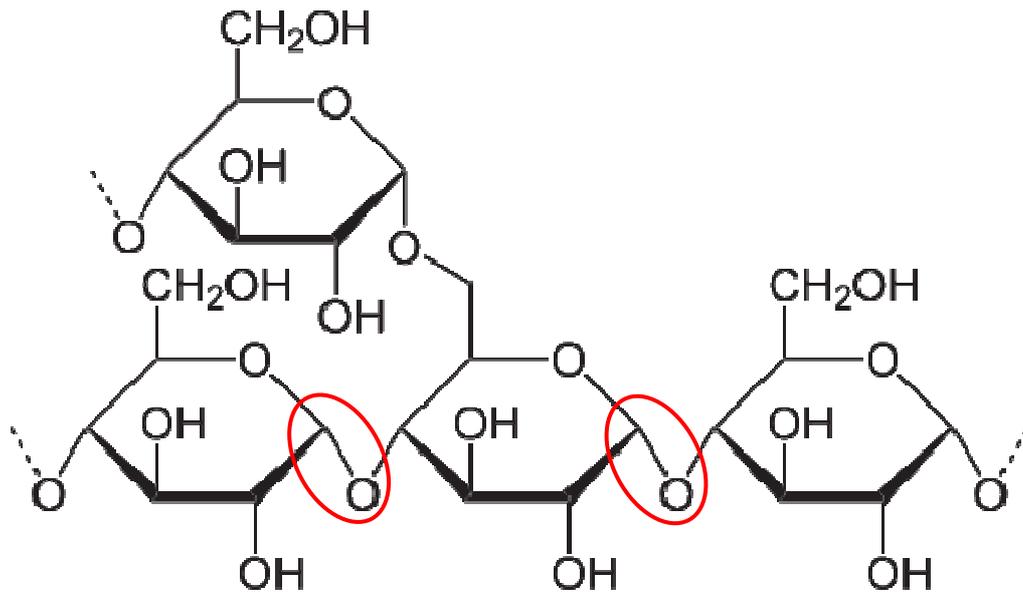


Abb. 15: Chemische Bindung von Stärke: C-O-Einfachbindung (glycosidische Bindung) [8]

Der Versuch der Kompostierung erfordert einen mehrtägigen (etwa 8 Tage) Beobachtungszeitraum und ist daher besonders geeignet für Langzeitversuche wie sie in Arbeitsgemeinschaften (AG) oder auch als „Weiterführ-Versuche“ in Schulen durchgeführt werden können. Für Schülergruppen, die nur einen einzelnen Besuchstermin wahrnehmen können, kann der Versuch leicht modifiziert angeboten werden, indem die SchülerInnen nicht ihre eigenen Ansätze auswerten, sondern für die Beobachtung und Auswertung des Versuches bereits vorbereitete Materialien erhalten.

V 4.2 – Kompostierung der drei Folien und qualitativer CO₂- Nachweis

Bei Materialien, die kompostierbar sind, entsteht während des Rottevorganges unter anderem das Gas CO₂. Dieses CO₂ reagiert mit den OH-Ionen der Natronlauge zu Hydrogencarbonat und bewirkt so eine pH-Wert-Absenkung auf unter 8,3 und demzufolge eine Entfärbung des Phenolphthaleins. Diese Reaktion kann als Nachweis für CO₂ eingesetzt werden.

Phenolphthalein ist ein Triphenylmethanfarbstoff und gilt als einer der bekanntesten pH-Indikatoren. Bei einem pH-Wert von 0 bis etwa 8,2 ist gelöstes Phenolphthalein farblos. In stärker basischer Lösung (pH 8,2-12) werden die Protonen an den beiden phenolischen Hydroxylgruppen abgespalten (s. Abb. 16; B1). In einer resultierenden mesomeren Grenzstruktur ist ein chinoides System als Chromophor vorhanden (Abb. 16, B2), welches für die farbige Struktur des Indikators verantwortlich ist. In stark basischer Umgebung (pH > 12) lagert sich am zentralen Kohlenstoffatom eine Hydroxidion an, wodurch das Erreichen der Chromophorstruktur unmöglich wird (s. Abb. 16; C). Das Phenolphthalein wird dann wieder farblos.

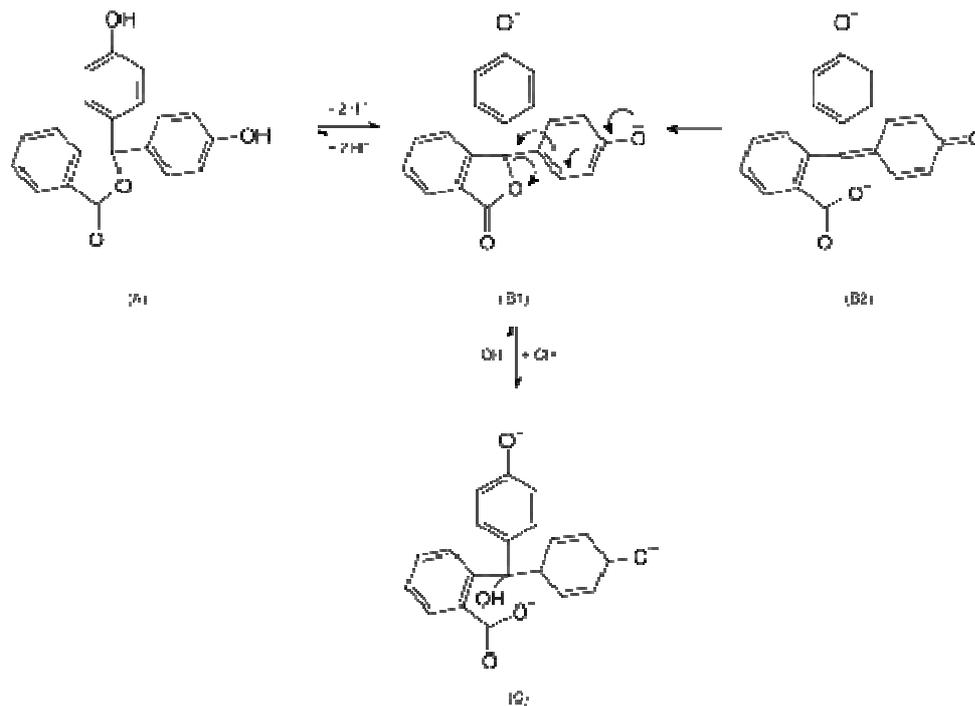


Abb. 16: Zusammenhang zwischen der Struktur des Phenolphthaleins und des Farbumschlages [14]

Im vorliegenden Versuch wird eine 0,5 mM NaOH eingesetzt, deren pH-Wert bei etwa 10 liegt. Beim Vorhandensein von ausreichend CO_2 entfärbt sich die mit Phenolphthalein versetzte Natronlauge (pH unter 8,3). Hierbei ist darauf zu achten, dass die Natronlauge nicht zu konzentriert sein darf, damit der Umschlag von pink nach farblos erreicht wird. Beispielsweise ist eine 0,1 M NaOH, die einen pH-Wert von etwa 13,7 aufweist ungeeignet, da der Indikator zum Ausgangszeitpunkt farblos vorliegt.

Im Rahmen dieser Versuchsreihe ist die Durchführung einer Blindprobe bzw. Kontrollprobe für die Funktionsfähigkeit der gewählten Nachweismethode unerlässlich. Da bereits in der Komposterde CO_2 enthalten ist, muss dieser Wert als Bezugswert bei jeder durchgeführten Versuchsreihe ermittelt werden.

Damit die CO_2 -Konzentration in der Komposterde nicht zu hoch ist, so dass sich die Blindprobe zu schnell entfärbt, wird die Komposterde 15 min an eine Wasserstrahlpumpe angeschlossen. Dadurch wird verhindert, dass sich die Blindprobe zeitgleich mit den anderen Ansätzen entfärbt.

Des Weiteren handelt es sich in Versuch 4.2 um eine beschleunigte Form der Kompostierung, d.h. der Rottevorgang wurde künstlich durch Temperaturerhöhung auf $60\text{ }^\circ\text{C}$ beschleunigt, so dass ein qualitativer CO_2 -Nachweis, im Rahmen der zur Verfügung stehenden Laborzeit, möglich ist.

Wichtig ist hierbei außerdem, dass das eingesetzte Material zuvor gut zerkleinert wird. Dadurch besitzt es eine größere Oberfläche und kann somit besser verrotten.

Mit Hilfe dieses Versuches können die SchülerInnen bei der PLA- und der Stärkefolie eine Entfärbung nach etwa 30 min erkennen. Polystyrolfolie zeigt nach etwa 60 min eine Entfärbung, etwa zeitgleich mit der Blind- bzw. Kontrollprobe für die Komposterde.

4 Schlussbemerkung zum Stoffkreislauf Recycling/Kompostierung von Kunststoffen

Die SchülerInnen sollen auf Grundlage der vorgestellten Versuchsreihe zum Thema Stoffkreislauf (Recycling/Kompostierung von Kunststoffen bzw. „Biokunststoffen“) zu der Erkenntnis gelangen können, dass sowohl das werkstoffliche und rohstoffliche Recycling als auch die Kompostierung Möglichkeiten sind, Einfluss auf die Abfallwirtschaft auszuüben.

Sie lernen Aufbau-, Umbau- und Abbauprinzipien kennen, die immer auch mit einer Energiezufuhr von außen verbunden sind. Im Rahmen der Stoffe, die in dieser Versuchsreihe zum Einsatz kommen, können sie weitere Erkenntnisse bzgl. der Eigenschaften von Thermoplasten erlangen, die sich durch Erwärmung aufgrund ihres linearen unverzweigten Aufbaus bei einer bestimmten Erweichungstemperatur in einen plastischen (verformbaren) Zustand überführen lassen und die neue Form nach dem Erkalten beibehalten. Die Umformung von Polystyrol kann auch durch Lösen der Polymere erreicht werden: Die Moleküle liegen in der Lösung im Idealfall unabhängig voneinander solvatisiert vor (man nennt das molekulardispers gelöst, oft bilden sich jedoch auch Aggregate). Sie bilden dann ungeordnete Knäuel, die nach dem Verdampfen des Lösemittels ungeordnet als transparente Folie zurückbleiben.

Darüber hinaus ist es uns ein Anliegen, den SchülerInnen zu vermitteln, dass die Abbaubarkeit eines Materials primär von der chemischen Bindung abhängig ist, die gespalten werden soll, und nicht von der Rohstoffquelle. Irrtümlicherweise, wird die Kompostierbarkeit eines Stoffes auf die Rohstoffquelle zurückgeführt, was durchaus in vielen Fällen zutrifft. So wird oft gesagt, dass Polymere, die aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen auch biologisch abbaubar seien, die aus fossilen Rohstoffen dagegen nicht. Die SchülerInnen sollen lernen, mit dieser Aussage kritisch umzugehen und die Struktur, die chemische Bindung, die in den jeweiligen Stoffen vorliegt, in den Blick zu nehmen. Dies setzt einen entsprechenden Stand im Schulunterricht voraus.

5 Quellenverzeichnis

- [1] http://www.umweltzeichen.at/cms/upload/20%20docs/richtlinien-lf/uz39_r3a.pdf
(Februar 2012)
- [2] <http://www.chemieunterricht.de/dc2/plaste/ueb.htm> (Februar 2012)
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactide> (Februar 2012)
- [4] <http://www.chemieunterricht.de/dc2/plaste/poly-ms.htm> (Februar 2012)
- [5] <http://de.wikipedia.org/wiki/Hydrolyse> (Februar 2012)
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Biokunststoff> (Februar 2012)
- [7] http://de.wikipedia.org/wiki/Thermoplastische_St%C3%A4rke (Februar 2012)
- [8] <http://de.wikipedia.org/wiki/St%C3%A4rke> (Februar 2012)
- [9] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasser> (Februar 2012)
- [10] <http://de.wikipedia.org/wiki/Glycerin> (Februar 2012)
- [11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Sorbit> (Februar 2012)
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polystyrol> (Februar 2012)
- [13] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polylactat> (Februar 2012)
- [14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Phenolphthalein> (Februar 2012)