



Makromoleküle

Ein Lern- und Experimentierset für die
Sekundarstufe II

Makromoleküle



Friedrich-Schiller-Universität Jena
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät
Arbeitsgruppe Chemiedidaktik

Prof. Dr. Timm Wilke
Nicolai ter Horst

Diese Broschüre ist im Rahmen des
Moduls C-LA-801c (Einführung in die
Umweltchemie) unter Mitwirkung
aller Studierenden entstanden.

Wir danken allen für ihre rege Teilnahme!

Stand: 2021-05-01.

Die aktuellste Version finden Sie unter:

<< [>>](https://www.chemgeo.uni-jena.de/chegeme-
dia/arbeitsgruppe+chemiedidaktik/Makromole-
küle.pdf)

KONTAKT



August-Bebel-Straße 2
07743 Jena



03641/9-48491

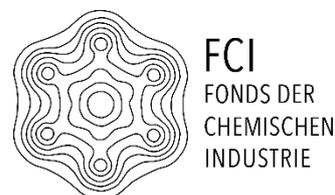


chemieschuelerlabor@uni-jena.de



<https://www.chemgeo.uni-jena.de/schuelerlabor>

gefördert durch



Inhaltsübersicht

1. Proteine (Melanie Themel, Regina Wack)	8
I. Sachinformation	8
1. Grundlagen der Ernährung: Nährstoffe in der menschlichen Ernährung	8
2. Proteine	8
2.1 Der Aufbau von Proteinen.....	8
2.2 Eigenschaften und Reaktionen von Proteinen und Aminosäuren.....	9
2.3 Die Bedeutung von Proteinen für den menschlichen Körper und in der Ernährung.....	10
3. Alternative Proteinquellen-Warum eigentlich?	12
II. Schülermaterial	15
V1 Wasserlöslichkeit von Aminosäuren	16
V2 Proteingehalt unterschiedlicher Milchalternativen.....	17
III. Didaktische Hinweise	18
V1 Wasserlöslichkeit von Aminosäuren	19
V2 Proteingehalt unterschiedlicher Milchalternativen.....	23
IV. Referenzen	28
2. Zellulose (Eric Deutsch, Louis Göhring, Mathias Ludolph, Paul Worliczek)	30
I. Sachinformation	30
1.1 Acetobacter xylinum	30
1.2 Bildung der BC-Mikrofibrillen	30
1.2 Kultivierung im Labor	31
1.3 Struktur und Eigenschaften der Bakterienzellulose.....	31
1.4 Vergleich pflanzliche Cellulose und Bakteriencellulose	32
1.5 Anwendungen der Bakterienzellulose.....	32
II. Schülermaterial	34
V1 Cellulose und Stärke in Alltagsprodukten	35
V2 Die Quellung von Cellulose	36
V3 Die Herstellung von "Kupferseide"	37

V4	Herstellung eines Cellulosederivates - Bakterienzellulose	39
III. Didaktische Hinweise		41
V1	Cellulose und Stärke in Alltagsprodukten	42
V2	Quellungsvermögen von Cellulose	44
V3	Herstellung von Kupferseide.....	45
V4	Herstellung eines Cellulosederivates - Bakteriencellulose.....	47
IV. Referenzen		49
3. Anorganische Polymere (Dennis Donath, Jacob Tölpel, Franziska Ullmann)		50
I. Sachinformation.....		50
1.	Die Gruppe der anorganischen Polymere und die Silikone	50
2.	Verwendung der Silikone	51
3.	Umweltrelevanz der Silikone	51
II. Schülermaterial.....		53
V1	Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels.....	54
V2	Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?	56
V3	Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen	58
III. Didaktische Hinweise		61
V1	Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels.....	63
V2	Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?	65
V3	Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen	68
IV. Referenzen		71
4. Naturkautschuk (Christabel Samira Dietz, Emilie Lou Dittmar, Milena Gese, Adriana Riedel)		73
I. Sachinformation.....		73
1.	Naturkautschuk.....	73
2.	Autoreifen.....	74
2.1	Aufarbeitung des Naturkautschuks	74
2.2	Recycling von Autoreifen.....	75

II. Schülermaterial.....	76
V1 Doppelbindungsnachweis im Naturkautschuk.....	77
V2 Vulkanisation von Naturkautschuk	79
V3 Recycling von Autoreifen – Druckerschwärze selbst herstellen	81
V4 Recycling alter Autoreifen – Herstellung von Gips	84
III. Didaktische Hinweise	86
V1 Doppelbindungsnachweis im Naturkautschuk.....	88
V2 Vulkanisation von Naturkautschuk	90
V3 Recycling von Autoreifen – Druckerschwärze selbst herstellen	93
V4 Herstellung von Gips aus Altreifen.....	96
IV. Referenzen	99
5. Makromoleküle (Benedikt Blümbott, Adrian Hofmann, Tim Jacobs, Erik Richter).....	100
I. Sachinformation.....	100
1. Definition.....	100
1.1. Plastik.....	100
1.2. Mikroplastik	100
2. Herstellung.....	100
3. Eintrags- und Verbreitungswege sowie Beständigkeit.....	101
4. Quellen von (Mikro-)Plastik in der Umwelt und Lösungsansätze	102
5. Identifizierung/ Analytik	103
II. Schülermaterial.....	104
V1 Herstellung von Nylon [6]	105
V2 Dichteuntersuchungen von Kunststoffen	107
V3 Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen	109
V4 Wir untersuchen Quellen von Mikroplastik.....	111
III. Didaktische Hinweise	112
V1 Herstellung von Nylon.....	113
V2 Dichtebestimmung von Kunststoffen.....	116
V3 Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen	118
V4 Wir untersuchen Quellen von Mikroplastik.....	121

IV. Referenzen	125
6. Müllverbrennung/ Recycling (Maximilian Köthe, Johannes Mittag)	
.....	126
I. Sachinformation.....	126
1. Müllverbrennung und Recycling.....	126
1.1 Klassifizierung von Kunststoffen.....	126
1.2. Entsorgung von Kunststoffen.....	128
1.3. Recycling von Kunststoffen	129
II. Schülermaterial.....	130
V1 Recycling von Thermoplasten durch Zusammensintern	131
V2 Pyrolyse von Polymethacrylsäuremethylester.....	133
V3 Recycling von Styropor	135
III. Didaktische Hinweise	136
V1 Recycling von Thermoplasten durch Zusammensintern	137
V2 Pyrolyse von Polymethacrylsäuremethylester.....	138
V3 Recycling von Styropor	140
IV. Referenzen	143
7. Biobasierte Kunststoffe (Alexander Dehne, Paula Kittel, Carolin Leibelt)	
.....	144
I. Sachdarstellung.....	144
1. Definition.....	144
2. Vor- und Nachteile.....	144
3. Klassifizierung	144
3.1 Biobasierte Monomere.....	144
3.2 Direkt aus der Biomasse gewonnene Polymere	145
3.3 Durch Mikroorganismen hergestellte Polymere	145
4. Entsorgung und Umweltfreundlichkeit.....	146
II. Schülermaterial.....	147
V1 Kunststoff aus Stärke	148
V2 Galalith.....	150

V3	Langzeitexperiment: Abbau von biobasierten/biologisch abbaubaren Kunststoffen	152
III. Didaktische Hinweise		154
V1	Kunststoff aus Stärke	155
V2	Galalith.....	157
V3	Langzeitexperiment	159
IV. Referenzen		161
Verantwortliche Redaktion und Kontakt.....		162

1. Proteine (Melanie Themel, Regina Wack)

I. Sachinformation

1. Grundlagen der Ernährung: Nährstoffe in der menschlichen Ernährung

Der Mensch als heterotropher Organismus benötigt chemische Energie, welche von außen zugeführt wird. Die menschliche Ernährung besteht grundsätzlich aus drei Makronährstoffen, welche je nach Ernährungsform angepasst werden können. Dies sind Fette, Eiweiße und Kohlenhydrate. Nur aus diesen Makronährstoffen kann direkt Energie gewonnen werden. Der Nährstoff mit dem größten physiologischen Brennwert ist Fett mit etwa 9,3 kcal/g. Kohlenhydrate und Proteine besitzen jeweils einen Brennwert von ca. 4,1 kcal/g [1]. Hauptsächlichste Energieträger des menschlichen Stoffwechsels sind Kohlenhydrate und Fette. Neben den Makronährstoffen Kohlenhydrate, Fette und Eiweiße gibt es Mikronährstoffe wie Vitamine, Mineralien, Spurenelemente, als auch sekundäre Pflanzenstoffe, welche zum Teil essenziell für den Stoffwechsel sind. Im Folgenden soll vor allem auf die Proteine eingegangen werden.

2. Proteine

2.1 Der Aufbau von Proteinen

Proteine sind unverzweigte Ketten, welche aus mindestens 100 aneinandergereihten Aminosäuren bestehen. Die Größe der Moleküle gibt den Proteinen damit eine molare Masse von 20-60 kDa, weshalb sie auch zu den Makromolekülen zählen. Je nach Anzahl der verknüpften Aminosäuren werden unterschiedliche Peptide unterschieden (vgl. Abbildung 1).

Aminosäuren sind chemische Verbindungen, welche an einem zentralen Kohlenstoffatom sowohl eine Aminogruppe (-NH₂), wie auch eine Carboxylgruppe (-COOH) aufweisen. Daneben besitzt das α-C-Atom noch ein Wasserstoffatom sowie einen Rest R, durch den sich die verschiedenen Aminosäuren unterscheiden [3] (vgl. Abbildung 4).

Zwei Aminosäuren werden im Körper an den Ribosomen über eine Peptidbindung miteinander verknüpft. Dafür erfolgt ein nukleophiler Angriff mit Hilfe des Katalysators 28S-rRNA unter Wasserabspaltung (vgl. Abbildung 2). Die entstehende Bindung hat einen partiellen Doppelbindungscharakter, was eine Drehung an der Verbindungsachse unmöglich macht.

Name	Anzahl der Aminosäuren
Dipeptid	2 Aminosäuren
Tripeptid	3 Aminosäuren
Oligopeptid	2 bis 10 Aminosäuren
Polypeptid	10 bis 100 Aminosäuren
Protein	mehr als 100 Aminosäuren

Abbildung 1: Bezeichnung unterschiedlicher Proteine je nach Aminosäureanzahl [1]

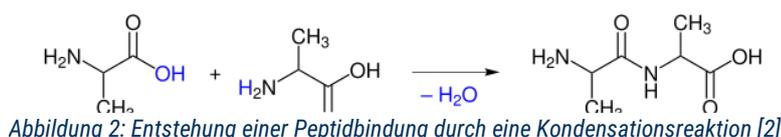


Abbildung 2: Entstehung einer Peptidbindung durch eine Kondensationsreaktion [2]

Mit zunehmender Länge der Aminosäuresequenz (Primärstruktur) steigen die Wechselwirkungen innerhalb einer Aminosäurekette sowie auch zwischen verschiedenen Aminosäureketten (Quartärstruktur). Beispielsweise formen sich durch Ausbildung von Wasserstoffbrücken Strukturen wie etwa die α -Helix der DNA oder auch die β -Faltblattstruktur, welche in Antikörpern vorkommt (Sekundärstruktur). Proteine sind folglich trotz des starren Charakters ihrer Peptidbindung dreidimensional angeordnet (vgl. Abbildung 3) [3].

2.2 Eigenschaften und Reaktionen von Proteinen und Aminosäuren

Je nach Rest weisen die Aminosäuren unterschiedliche Eigenschaften auf (polar, unpolar, basisch, sauer).

So kann der Rest R neben reinen Kohlenwasserstoffketten weitere Aminogruppen aufweisen, wie beispiels-

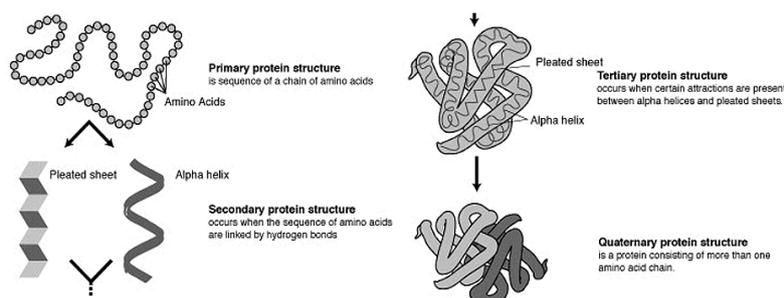


Abbildung 3: Unterschiedliche Dimensionen der Proteinstrukturen [3]

weise bei Glutamin. Daneben können auch Hydroxid-Gruppen (Tyrosin) und weitere funktionelle Gruppen auftauchen, welche die Polarität verändern sowie andere Atome in der Kohlenwasserstoffsequenz enthalten sein, wie das Schwefelatom in Methionin [3] (vgl. Abbildung 4). Somit entscheidet der Rest R auch über die Löslichkeit einer Aminosäure. Aminosäuren können als Ampholyte sowohl sauer als auch basisch reagieren. Dabei überwiegt im Sauren die positive Ladung an der Aminogruppe ($-\text{NH}_3^+$) und im Basischen die negative Ladung der Carboxylgruppe ($-\text{COO}^-$). Die Ladung ermöglicht dabei eine verbesserte Löslichkeit im Wasser. In wässriger, neutraler Lösung liegt die Aminosäure vorwiegend als Zwitterion vor, d.h. sie besitzt sowohl eine positive als auch eine negative Ladung. Damit ist das Molekül nach außen hin ungeladen (isoelektrischer Punkt). Grundsätzlich ist eine Aminosäure als Zwitterion schwer löslich und im basischen und sauren Milieu gut wasserlöslich [4]. Allerdings können die Reste R dieses Verhalten zusätzlich beeinflussen. Liegen große, unpolare Reste vor, so sind Aminosäuren eher schlecht wasserlöslich. Umgedreht ermöglichen hydrophile Reste, dass die gesamte Aminosäure ebenfalls besser wasserlöslich ist [5].

In Form von Proteinen können Aminosäuren zudem denaturieren. Dabei verlieren die Proteine meistens irreversibel ihre zuvor bereits erwähnte charakteristische dreidimensionale Struktur und damit verbunden auch ihre Funktion im Körper [3]. Aus diesem Grund ist hohes Fieber auch sehr schlecht für die Gesundheit eines Menschen. Aus dem Alltag ist die Denaturierung durch das Stocken von Eiweiß beim Erhitzen bekannt.

2.3 Die Bedeutung von Proteinen für den menschlichen Körper und in der Ernährung

Das Wort Protein kommt vom griechischen „Proteios“ und bedeutet so viel wie „an erster Stelle“, was schon die Bedeutung von Proteinen für Lebensprozesse ersichtlich macht [6]. Proteine werden unter anderem als Baustoff für biologische Membranen und der extra-zellulären Matrix genutzt, aber auch für die Resynthese von abgebauten Strukturen, wie die durch Kraft-, aber auch Ausdauertraining zerstörten Muskelstrukturen (Z-Scheiben). In Form von Enzymen fungieren sie als unersetzliche Beteiligte für die meisten Reaktionen im Körper.

Als vermehrter Energielieferant dienen sie nur dann, wenn der Körper keine Energie aus Kohlenhydraten oder Lipiden beziehen kann. Da nur Aminosäuren, die kleinsten Bausteine von Proteinen, als Aufbaustoff beziehungsweise als Energie bereitstehen können, werden erst Pepsin im Magen und später Peptidasen im Darm als Enzyme vom Organismus eingesetzt, um eine Zerlegung der Proteine in Aminosäuren und somit die Metabolisierung möglich zu machen [2].

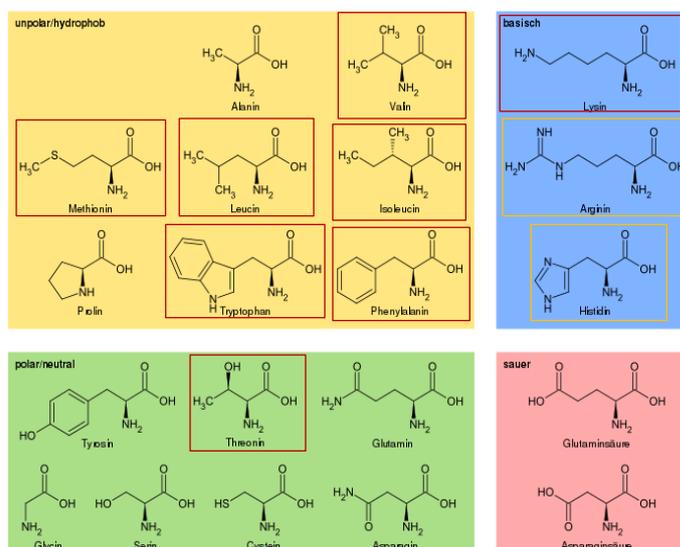


Abbildung 4: Die 20 natürlichen Aminosäuren davon 8 essentielle (rot umrahmt) und 2 semi-essentielle (gelb umrahmt) (verändert nach [4])

Bezogen auf die Ernährung werden je nach Quelle insgesamt 20, beziehungsweise 21 für den Menschen relevanten Aminosäuren unterschieden [2]. Acht davon können vom Menschen nicht selbst gebildet werden und werden daher als essentielle Aminosäuren bezeichnet. Diese müssen über die Nahrung zugeführt werden. Unter bestimmten Gegebenheiten, wie zum Beispiel dem Säuglingsalter, kommen weitere essentielle Aminosäure hinzu (vgl. Abbildung 4).

Die tägliche Menge an Proteinen, welche vom Menschen konsumiert werden sollte, differiert je nach Quelle. Die offizielle Empfehlung für den durchschnittlichen Menschen beträgt laut der DGE [7], als auch der WHO [8], in etwa 0,8 g Protein/kg für Normalgewichtige als Optimalzufuhr, nicht jedoch als Minimalzufuhr. Eine durchschnittlich aktive Person mit 60 kg Körpergewicht bräuchte somit 48 g Protein. Dies entspricht in etwa 197 kcal und somit in etwa 10 % der Nahrungsenergie bei einem Bedarf von 1800-2100

kcal. Männer haben einen etwas höheren Kalorien- und somit auch Proteinbedarf als Frauen. Je nach Aktivität sind sowohl der Kalorienbedarf, als auch der Proteinbedarf erhöht. Eine erhöhte Kalorienaufnahme führt aber automatisch auch zu einer höheren Aufnahme an Protein. In Abbildung 5 ist die Zusammensetzung der Makronährstoffe einer ausgewogenen Ernährung aufgezeigt. Wie ersichtlich ist, sollte unabhängig von der Ernährungsform der größte Anteil der Ernährung aus Kohlenhydraten bestehen, welche in pflanzlichen Produkten vorkommen. In Abbildung 5 fällt zudem auf, dass der rein pflanzliche Ernährungssteller mit dem omnivoren Ernährungssteller der DGE zu 75 % identisch ist. Eiweißquellen wie Fleisch, Wurst, Milch, Eier und Fisch werden durch Hülsenfrüchte, Nüsse und Samen ersetzt [6].

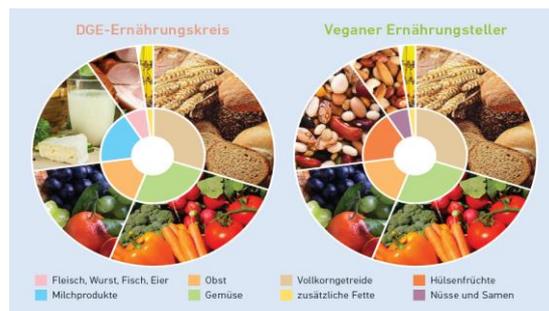


Abbildung 5: Vergleich des pflanzlichen und omnivoren Ernährungstellers [5]

Obwohl es inzwischen einige Leistungssportler gibt, die sich rein pflanzlich ernähren, existiert bei vielen Menschen noch immer die Vorstellung, dass eine Ernährung ohne Fleisch mit einem Mangel an Kraft, Ausdauer und Leistungsfähigkeit einhergeht. Oftmals wird dabei der Mangel an ausreichend Proteinen als wichtiger Faktor genannt.

Proteine finden sich allerdings in allen Lebensmitteln, nicht nur in tierischen Produkten.

Aber kann nun eine pflanzliche Ernährung den Proteinbedarf eines Menschen decken?

Mehrere Untersuchungen aus unterschiedlichen Ländern [9,10,11,12,13] konnten zeigen, dass vegan lebende Menschen im Durchschnitt mehr als 10 % ihrer Kalorien aus Protein zu sich nahmen. Voraussetzung hierbei ist natürlich, dass bedarfsgerecht Kalorien aufgenommen werden.

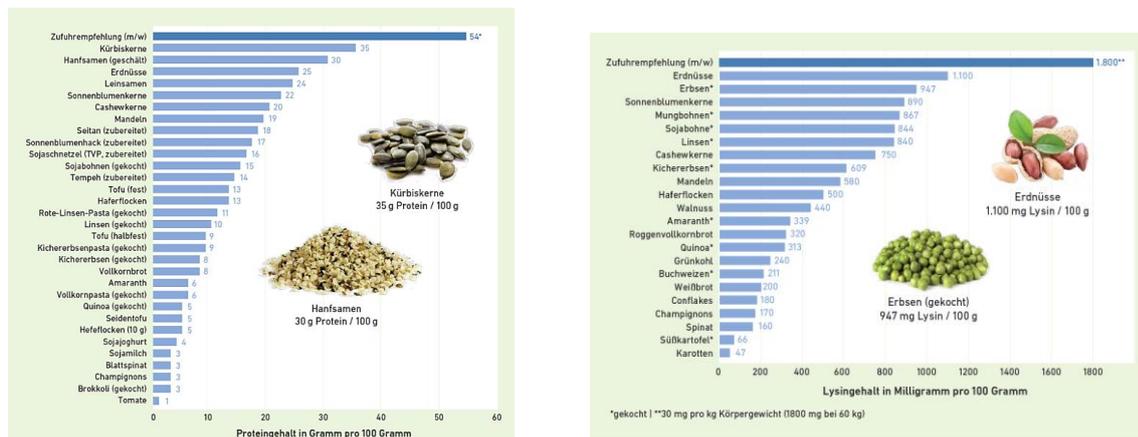
Allgemein kann gesagt werden, dass pflanzliche Lebensmittel tendenziell einen geringeren Proteinanteil aufweisen. Außerdem besitzen sie ein weniger gutes Aminosäureprofil und somit für den Körper weniger gut verwertbare Proteine sowie Substanzen, welche die Bioverfügbarkeit hemmen, wie etwa Polyphenole [17]. Dennoch handelt es sich bei der Schlussfolgerung, pflanzliches Protein könne daher nicht mit tierischem mithalten, um einen Trugschluss. Beim Beurteilen der Proteinzufuhr bzw. des aufgenommenen Aminosäurespektrums, sollten die über den gesamten Tag aufgenommenen Lebensmittel einbezogen werden. So können sich pflanzliche Proteinquellen im Laufe des Tages gegenseitig in ihrem Aminosäurespektrum ergänzen.

2003 wurde schließlich auch von offizieller Seite durch die Academy of Nutrition and Dietetics [14] bestätigt, dass eine pflanzliche Ernährung bei guter Zusammenstellung in jeder Phase des Lebenszyklus eine

ausreichende Versorgung mit allen Nährstoffen sicherstellen kann. Auch andere Ernährungsgesellschaften wie die British Dietetic Association [15] sowie die Dietitians Association of Australia [16] sehen keine Schwierigkeiten einer pflanzlichen Kost in Bezug auf die Proteinversorgung. Gleichzeitig besteht bei rein pflanzlicher Ernährung trotzdem die Gefahr eines Nährstoffmangels, wenn die Kost nicht ausgewogen ist. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist das Vitamin B12, welches bei rein pflanzlicher Kost als Nahrungsergänzungsmittel zu sich genommen werden muss.

Abbildung 6 zeigt pflanzliche Lebensmittel mit einem hohen Anteil an Proteinen, welche daher auch bei der Produktion von Fleischersatzprodukten zum Einsatz kommen wie Erbsen-, Reis-, Weizen (Seitan)-, Pilz- und Sojaprotein.

Besondere Bedeutung haben bei den pflanzlichen Proteinquellen Hülsenfrüchte (Erbsen, Kichererbsen, Bohnen, Soja, Linsen), da sie reich an der essenziellen Aminosäure Lysin sind, welche in vielen pflanzlichen Lebensmitteln wenig vorhanden ist, und Hülsenfrüchte gleichzeitig wenig Fett enthalten (vgl. Abbildung 7).



3. Alternative Proteinquellen-Warum eigentlich?

Abbildung 6: Proteingehalt verschiedener pflanzlicher Nahrungsmittel [5]

Der weltweite Fleischkonsum wird zunehmend kritischer gesehen und die Auseinandersetzung mit alternativen Proteinquellen gefordert. Unter Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen gibt es schon seit Jahren den Konsens, dass Haltung und Nutzung von Tieren in der Landwirtschaft aktuell nicht nachhaltig sind, aber nachhaltig gestaltet werden können. Dazu müsste allerdings nicht nur die Produktion, sondern vor allem auch der Konsum tierischer Produkte reduziert werden. Auch die Haltungsformen sollten nachhaltiger gestaltet werden [18].

Bei Betrachtung der ökonomischen und ökologischen Aspekte gerade in Zeiten des Klimawandels stehen dabei besonders die Treibhausgasemissionen im Fokus. In Abbildung 8 ist der Ausstoß von Treibhausgasen durch tierischer Proteinquelle (Schwein, Rind, Geflügel) im Vergleich zu pflanzlichen (Soja, Gluten, Mykoprotein) modellhaft dargestellt. Hierbei fällt besonders die Produktion von Rindfleisch negativ auf. Betrachtet man den Beitrag der Landwirtschaft an den gesamten Treibhausgasemissionen so fällt dieser Sektor mit nennenswerten 15 % ins Gewicht (Abbildung 9). Diese Emissionen setzen sich aus CO₂

(Brandrodung für Futtermittelanbau und Weideland), Lachgas (Düngemiteleinsetzung) und Methan (Rinderhaltung) zusammen. Hierbei muss beachtet werden, dass die Klimawirkung von CO₂ im Vergleich zu Methan (25-fach) und Lachgas (300-fach) geringer ist [18].

Darüber hinaus ist der hohe Flächenverbrauch für die Futtermittelproduktion und die Ineffizienz des Einsatzes von Wasser, Energie und Boden zur Produktion tierischer Proteine im Vergleich zur Nutzung alternativer Proteinquellen zu betrachten (vgl. Abbildung 11).

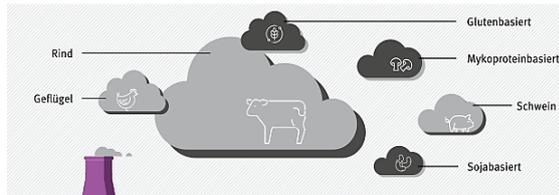


Abbildung 8: Treibhausgasemissionen tierischer (hellgrau) und pflanzlicher (dunkelgrau) Proteinquellen im Vergleich [6]

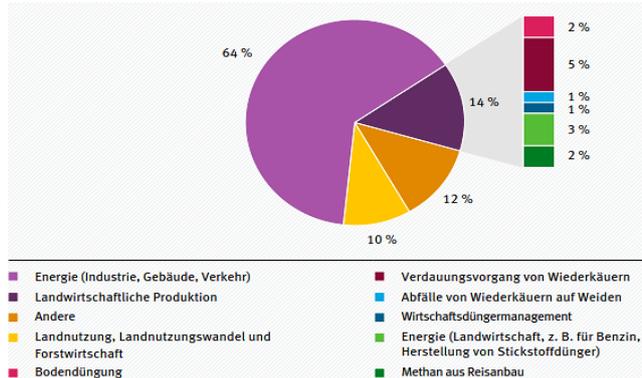


Abbildung 9: Globale Treibhausgasemissionen der landwirtschaftlichen Produktion im Vergleich zu anderen Bereichen im Jahr 2010 [6]

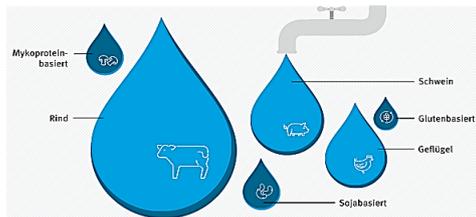


Abbildung 10: Wasserverbrauch bei der Produktion tierischer (hellblau) und pflanzlicher (dunkelblau) Proteinquellen [6]

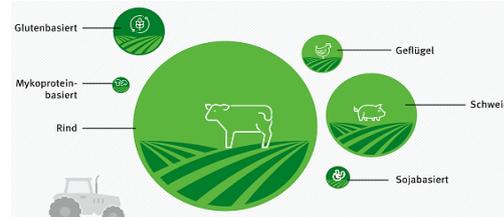


Abbildung 11: Landnutzung tierischer und pflanzlicher Proteinquellen im Vergleich [6]

Ein großer Teil der Anbaufläche für den deutschen Fleischkonsum liegt dabei in Südamerika und dient vor allem dem Sojaanbau zur Tierfütterung. Im Zuge dessen kommt es vermehrt zur Abholzung von Regenwald und dem Verlust endemischer Arten [18]. Der Umweg der Kalorienaufnahme über ein tierisches Produkt ist mit einem hohen Energieverlust im Vergleich zu dem direkten Verzehr der pflanzlichen Produkte verbunden (vgl. Trophiestufen). So wird besonders bei der Produktion von Rindfleisch eine große Menge an Wasser verbraucht (vgl. Abbildung 10). Für die Produktion von 100 g essbarem Rind benötigt man 1500 l Wasser [18]. Global betrachtet ist die Landwirtschaft mit in etwa 69% des jährlich weltweit entnommenen Süßwassers der größte Süßwasserverbraucher [18]. Davon entfällt ein Drittel auf die Fleischproduktion. Darüber hinaus führt der hohe Düngemiteleinsetzung zur Eutrophierung von Gewässern und bringt das empfindliche ökologische System aus dem Gleichgewicht.

Wie durch die Schilderungen ersichtlich wird, ist eine Umstellung der Lebensmittelproduktion notwendig. Dies stellt aber aus wirtschaftlicher Sicht (Landwirte, Produktionsverfahren, Produktionsketten etc.) eine große Herausforderung dar und kann nur als längerfristiger Prozess umgesetzt werden.

Auch aus gesundheitlicher Sicht lohnt sich eine Einschränkung des Konsums tierischer Produkte. Besonders in Bezug auf die Zivilisationskrankheiten (Diabetes, Herz-Kreislauf, Krebs), die für das deutsche Gesundheitssystem eine große Belastung darstellen, wird von der DGE empfohlen maximal 30 kg Fleisch/Jahr zu sich zu nehmen [7]. Im aktuellen EAT-Lancet-Bericht geben 37 Experten und Expertinnen Empfehlungen zu einer „Planetary Health Diet“, die eine gesunde Ernährung innerhalb planetarer Grenzen weltweit ermöglicht. Dabei wird sogar von einem Maximum von 15 kg Fleisch ausgegangen [21]. Dies entspricht 41 g Fleisch pro Tag.

Darüber hinaus geht es auch um ethisch motivierte Aspekte des Tierwohls bei Haltung, Transport und Schlachtung. Beim Großteil der Tierbetriebe werden den Kälbern Hörner entfernt, ferkeln Schwänze kupiert oder dem Geflügel Schnäbel gekürzt. Auch der hohe Antibiotikaeinsatz und die potentielle Belastung mit multiresistenten Keimen spielen eine Rolle.

Die größte Hürde, welche dafür jedoch überwunden werden muss, ist der Mensch selbst. Für den Menschen ist der Verzehr von Fleisch kulturell und traditionell verankert und gilt als ein Zeichen für Wohlstand. Allein in Deutschland gibt es unzählige regionale Gerichte, welche sich um Fleisch drehen, wie etwa die Roulade oder die Weißwurst. Diese Speisen haben die meisten Deutschen als Kinder kennen und lieben gelernt. Ein möglicher Verzicht



Abbildung 12: Einflussfaktoren der zukünftigen Ernährungswende [6]

ist daher eine Entwicklung, welche mehrere Generationen andauern könnte. Hinzu kommt, dass auch aktuelle Entwicklungsländer immer wohlhabender werden. Die Menschen dort wollen ihren eigenen Lebensstandard verbessern und ihr Wohlhaben zeigen. Fleisch, als teures Lebensmittel, spielt dabei eine große Rolle. Es wird daher von den aufstrebenden Ländern als ‚unfair‘ empfunden, dass Industrieländer, welche derartige Luxusgüter bereits Jahrhunderte genießen, zum Verzicht an Fleisch aufrufen.

Wie ersichtlich ist, handelt es sich also gerade unter Anbetracht des Bevölkerungswachstums und des Klimawandels um ein gesellschaftlich, wirtschaftlich und politisch höchst relevantes Zukunftsthema, wie der Proteinbedarf der Menschen in Zukunft nachhaltiger gedeckt werden kann.

Die Bevölkerung wächst aktuellen Hochrechnungen zufolge in den kommenden Jahrzehnten weiter und 2030 sollen 8,6 Mrd. Menschen die Erde bewohnen, 2050 werden es 9,8 Mrd. Menschen sein. Dies entspräche einer Steigerung um 1 Mrd. Menschen in zwölf Jahren [20, S.1 ff.]. Abbildung 12 verdeutlicht die vielfältigen Zusammenhänge.

II. Schülermaterial



V1 Wasserlöslichkeit von Aminosäuren

Informationen

Einleitung

Aus dem Biologieunterricht kennst du Proteine bestimmt schon in ihrer Funktion als Enzyme, Baustoffe des Körpers und wichtiger Makronährstoff der menschlichen Ernährung. Vielleicht weißt du auch aus dem Chemieunterricht schon, dass Proteine aus Aminosäuren aufgebaut sind. Diese heißen so, da sie neben einer Aminogruppe auch stets eine Säuregruppe aufweisen. Je nachdem, welche weiteren Gruppen eine Aminosäure aufweist, besitzt sie unterschiedliche Eigenschaften. Dies wirkt sich auch auf die Wasserlöslichkeit unterschiedlicher Aminosäuren aus.

Aufgabenstellung

1. **Erkläre wodurch ein Stoff wasserlöslich oder wasserunlöslich wird.**
2. **Vergleiche die Wasserlöslichkeit der unterschiedlichen Aminosäuren bzw. Aminosäure-Mischungen!**
3. **Begründe die unterschiedliche Wasserlöslichkeit der untersuchten Aminosäuren.**

Das Experiment

Materialien

- 3 (Becher)Gläser (100-250 mL)
- 1 Teelöffel/Spatel

Chemikalien

- Wasser
- Glutamin, EAAs, BCAAs

Durchführung

1. Gib in jedes Glas einen Teelöffel einer der Aminosäuren bzw. Aminosäure-Mischungen.
2. Füge nun jeweils 50 mL Wasser hinzu und rühre gut um.
3. Beobachte die Löslichkeit der unterschiedlichen Pulver nach 0, 5 und 10 Minuten.
4. Notiere dir deine Beobachtungen zum unterschiedlichen Lösungsverhalten der Aminosäure-Pulver.

Erklärung/ Information

Bei BCAAs handelt es sich um eine Mischung aus den Aminosäuren Valin, Isoleucin und Leucin. Als essentielle Aminosäuren (EAAs) werden die Aminosäuren bezeichnet, die dem menschlichen Körper über die Ernährung zugeführt werden müssen, da er diese nicht selbst synthetisieren kann. Hierbei handelt es sich neben den bereits erwähnten BCAAs zusätzlich um Lysin, Methionin, Phenylalanin, Threonin und Tryptophan.





V2 Proteingehalt unterschiedlicher Milchalternativen

Informationen

Einleitung

Proteine stellen neben Kohlenhydraten und Fetten einen der drei Makronährstoffe der menschlichen Ernährung dar. Ein typischer Nachweis von Proteinen ist deren Denaturierung in Anwesenheit von Säuren. Dabei verändern die Proteine ihre Struktur.

Aufgabenstellung

1. Nenne tierische und pflanzliche Proteinquellen.
2. Untersuche verschiedene Milchalternativen auf ihren Proteingehalt.
3. Erkläre deine Beobachtungen und stelle sie in Zusammenhang mit den Nährwertangaben auf den Pflanzendrinks.
4. Wiederhole den Versuch mit Kuhmilch. Vergleiche deine Ergebnisse mit denen aus dem ersten Durchgang.
5. Bewerte die Pflanzendrinks in ihrer Qualität als Milchalternative in Bezug auf den Makronährstoff Protein.

Das Experiment

Materialien

- 4-5 (Becher)Gläser (100-250 mL)
- 1 Teelöffel

Chemikalien

- Wasser
- Verschiedene Pflanzendrinks (Soja-, Hafer-, Reis-; Erbse-, Mandelrink)
- 1 Zitrone(nsaft)

Durchführung

1. Fülle in jedes Glas in etwa 50 mL einer der Pflanzendrink und in eines 50 mL Kuhmilch.
2. Füge nun jeweils 3 Teelöffel Zitronensaft hinzu und rühre gut um.
3. Beobachte nach 0, 5, 10 Minuten und gegeben falls über Nacht, was mit den Mischungen passiert. Rühre dazu noch einmal um.

Erklärung/ Information

Auf den Nährwertangaben von Lebensmitteln findest du neben den Inhaltstoffen und Kalorien auch Informationen über die Menge an Fett, Kohlenhydraten, Proteinen, Salz und anderen Nährstoffen im Lebensmittel. Die Angaben beziehen sich dabei immer auf 100 g des Produkts.



III. Didaktische Hinweise

Die Kinder und Jugendlichen heute wachsen mit einem nie da gewesenen Verständnis für die Umwelt und einem damit einhergehenden Wissen über sich zuspitzende Probleme in diesem Bereich auf. Der Klimawandel als globale Krise wird immer präsenter in den Medien und der Politik.

Neben dem Aufbau eines Bewusstseins über ihre Umwelt sollen heutige Bildungsinstitutionen die Schülerinnen und Schüler auch auf die eigenständige Gesunderhaltung ihres Körpers vorbereiten. Dieses Thema unterstützen viele Fächer, allen voran natürlich der Sport, aber auch viele Themen innerhalb der Naturwissenschaften. Das hier im Fokus liegende Thema ‚Alternative Proteinquellen‘ behandelt die Ernährung und verbindet dabei Umwelt und Gesundheit. Im Mensch-Natur-Technik-Unterricht der fünften und sechsten Klasse taucht der Begriff ‚Gesunderhaltung unseres Körpers‘ bereits auf, besonders wird in dieser Phase neben Hygiene und Drogen auch auf die Ernährung eingegangen [22].

In der Sekundarstufe wird erstmals der Begriff Nährstoffe aufgeschlüsselt, zu denen auch die Proteine gehören. Später wird Ernährung auch im Biologieunterricht der achten Klasse besprochen, wobei Eiweiße in Nahrungsmitteln nachgewiesen werden sollen [23]. Die Schülerinnen und Schüler besitzen demnach bereits Basiswissen zu Proteinen, bevor diese in der Sekundarstufe zwei in Chemie unter ‚Struktur und Reaktionen der Kohlenhydrate und Proteine‘ behandelt werden [24]. Dort erhält die Klasse einen groben Überblick zu dem vielfältigen Thema der organischen Chemie und beschäftigt sich im Anschluss mit den Aminosäuren und daraufhin erst mit den Proteinen.

Hierbei ist es bei der Behandlung von Aminosäuren nützlich, einen Alltagsbezug für die Schülerinnen und Schüler herzustellen, da vielen der Begriff innerhalb von Alltagsthemen großteils unbekannt sein dürfte. Nicht so jedoch mit den Proteinen. Eine Lehrkraft könnte beispielsweise mit einem Brainstorming zu Proteinen anfangen und anschließend mit deren chemischen Aufbau aus Aminosäuren und den damit einhergehenden Eigenschaften fortfahren.

Im regulären Schulunterricht würden sich im Themenkomplex Proteine noch weitere Experimente anbieten, welche auch namentlich im Lehrplan erwähnt werden, die Xanthoproteinreaktion und die Biuretreaktion. Diese sollten einen deutlichen Effekt zeigen, zeitlich nicht lange dauern und den eingesetzten Chemikalien nach ein überschaubares Gefahrenpotenzial aufweisen. Da hier aber Chemikalien benötigt werden, müssten sich die Lehrpersonen im momentanen Onlineunterricht entweder in der Schule befinden oder sich die Materialien nach Hause schicken lassen. Wir konnten im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit diese Experimente in Ermangelung der Chemikalien im Lockdown nicht selbst durchführen. Deshalb sind sie nur als Ergänzung erwähnt. Stattdessen liegt der Fokus auf Versuchen, die mit Stoffen aus dem Alltag durchführbar sind.

Die hier vorliegende Arbeit konzentriert sich unter dem Hauptthema ‚Proteine‘ auf das Unterthema ‚Alternative Proteinquellen‘. Dabei handelt es sich, wie bereits angedeutet, um ein sehr aktuelles Thema. Den Schülerinnen und Schülern könnte daher bereits einiges zum Thema bekannt sein. Hierzu können die beiden in unserer Broschüre folgenden Versuche eingebracht werden.

Im Anschluss an die Versuche könnte eine Chemiestunde angeschlossen werden in der die SuS über die herrschenden Umweltprobleme diskutieren können. Dabei lässt sich gut eine Brücke zum Thema der Kohlenwasserstoffe oder generell Kohlenstoff (CO_2 , Erdöl, Benzin) schlagen, welches ebenso Teil des Lehrplans ist.



V1 Wasserlöslichkeit von Aminosäuren

Durchführung:

Zunächst wurde in jede Tasse ein Teelöffel eines Aminosäurepulvers gegeben (Glutamin, BCAAs, EAAs, vgl. Abbildung 13). Im Anschluss wurden jeweils 50 mL hinzugefügt und mit dem Teelöffel umgerührt. Die Löslichkeit der unterschiedlichen Aminosäuremischungen wurde nach 0, 5 und 10 min dokumentiert.



Abbildung 13: Je ein Teelöffel BCAAs, Glutamin und EAAs

Beobachtungen:

Glutamin löst sich direkt nach dem Umrühren (vgl. Abbildung 14). Ein Teil des EAA-Pulvers ist nach 10 min in Lösung gegangen. Die BCAAs hingegen lösen sich auch nach 10 min nicht (vgl. Abbildung 19).



Abbildung 14: Löslichkeit der BCAAs, des Glutamins und der EAAs nach 0 min (links) und 10 min (rechts)

Auswertung:



Die Wasserlöslichkeit von Aminosäuren wird dadurch bestimmt, welche funktionellen Gruppen bzw. welchen Rest die unterschiedlichen Aminosäuren aufweisen. Überwiegt der unpolare Anteil, also zum Beispiel durch lange C-Ketten, dann sind sie nicht bis schlecht wasserlöslich. Liegen viele polare Gruppen vor wie in etwa OH-Gruppen, dann sind die Aminosäuren gut wasserlöslich.

Im vorliegenden Versuch wurden drei unterschiedliche Aminosäure-Mischungen untersucht. Einmal reines Glutamin, dann eine Mischung aus den acht essentiellen Aminosäuren (EAAs, vgl. Abbildung 15) und Branch Chain Amino Acids (BCAAs, vgl. Abbildung 16), also verzweigtkettige Aminosäuren.

	Pro 100 g Pulver	Pro Portion (10 g Pulver)
Energie	1.651 kJ (389 kcal)	165 kJ (39 kcal)
Fett	0 g	0 g
Davon gesättigte Fettsäuren	0 g	0 g
Kohlenhydrate	0 g	0 g
Davon Zucker	0 g	0 g
Eiweiß	98,6 g	9,8 g
Salz	0,17 g	0,02 g
Zusammensetzung des EAA-Pulvers von LPS [14]		
L-Leucin	18,1 g	1,8 g
L-Isoleucin	13,7 g	1,4 g
L-Valin	15,4 g	1,5 g
L-Lysin	13,2 g	1,3 g
L-Phenylalanin	11,9 g	1,2 g
L-Threonin	10,3 g	1,0 g
L-Methionin	6,5 g	0,7 g
L-Tryptophan	3,4 g	0,3 g

Zutaten: L-Leucin, L-Isoleucin, L-Valin, L-Lysin, L-Phenylalanin, L-Threonin, L-Methionin, L-Tryptophan

Abbildung 15: Zusammensetzung des EAA-Pulvers von LPS [14]

Bei Glutamin handelt es sich um eine Aminosäure mit einer Amidgruppe (vgl. Abbildung 17). Diese ist polar, wodurch die Aminosäure trotz Kohlenstoffkette wasserlöslich wird. Dies konnte im Versuch beobachtet werden. Ihre Löslichkeit in Wasser beträgt 26 g/L bei 18 °C [25]. Bei Glutamin handelt es sich um keine essentielle Aminosäure.

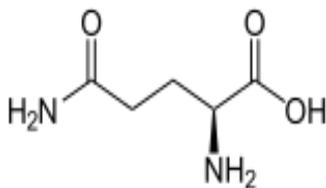


Abbildung 17: Strukturformel von Glutamin [16]

Nährwerte	pro 15g
Brennwert	238 kJ / 57 kcal
Fett	0,16g
- davon gesättigte Fettsäuren	0,0g
Kohlenhydrate	0,33g
- davon Zucker	0,04g
Ballaststoffe	0,35g
Eiweiß	10,0g
Aminosäuren	pro 15g
L-Leucin	6,0g
L-Isoleucin	3,0g
L-Valin	3,0g

Abbildung 16: Zusammensetzung des BCAA-Pulvers von nutri [15]



Bei EAAs handelt es sich um die Aminosäuren Methionin, Valin, Leucin, Isoleucin, Lysin, Phenylalanin, Threonin und Tryptophan (vgl. Abbildung 18).

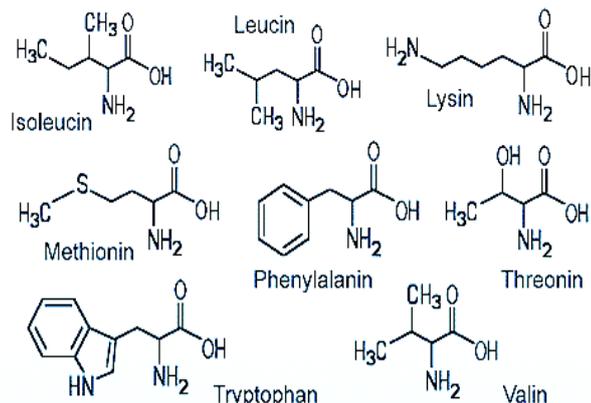


Abbildung 18: Strukturformeln der 8 essentiellen Aminosäuren [17]

Wie aus den Strukturformeln ersichtlich wird (vgl. Abbildung 18), weisen alle diese Aminosäuren unpolare Reste auf wie Phenyl-, Methyl-, Isopropyl- oder andere Kohlenwasserstoffketten. Dadurch sind sie nicht bis kaum wasserlöslich (vgl. Tabelle 1). Valin hat auf Grund des kurzen Rests noch die beste Wasserlöslichkeit im Vergleich zu den anderen unpolaren Aminosäuren. Ausnahme bei den EAAs stellen Threonin und Lysin dar. Diese beiden Aminosäuren sind polar. So enthält Threonin eine OH-Gruppe und Lysin eine weitere Aminogruppe. Die Wasserlöslichkeit von Threonin beträgt 90 g/L bei 20°C [25], die von Lysin hingegen 300 g/L bei 20 °C [26]. Dies erklärt, warum die EAAs sich im Vergleich zu Glutamin schlechter in Wasser lösen lassen, jedoch mit der Zeit ein Teil in Lösung geht.

Aminosäure	Wasserlöslichkeit [g/L] bei 20 °C
Isoleucin	40
Leucin	24
Methionin	48
Phenylalanin	27
Tryptophan	10
Valin	85
Threonin	90
Lysin	300

Tabelle 1: Wasserlöslichkeit der EAAs [25,26,27,28,29,30,31,32]

Das BCAA-Pulver enthält die Aminosäuren Leucin, Isoleucin und Valin. Die BCAAs sind folglich in den EAAs enthalten. Bei allen drei Aminosäuren handelt es sich, wie bei den EAAs schon erläutert, um unpolare und somit wasserunlösliche Aminosäuren. Dies erklärt auch, warum die BCAAs am schlechtesten von allen Proben im Wasser gelöst werden konnte.



Bei den EAAs hingegen waren auch wenige gut wasserlösliche Aminosäuren enthalten, wodurch die Wasserlöslichkeit nach 5 -10 min besser ist als bei den BCAAs. Allerdings sollten bei ausreichend Zeit, alle Aminosäuren irgendwann in Lösung gehen, denn ein gewisses Maß an Wasserlöslichkeit besitzen sie alle.

Didaktischer Kommentar:

Das Experiment zur Wasserlöslichkeit von Aminosäuren kann eingesetzt werden, um als Bestätigungsversuch die zuvor genannten Eigenschaften experimentell nachzuvollziehen. Speziell zur Beantwortung der Aufgaben wird Vorwissen zu Aminosäuren und deren Löslichkeit benötigt, weshalb dieser Versuch erst in der 12. Klasse durchgeführt werden kann. Von SuS der 12. Klasse wird dann erwartet, mit Hilfe von Begriffen wie ‚polar‘ und ‚unpolar‘ die Löslichkeit von Stoffen zu erklären (vgl. Aufgabe 1) und anhand dieser Theorie die praktischen Beobachtungen aus Aufgabe 2 zu erklären (vgl. Aufgabe 3).

Das angestrebte Lernziel dieses Versuches wäre dabei:

Die SuS können die Löslichkeit von Aminosäuren auf Basis ihrer Struktur an einem praktischen Beispiel erklären.

Der Versuch selbst ist zwar in wenigen Minuten durchführbar, jedoch müssten die Aminosäurengemische über einen Zeitraum von etwa einer Stunde weiter beobachtet werden. Dabei muss die Lehrkraft im Verlauf der voranschreitenden Unterrichtsstunde immer mal wieder auf die Gemische hinweisen und an die Dokumentation erinnern. Der Versuch bietet sich durch seine leichte Durchführbarkeit und sein geringes Gefahrenpotenzial als Schülerversuch im Unterricht an. In Hinsicht auf die momentane Situation jedoch, in welcher kaum gemeinsamer Unterricht an Schulen stattfindet, sollte der Versuch eher als Lehrerdemonstrationsexperiment durchgeführt werden, da nicht zu erwarten ist, dass die Schülerinnen und Schüler zu Hause Aminosäuren haben. Diese können lediglich mit hohen Kosten verbunden bei LPS Sports oder nutri+ bestellt werden.



V2 Proteingehalt unterschiedlicher Milchalternativen

Durchführung:

Es wurden 50 mL unterschiedlicher Pflanzendrink (Hafer-, Soja-, Erbsen-, Reis-Kokos-, Dinkel- und Mandeldrink) in jeweils eine Tasse gegeben (vgl. Abbildung 19 und 20). Im Anschluss wurden drei Teelöffel Zitronensaft hinzugefügt und umgerührt. Danach wurden die Flüssigkeiten auf ihre Konsistenz überprüft. Der Soja-, Erbsen-, Dinkel- und Mandeldrink wurden über Nacht in den Kühlschrank gestellt und am nächsten Tag erneut betrachtet.



Abbildung 19: Versuchsmaterial



Abbildung 20: In jedes Glas wurden 50 mL unterschiedlicher Pflanzendrink gegeben

Beobachtungen:

Nach Zugabe des Zitronensafts verändert der Erbsen-, als auch der Sojadrink seine Konsistenz. Sie sind nicht mehr homogen und es zeigen sich weiße Ausflockungen (vgl. Abbildung 21).

Bei den anderen Pflanzendrinks hingegen kann keine Veränderung beobachtet werden. Beispielhaft ist dies anhand der Hafermilch dokumentiert (vgl. Abbildung 22).



Abbildung 21: Sojamilch nach Zugabe des Zitronensafts



Abbildung 22: Haferdrink nach Zugabe des Zitronensafts



Lässt man die Pflanzendrinks (Soja-, Erbsen-, Dinkel- und Mandeldrink) mit zugegebenen Zitronensaft über Nacht im Kühlschrank stehen, haben sich außer bei dem Reisdrink zwei Phasen gebildet von denen eine milchig und bröcklig und die andere wässrig trüb ist (vgl. Abbildung 23)



Abbildung 23: von links nach rechts: Soja-, Mandel-, Erbsen- und Dinkeldrink mit Zitronensaft nach 24 h im Kühlschrank

Auswertung:

Bei der Zugabe von Säure zu eiweißhaltigen Lebensmitteln kommt es zur Denaturierung der enthaltenen Proteine. Dabei wird die Proteinstruktur verändert und es kommt zum Verlust der ursprünglichen Eigenschaften. Säuren (wie Citronensäure in der Zitrone oder Essigsäure in Essig) geben bei ihrer Dissoziation Protonen ab. Diese können von den negativ geladenen Carboxylgruppen der Aminosäuren (auch an den Seitenketten) aufgenommen werden. Bei einer Erniedrigung des pH-Werts liegen somit die Aminosäuren vor allem als Kationen vor, denn die Carboxylgruppen haben Protonen aufgenommen ($-\text{COOH}$) und die Aminogruppen ebenso ($-\text{NH}_3^+$). Die veränderten Ladungsverhältnisse sorgen zum einen für das Ausbilden von Hydrathüllen und zum anderen für veränderte intermolekulare Wechselwirkungen zwischen den Aminosäuren und somit kommt es zu einer veränderten Proteinstruktur.

Mit Hilfe von Säure kann also festgestellt werden, ob Proteine in einem Lebensmittel enthalten sind. Wie in Abbildung 26 zu erkennen ist, besitzen die verschiedenen Pflanzendrinks unterschiedliche Nährwerte. Diese sind auch auf den Verpackungen angegeben und können direkt selbstständig während, vor oder nach dem Versuch überprüft werden.

Generell kann man drei Kategorien an Pflanzendrinks unterscheiden. Solche, die auf Basis stärkehaltiger Pflanzen hergestellt werden (Reis-, Dinkel-, Haferdrink), jene, die auf Basis fetthaltiger Pflanzen hergestellt werden (Mandel-, Kokos-, Haselnussdrink) und die, die auf Basis proteinhaltiger Pflanzen hergestellt werden (Erbsen-, Soja-, Lupinendrink).



Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)	Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)	Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)
Brennwert	81 kJ / 20 kcal	163 kJ / 39 kcal	Brennwert	165 kJ / 40 kcal	330 kJ / 79 kcal	Brennwert	200 kJ	48 kcal
Fett	1,4 g	2,8 g	Fett	2,4 g	4,8 g	Fett	1,3 g	
davon gesättigte Fettsäuren	0,1 g	0,2 g	davon gesättigte Fettsäuren	0,4 g	0,8 g	davon gesättigte Fettsäuren	0,2 g	
Kohlenhydrate	1,1 g	2,2 g	Kohlenhydrate	<0,5 g	0,8 g	Kohlenhydrate	8,4 g	
davon Zucker	<0,5 g	<0,5 g	davon Zucker	<0,5 g	0,8 g	davon Zucker	5,6 g	
Ballaststoffe	<0,5 g	0,6 g	Ballaststoffe	<0,5 g	0,8 g	Eiweiß	0,4 g	
Eiweiß	0,5 g	1,0 g	Eiweiß	3,9 g	7,8 g	Salz	0,13 g	
Salz	0,12 g	0,24 g	Salz	0,03 g	0,06 g			
Durchschnittliche Nährwerte	RM***	RM*** pro Glas	Durchschnittliche Nährwerte	RM****	RM*** pro Glas			
Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	2 %	Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	4 %			
Fett	70 g	4 %	Fett	70 g	7 %			
davon gesättigte Fettsäuren	20 g	1 %	davon gesättigte Fettsäuren	20 g	4 %			
Kohlenhydrate	260 g	<1 %	Kohlenhydrate	260 g	<1 %			
davon Zucker	90 g	<1 %	davon Zucker	90 g	<1 %			
Ballaststoffe	-	-	Ballaststoffe	-	-			
Eiweiß	50 g	2 %	Eiweiß	50 g	16 %			
Salz	6 g	4 %	Salz	6 g	1 %			

Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)	Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)
Brennwert	144 kJ / 34 kcal	287 kJ / 68 kcal	Brennwert	164 kJ / 39 kcal	328 kJ / 78 kcal
Fett	0,9 g	1,8 g	Fett	2,0 g	4,0 g
davon gesättigte Fettsäuren	0,8 g	1,6 g	davon gesättigte Fettsäuren	0,4 g	0,8 g
Kohlenhydrate	6,2 g	12 g	Kohlenhydrate	2,1 g	4,2 g
davon Zucker	3,5 g	7,0 g	davon Zucker	2,1 g	4,2 g
Ballaststoffe	<0,5 g	<0,5 g	Ballaststoffe	<0,5 g	<0,5 g
Eiweiß	<0,5 g	<0,5 g	Eiweiß	3,2 g	6,4 g
Salz	0,14 g	0,28 g	Salz	0,23 g	0,46 g
Durchschnittliche Nährwerte	RM***	RM*** pro Glas	Durchschnittliche Nährwerte	RM**	RM** pro Glas
Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	3 %	Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	4 %
Fett	70 g	3 %	Fett	70 g	6 %
davon gesättigte Fettsäuren	20 g	8 %	davon gesättigte Fettsäuren	20 g	4 %
Kohlenhydrate	260 g	5 %	Kohlenhydrate	260 g	2 %
davon Zucker	90 g	8 %	davon Zucker	90 g	5 %
Ballaststoffe	-	-	Ballaststoffe	-	-
Eiweiß	50 g	1 %	Eiweiß	50 g	13 %
Salz	6 g	5 %	Salz	6 g	8 %

Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)	Durchschnittliche Nährwerte	pro 100 ml	pro Glas (200 ml)
Brennwert	187 kJ / 44 kcal	373 kJ / 89 kcal	Brennwert	187 kJ / 44 kcal	373 kJ / 89 kcal
Fett	1,1 g	2,2 g	Fett	1,1 g	2,2 g
davon gesättigte Fettsäuren	<0,1 g	0,2 g	davon gesättigte Fettsäuren	<0,1 g	0,2 g
Kohlenhydrate	7,7 g	15 g	Kohlenhydrate	7,7 g	15 g
davon Zucker	7,0 g	14 g	davon Zucker	7,0 g	14 g
Ballaststoffe	<0,5 g	0,8 g	Ballaststoffe	<0,5 g	0,8 g
Eiweiß	0,7 g	1,4 g	Eiweiß	0,7 g	1,4 g
Salz	0,08 g	0,16 g	Salz	0,08 g	0,16 g
Durchschnittliche Nährwerte	RM***	RM*** pro Glas	Durchschnittliche Nährwerte	RM***	RM*** pro Glas
Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	4 %	Brennwert	8400 kJ / 2000 kcal	4 %
Fett	70 g	3 %	Fett	70 g	3 %
davon gesättigte Fettsäuren	20 g	8 %	davon gesättigte Fettsäuren	20 g	8 %
Kohlenhydrate	260 g	6 %	Kohlenhydrate	260 g	6 %
davon Zucker	90 g	16 %	davon Zucker	90 g	16 %
Ballaststoffe	-	-	Ballaststoffe	-	-
Eiweiß	50 g	13 %	Eiweiß	50 g	13 %
Salz	6 g	8 %	Salz	6 g	8 %

Abbildung 24: Nährwerte der Pflanzendrinks: Oben: Mandel-, Soja-, Haferdrink; Unten: Kokos-Reis-, Erbsen-, Dinkeldrink

Alle Drinks besitzen dabei alle drei Makronährstoffe (Fette, Eiweiße, Kohlenhydrate), aber je nachdem in welche Kategorie der Pflanzendrink gehört, enthält er einen der drei Makronährstoffe in höherem Anteil als die anderen. Außerdem existieren auch Mischformen der einzelnen Pflanzendrinks wie etwa Reis-Kokosdrink. So können die Makronährstoffe und der Geschmack vervollständigt werden.

Im vorliegenden Fall wurden Mandel-, Hafer-, Soja-, Kokos-, Reis-, Erbsen- und Dinkeldrink (vgl. Abbildung 24) verwendet. Hierbei stellen Hafer- (8,4 g KH/100 mL) und Dinkeldrink (7,7 g KH/100 mL) Alternativen dar, die auf stärkehaltigen Pflanzen basieren und somit vor allem Kohlenhydrate enthalten und nur wenig Eiweiß (Eiweißgehalt: Hafer: < 0,4 g/100 mL; Dinkel: 0,7 g/100 mL; vgl. Abbildung 24). Diese beiden zeigen daher auch keine Reaktion mit dem Zitronensaft.





Daneben wurden noch Reis-Kokos- und Mandeldrink untersucht. Letzter enthält vor allem Fett (1,4 g/100 mL) und ersterer vor allem Kohlenhydrate (5,2 g/100 mL). Beide sind allerdings arm an Eiweiß (Kokos-Reis: 0,9 g/100 mL; Mandel: 0,5 g/100 mL; vgl. Abbildung 24) und zeigen dadurch auch keine Reaktion. Auf die Durchführung mit Kuhmilch wurde aus Einfachheit und ethischen Gründen bei der Erprobung verzichtet. Um Unterricht ist dies jedoch vorgesehen.

Didaktischer Kommentar:

Nach einem kurzen erklärenden Einstieg für die Schülerinnen und Schüler gliedert sich der hier durchgeführte Versuch zum Proteingehalt unterschiedlicher Milchalternativen sehr gut ein. Man könnte beim Einstieg beispielsweise aufzählen lassen, was die Schülerinnen und Schüler alles für Proteine und Proteinersatzprodukte kennen und dabei auf die Problematik der Rinderhaltung eingehen. Dies entspricht Aufgabe 1 auf dem Arbeitsblatt, welche zwischen tierischen (Fleisch, Eier, Kuhmilch) und pflanzlichen Proteinquellen (Soja, Mandeln) unterscheidet. Im Anschluss könnte man das Thema Milch ansprechen und das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler aktivieren, indem Milchsorten genannt werden sollen. Für den Einsatz im Onlineunterricht ist als Vorbereitung die Hausaufgabe aufzugeben, mindestens drei verschiedene alternative Milchsorten zu kaufen und für den Chemieunterricht am Arbeitsplatz vorliegen zu haben. Es sollte bei der späteren Versuchsdurchführung darauf geachtet werden, dass die Schüler und Schülerinnen jeweils einen Pflanzendrinks mit relevantem Proteingehalt untersuchen (Soja-, Lupinen-, Erbsendrink), um einen Vergleich ziehen zu können.

In Form eines Erarbeitungsversuches können die Schülerinnen und Schüler nach Vorstellung der Versuchsdurchführung ergänzend Hypothesen aufstellen, welche Milch den höchsten Proteingehalt aufweist. Dabei dürfen die Inhaltsangaben mit einbezogen werden, worauf jedoch nicht explizit verwiesen wird. Die Schülerinnen und Schüler können so durch eine einfache Weise eine sich später bestätigende Hypothese entwerfen. Damit sind leicht Erfolgserlebnisse zu erzielen, welche die Motivation erhöhen. Alles was sie dafür tun müssen ist, auf die Idee zu kommen, die Verpackung überhaupt zu lesen, die Verpackung richtig zu lesen und zu verstehen. Dazu sollten schon Grundlagen in der Ernährung vorhanden sein, so dass die Nährstoffangaben auf den Verpackungen verstanden und gedeutet werden können. Sind diese Grundlagen vorhanden, so kann der Versuch im MNT Unterricht der fünften und sechsten Klasse eingesetzt werden.

So wie die Aufgaben in der Versuchsanleitung gestellt sind, legen diese den Fokus auf Proteine, weshalb chemisches Wissen über Proteine und deren Eigenschaften von Vorteil ist, aber bei diesem Versuch nicht zwingend notwendig, wenn man die Erklärungen über des Denaturierungsvorgans





außen vorlässt. Dieses Arbeitsblatt ist folglich für die 12. Klasse vorgesehen, der Versuch kann jedoch mit anderen Aufgaben auch in anderen Klassenstufen verwendet werden.

Wird der Versuch als Bestätigungsversuch eingesetzt, so können die Verpackungen im vorangehenden Unterricht gemeinsam untersucht werden und das Experiment selbst bestätigt die daraus resultierenden Schlussfolgerungen. Dies hat den Vorteil, dass die Schülerinnen und Schüler sich mehr auf die Entwicklung ihrer Beobachtungsgabe konzentrieren können, was deutlich einfacher ist, wenn die Ergebnisse bereits bekannt sind. Man kann das Verständnis der Schülerinnen und Schüler noch verstärken, wenn man ebenfalls die reguläre Kuhmilch untersucht, so wie es in der Versuchsanleitung vorgesehen ist. Auf diese Weise erhält die Klasse einen direkten Bezug und kann die ‚Alternativen‘ kritisch mit dem ‚Original‘ vergleichen. Die Behandlung des Themengebietes ‚Alternative Proteinquellen‘ macht diesen Vergleich mit regulärer Kuhmilch sogar zwingend notwendig.

Im Zusammenhang mit Versuchen zum Proteingehalt steht der Begriff Denaturierung. Dieser Begriff muss der Klasse vor Einführung des Experimentes erläutert werden. Dies gestaltet sich am einfachsten, wenn diese spezielle Eigenschaft von Proteinen bereits bei den allgemeinen Eigenschaften angesprochen wurde. Schlussendlich ergeben sich für diesen Versuch die folgenden zwei Lernziele:

Die SuS können mit Hilfe der Denaturierungsreaktion verschiedene Lebensmittel auf ihren Proteingehalt überprüfen

Die SuS können die Nährstoffangaben auf Lebensmitteln erklären und diese mit den Beobachtungen aus dem Versuch in Verbindung bringen

Der Versuch, bei welchem der Proteingehalt von alternativen Milchprodukten ermittelt werden soll, verdeutlicht, dass ein Teil der ‚Alternativen‘ (Soja-, Lupinen-, Erbsendrink) dem ‚Original‘ in Bezug auf den Proteingehalt in Nichts nachsteht. Alternative Proteinquellen schonen allerdings zusätzlich die Umwelt, da keine Tierhaltung nötig ist.

IV. Referenzen

- [1] Biesalski, H.-K., Köhrle, J., Schümann, K., & Adam, O. (Eds.). (2002): *Vitamine, Spurenelemente und Mineralstoffe: Prävention und Therapie mit Mikronährstoffen*. Stuttgart: Thieme
- [2] Rehner, G., Daniel H. (2010): *Biochemie der Ernährung*, Springer Spektrum.
- [3] Rassow, J.; Hauser, K.; Netzker, R.; Deutzmann, R. (2012). *Biochemie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- [4] Kalbacher, H.; Leibold, J.; Müller, J.. *Chemisches Praktikum für Mediziner. Kurstag 10: Aminosäuren und Kohlenhydrate*. 3. Überarbeitete Auflage. Universität Tübingen: Interfakultäres Institut für Biochemie. Verfügbar unter: <http://www.kalbacher.uni-tuebingen.de/lehre/skript/Kurstag10.pdf>
- [5] Berger-Schaffitzel, Christiane (2006). *Eigenschaften von Aminosäuren*. EducETH - ETH-Kompetenzzentrum für Lehren und Lernen. Verfügbar unter: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/dual/educeth-dam/documents/Unterrichtsmaterialien/chemie/Aminos%C3%A4uren/Aminosaeuren_mit_deckblatt.pdf
- [6] Rittenau, N. (2018): *Vegan-Klischee ade! Wissenschaftliche Antworten auf kritische Fragen zu veganer Ernährung*. Mainz: Ventil Verlag UG.
- [7] Deutsche Gesellschaft für Ernährung, Österreichische Gesellschaft für Ernährung, Schweizerische Gesellschaft für Ernährung. (2015). *Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr – Protein* (2. Aufl.). Bonn: Neuer Umschau Buchverlag.
- [8] World Health Organization. (2007). *Protein and Amino Acid requirements in human nutrition. Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation*. WHO Technical Report Series 935, Geneva: World Health Organization.
- [9] Davey, G. K., Spencer, E. A., Appleby, P. N., Allen, N. E., Knox, K. H. & Key, T. J. (2003): *EPIC-Oxford: lifestyle characteristics and nutrient intakes in a cohort of 33 883 meat-eaters and 31546 non meat-eaters in the UK*. *Public Health Nutr*, 6 (3), 259–69.
- [10] Larsson, C. L. & Johansson, G. K. (2002): *Dietary intake and nutritional status of young vegans and omnivores in Sweden*. *Am J Clin Nutr*, 76 (1), 100–6.
- [11] Schüpbach, R., Wegmüller, R., Berguerand, C., Bui, M. & Herter-Aeberli, L. (2017). *Micronutrient status and intake in omnivores, vegetarians and vegans in Switzerland*. *Eur J Nutr*, 56 (1), 283–293.
- [12] Waldmann, A., Koschizke, J. W., Leitzmann, C. & Hahn, A. (2003). *Dietary intakes and lifestyle factors of a vegan population in Germany: results from the German Vegan Study*. *Eur J Clin Nutr*, 57 (8), 947–55.
- [13] Haddad, E. H., Berk, L.S., Kettering, J. D., Hubbard, R. W. & Peters, W. R. (1999): *Dietary intake and biochemical, hematologic, and immune status of vegans compared with nonvegetarians*. *Am J Clin Nutr*, 70 (3), 586–593.
- [14] American Dietetic Association (ADA); Dietitians of Canada. (2003): *Position of the American Dietetic Association and Dietitians of Canada: vegetarian diets*. *Can J Diet Pract Res*, 64 (2), 62–81.
- [16] British Dietetic Association (BDA). (2017): *Food Fact Sheet – Vegetarian Diets*. (zuletzt abgerufen am 26.02.2021) Verfügbar unter: <https://bit.ly/2CjTFqg>
- [17] Dietitians Association of Australia (DAA). (2017): *Vegan diets: everything you need to know*. Zugriff am 1. Juni 2018. Verfügbar unter <https://bit.ly/2xQR5v1>
- [18] www.ecodemy.de
- [19] Umweltbundesamt (2019): *Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch*.
- [20] United Nations. (2017). *World Population Prospects. The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables* (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Hrsg.) (Working Paper ESA/P/WP/248). Zugriff am 13.04.2017. Verfügbar unter <https://esa.un.org/unpd/wpp/>
- [21] Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S. et al. (2019). *Food in the Anthropocene. The EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems*. Zugriff am 18.01.2019. Verfügbar unter [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(18\)31788-4.pdf?utm_campaign=tleat19&utm_source=HubPage%20https://](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(18)31788-4.pdf?utm_campaign=tleat19&utm_source=HubPage%20https://)

- doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4 (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [22] Thüringer Schulportal (2015). „Thüringer Ministerium für Bildung, Jugend und Sport, Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife Mensch-Natur-Technik“. In: Internetseite Thüringer Schulportal, PDF: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=1393>, (zuletzt abgerufen am 21.02.2021)
- [23] Thüringer Schulportal (2012). „Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife, Biologie“. In: Internetseite Thüringer Schulportal, PDF: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2284>, (zuletzt abgerufen am 21.02.2021)
- [24] Thüringer Schulportal (2012). „Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife, Chemie“. In: Internetseite Thüringer Schulportal, PDF: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2285>, (zuletzt abgerufen am 21.02.2021)
- [25] <https://de.wikipedia.org/w/index.php?curid=197666> 06.02.2021, 14:44
- [26] <https://studierplatz2000.tu-dresden.de/toolkit/bdl2/comp/Lexikon/Lysin.htm> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [27] <https://de.wikipedia.org/wiki/Isoleucin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [28] <https://de.wikipedia.org/wiki/Leucin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [29] <https://de.wikipedia.org/wiki/Methionin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [30] <https://de.wikipedia.org/wiki/Phenylalanin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [31] <https://de.wikipedia.org/wiki/Tryptophan> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [32] <https://de.wikipedia.org/wiki/Valin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)

Quellenverzeichnis der Abbildungen

- [1] <https://www.onmeda.de/naehrstoffe/eiweiss-struktur-3799-2.html#:~:text=Erst%20wenn%20sich%20mehr%20als%20100%20Aminos%C3%A4uren%20miteinander,daf%C3%BCr,%20dass%20Muskeln%20stabil%20und%20gleichzeitig%20elastisch%20bleiben.> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [2] <https://de.wikipedia.org/wiki/Peptidbindung#/media/Datei:Peptidbindung.svg> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [3] <https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=dz8GExGS&id=D187EE5A68B9C4D7E5319BCA506C02A4B2D20918&thid=OIP.dz8GExGS-zBSgnv4ngT7mcAHaDG&mediaurl=https%3a%2f%2fbiochem4you.files.wordpress.com%2f2013%2f03%2fprotein-structure2.png&expw=398&expw=950&q=proteinstrukturen&simid=608049159356024999&ck=DD97D75D3FA7BDE317B7B4582BBF7AC3&selectedIndex=4&FORM=IRPRST&ajaxhist=0> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Aminos%C3%A4uren> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [5] Rittenau, N. (2018): Vegan-Klischee ade! Wissenschaftliche Antworten auf kritische Fragen zu veganer Ernährung. Mainz: Ventil Verlag UG.
- [6] Umweltbundesamt (2019): Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft. Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch.
- [14] <https://veganfitness.de/LSP-Sports-Big-8-Essentielle-Aminosaeuren-Pulver-250g> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [15] <https://veganfitness.de/Nutri-Plus-BCAA-Instant-Pulver-2-1-1-300g> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Glutamin> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)
- [17] <https://www.seilnacht.com/Lexikon/amino.html> (zuletzt abgerufen am 26.02.2021)

2. Zellulose (Eric Deutsch, Louis Göhring, Mathias Ludolph, Paul Worliczek)

I. Sachinformation

Schon seit Jahrhunderten erfreut sich Cellulose als Werkstoff in der Papier- und Textilindustrie großer Beliebtheit. Die häufig aus Pflanzenmaterial gewonnene Cellulose ist dabei mit anderen Makromolekülen, wie Hemicellulose oder Lignin versetzt, welche den Zellwänden der Pflanze Stabilität verleihen. Erst im letzten Jahrhundert ist es gelungen durch Bakterien reinste Cellulose zu gewinnen, deren Eigenschaften gewinnbringend in der Medizin oder Nahrungswirtschaft eingesetzt werden.

1.1 *Acetobacter xylinum*

Bei dem Essigsäurebakterium *Acetobacter xylinum* handelt es sich, aufgrund der Struktur ihrer Zellwand, um gramnegative Bakterien. In der Natur kommt das aerobe Bakterium auf verrottendem Obst und Gemüse, stehenden Gewässern und in Symbiose mit Hefen (russischer Kefir, Kombucha) vor [2]. Ebenso wie alle Pflanzen ist auch *Acetobacter xylinum* in der Lage Cellulose herzustellen. Im Unterschied zur Pflanzencellulose, welche häufig mit Hemicellulose und Lignin assoziiert ist, scheidet AX hochreine, kristalline Cellulose aus, die sogenannte Bakteriencellulose (BC). Von einigen Autoren wird vermutet, dass das Bakteriencellulose-Vlies dafür sorgt, dass es zum Auftrieb der Bakterienkolonie in wässriger Phase kommt, wodurch der Zugang zu Sauerstoff, welchen sie für ihren Stoffwechsel benötigen, erleichtert wird. Es wird auch angenommen, dass die Cellulose vor UV-Strahlen oder Schwermetallionen schützen könnte unter der Annahme, dass die Versorgung der Zellen mit Nährstoffen durch Diffusion gewährleistet wird [1]

1.2 Bildung der BC-Mikrofibrillen

Der Mechanismus zur Bildung der Mikrofibrillen ist nicht vollständig aufgeklärt. Es wird angenommen, dass die Cellulose bereits im Zellinneren gebildet wird und über Transmembranproteine in den extrazellulären Raum transportiert wird. Aus diesen etwa 2-4 nm breiten Öffnungen wird die Protofibrille gesponnen, welche sich mit weiteren zu einer Cellulose-Mikrofibrille bündelt [1]. Die entstandene polymorphe Form, welche parallele

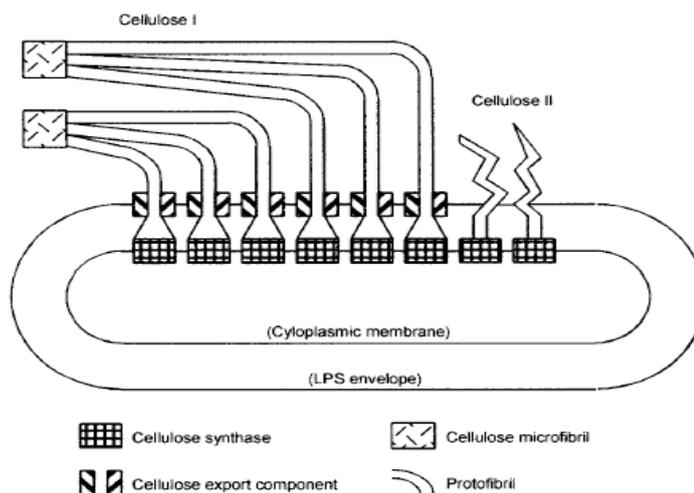


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Bakteriencellulosebiogenese und Bildung der Mikrofibrillen [1]

Ketten aufweist, wird auch Cellulose I genannt. Auch hier können mehrere Cellulose-Mikrofibrillen miteinander interagieren und Cellulosefasern mit einer Breite von 40-60 nm bilden.

1.2 Kultivierung im Labor

Als Kohlenstoff-Quelle wird in der Literatur Glucose, aber auch Glycerin und L-Glucuronsäure angegeben [2]. Darüber hinaus bestimmen diverse Faktoren, wie die Zusammensetzung des Nährmediums, die Bakterienstammauswahl, exogene Faktoren etc. die Ausbeute und Struktur der BC. Es wird ebenfalls empfohlen niedrige Konzentration von Vitaminen zuzusetzen, welches vernachlässigt werden kann, falls natürliche Säfte von Obst als Zugabe zu dem Medium verwendet wird. Nach vier Wochen bei 28-30 °C erreicht das Bakteriencellulose-Vlies eine Dicke von über 25 mm. Dabei ist es wichtig darauf zu achten, dass nicht das Volumen des Gefäßes in welchem die Kolonie wächst entscheidend für ihre Größe ist, sondern die Oberfläche, welche zum Wachstum bereitgestellt wird, was mit dem aeroben Stoffwechsel des Bakteriums zu erklären ist. Zur Reinigung des Vlieses, wenn nötig, kann dieses in verdünnte alkalische Lösung eingetaucht und anschließend gründlich mit Wasser gewaschen werden, was zur Entfernung der Bakterien führt [1].

1.3 Struktur und Eigenschaften der Bakterienzellulose

Die Bakterienzellulose besteht wie ihr pflanzlicher Vertreter aus Polysacchariden. Die strukturellen Besonderheiten und die darauf zurückzuführenden Eigenschaften heben sich jedoch stark von der Pflanzenzellulose ab. Bakterienzellulose ist chemisch besonders rein und besitzt eine sehr hohe Zugfestigkeit, die sich aus einem großen Polymerisationsgrad und einer sehr feinen Vernetzung ergibt, was in den folgenden Abbildungen ersichtlich wird.

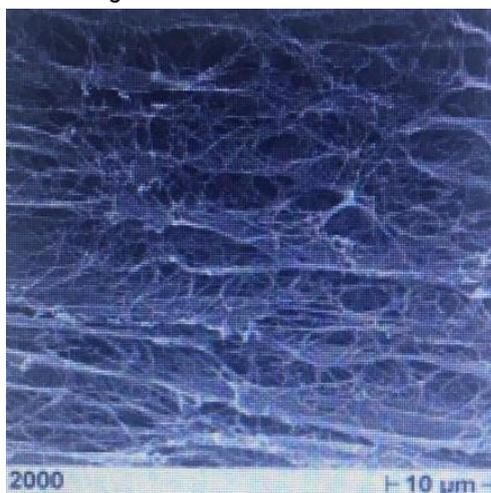


Abbildung 2: 2000-fache Vergrößerung der BC. [2]

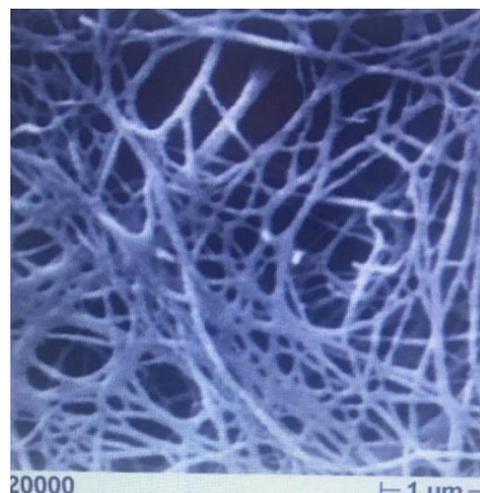


Abbildung 3: 20000-fache Vergrößerung der BC. [2]

In der ersten Abbildung lässt sich eine schichtartige Struktur im Aufbau erkennen. Die einzelnen Cellulosefasern verlaufen dabei größtenteils horizontal, was durch die durch die einzelnen Löcher verdeutlicht wird. Die herausstechenden weißen Strukturen entstehen, wenn sich mehrere Fasern parallel in einer

Ebene befinden. Bei den schwarzen Poren handelt es sich um abgestorbene Zellen, die somit die einzelnen Schichten begrenzen. Mithilfe der beiden Strukturen lassen sich auch die charakteristischen Eigenschaften der Bakterienzellulose erklären. Die gute Speicherkapazität von Wasser entsteht durch die vielen kleinen Poren und der damit verbundenen großen inneren Oberfläche. Somit kann die Cellulose sehr gut Wasser absorbieren. Außerdem kommt es zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen und den OH-Gruppen der Bakterienzellulose.

Die hohe Zugfestigkeit entsteht durch die Ausprägung von starken Schichten in Kombination mit der wahllosen Orientierung einzelner Fasern. (s. Abb. 3) [2]

1.4 Vergleich pflanzliche Cellulose und Bakteriencellulose

Der größte und bedeutendste Unterschied liegt in der chemischen Reinheit des Biopolymers. Bei der aus *Acetobacter xylinum* gewonnenen Cellulose gibt es keine Hinweise auf Verunreinigungen bzw. liegen diese bei 1% [1]. Die durch Pflanzen synthetisierte Cellulose ist hingegen dessen mit weiteren Biopolymeren wie beispielsweise Lignin durchmischt. In Folge dessen besteht Holz aus 50% Cellulose und Baumwolle aus ungefähr 90% des Biopolymers [3]. Im Vergleich der chemischen Struktur sind Unterschiede nur auf makromolekularer Ebene zu sehen. (siehe 1.3).

Bei beiden Cellulosearten handelt es sich jedoch um β - Anomere der Glucose, welche über eine β -1,4-glycosidische Bindung mit einander verbunden sind.

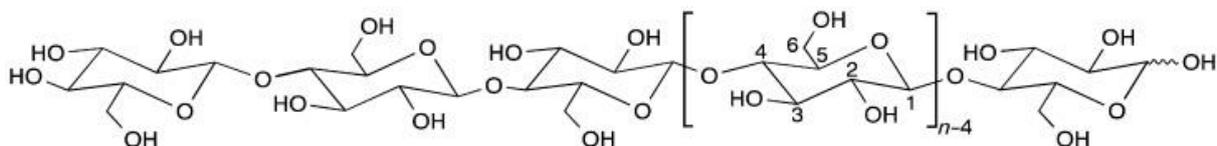


Abbildung 4: Biopolymer Cellulose [4]

Die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Ketten und die Größe des Polymers setzen die Wasserlöslichkeit herab [3]. Begründet durch die chemische Äquivalenz sollte der Nachweis von Cellulose durch eine Iod-Zinkchlorid-Lösung, bei dem durch *Acetobacter xylinum* synthetisierten Biopolymer, ebenfalls positiv ausfallen.

1.5 Anwendungen der Bakterienzellulose

Die Bakterienzellulose besitzt aufgrund ihrer einzigartigen Struktur und ihren besonderen Eigenschaften vielseitige Anwendungsbereiche.

Im Bereich der Medizin findet die bakterielle Zellulose aufgrund ihrer guten Verträglichkeit ihre wichtigste Anwendung. Bei der Implantierung von Herzschrittmachern oder Herzpumpen besteht die Gefahr, dass der menschliche Körper diese als Fremdkörper wahrnimmt und im schlimmsten Fall abstößt. Besitzt das künstliche Implantat eine gut verträgliche Beschichtung, so können Entzündungen und Abstoßungsreaktionen gemindert werden. Die Bakterienzellulose ist aufgrund ihrer feinen Netzwerkstruktur und hohen Reinheit besonders gut für solche Beschichtungen geeignet. Außerdem ist das Biopolymer im feuchten

Zustand sehr flexibel und mechanisch stabil, weshalb es bereits zur Herstellung künstlicher Blutgefäße oder als Knorpelersatz, sowie für Wundverbände verwendet wird. [5]

Damit die Körperzellen besser mit dem beschichteten Material interagieren können, muss die Bakteriencellulose eine spezifische Oberflächenstruktur besitzen. Diese wird mithilfe einer Silikonform mit einem dreidimensionalen Linienraster im Mikrometerbereich hergestellt. Hierbei schwimmt die Silikonform auf der Oberfläche einer Nährlösung, in der die zelluloseproduzierenden Bakterien wuchsen. Am Übergang zwischen Flüssigkeit und Luft wird ein dichtes Netzwerk an Zellulosesträngen durch die Bakterien aufgebaut. Durch die Anwesenheit der Silikonform passen sich die Zellulosestränge an diese an. Es entsteht eine Zellosegeschicht mit dem Negativabdruck des Linienrasters. Nun wird eine wichtige Fähigkeit der Körperzellen ausgenutzt. Diese sind in der Lage Fasern zu erkennen. Die Zellulosestränge und das Rastermuster bieten den Körperzellen eine Orientierung entlang vorgegebener Bahnen an. Hautzellen sind nun in der Lage eine Wunde besser zu verschließen, vorausgesetzt sie bewegen sich entlang einer strukturierten Zellulose. Neuste Forschungen haben bewiesen, dass bei der Herstellung von Zelluloseoberflächen eine Nachricht für später darauf wachsende Zellen mitgegeben werden kann. Diese Strukturen tragen maßgeblich dazu bei, Entzündungen und Abstoßungsreaktionen zu reduzieren und werden auch in Zukunft unter komplexeren Bedingungen weiter erforscht. [5]

Ein zweiter wichtiger Anwendungsbereich der bakteriellen Zellulose ist die Lebensmittelindustrie. Die bakterielle Zellulose kann als eine Art Ballaststoff verwendet werden, welcher wie die anderen Ballaststoffe gesundheitliche Vorteile bieten, wie z.B. das Risiko chronischer Krankheiten zu reduzieren. Der Vorteil der Bakteriencellulose im Vergleich zu den anderen Ballaststoffen besteht darin, dass diese hochrein vorliegt und keine chemischen Behandlungen bedarf. [6]

Außerdem kann die Bakteriencellulose als Rohstoff eingesetzt werden In Südostasien wird ein bakterielles Zellulosegel namens Nata als Desserts verspeist. Dieses ist durch das glatte Mundgefühl und der einfachen Herstellung sehr beliebt und breitet sich weltweit aus. Es gibt verschiedene Arten der Nata, wie zum Beispiel die Nata de Coco (mit Kokosnuss) oder die Nata de pina (mit Ananas). [6]

Durch die besondere Struktur und Eigenschaften der Bakteriencellulose kann diese auch als Lebensmittelzusatzstoff verwendet werden. Neben den Einsatz als Verdickungsmittel, findet die bakterielle Zellulose auch als Stabilisierungsmittel ihre Anwendung in Lebensmittel. Enthält ein Produkt bakterielle Zellulose, so behält dieses seine Feuchtigkeit ca. einen Monat. Bakteriencellulose-haltiges Eis behält seine Form auch nach 60 Minuten nach dem Herausnehmen aus dem Gefrierschrank. [6]

Ebenso ist die bakterielle Zellulose in der Lage kalorienarme und cholesterinarme Lebensmittelzutaten/-produkte herzustellen, da sie als akzeptabler Fettersatz in der Lebensmittelindustrie gilt. Aufgrund ihrer guten biologischen Abbaubarkeit wird die bakterielle Zellulose auch als Verpackungsmaterial für Lebensmittel benutzt. Hierbei gibt es verschiedene Zusammensetzungen, welche jeweils eine bestimmte Funktion einnehmen. Lebensmittelverpackungen mit bakterieller Zellulose weisen bessere mechanische



Eigenschaften auf und behalten weiterhin ihre Transparenz und Biokompatibilität bei. Es können auch antimikrobielle Wirkstoffe in Lebensmittelverpackungsfolien eingearbeitet werden, um die Aktivität der Lebensmittel während der Lagerung aufrechtzuerhalten. Hierfür wird bakterielle Zellulose mit Nisin verwendet. Die aktive Zellulosefolie verlängert die Haltbarkeit von verarbeitetem Fleisch und verhindert den Angriff von aeroben Bakterien. [6]

Neben den beiden wichtigsten Anwendungen in der Medizin und in der Lebensmittelindustrie wird bakterielle Zellulose ebenfalls in Lautsprechermembranen für hochwertige Kopfhörer eingesetzt. Weiterhin ist die Bakterienzellulose ein wichtiger Bestandteil von kosmetischen Gesichtsmasken sowohl mit, als auch ohne Wirkstoffeinträgen [7]. Ebenso spielt die Zelluloseart in der Papierrestaurierung eine wichtige Rolle. Papiere, welche aus Bakterienzellulose bestehen, besitzen eine hohe Oberflächenfestigkeit und eine sehr gute Oberflächenqualität. Dadurch entsteht eine interessante Alternative als Ergänzungspapier für die Problematik der Restauration von modernen Papieren wie Kunstdruck- und Transparentpapier [8]

II. Schülermaterial

Cellulose als Werkstoff

Versuch 1: Cellulose und Stärke in Alltagsprodukten

Versuch 2: Die Quellung von Cellulose

Versuch 3: Herstellung von Kupferseide

Versuch 4: Herstellung eines Cellulosederivates – die Bakteriencellulose





V1 Cellulose und Stärke in Alltagsprodukten

Informationen

Einleitung

Im folgenden Versuch sollen Cellulose und Stärke bezüglich ihres Vorkommens in verschiedenen Alltagsprodukten untersucht werden.

Aufgabenstellung

1. **Untersuche folgende Substanzen auf das Vorhandensein von Stärke und Cellulose!**

Das Experiment

Materialien

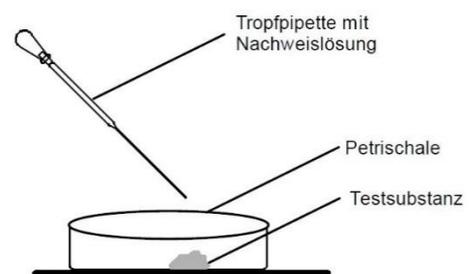
- | | |
|----------------------------|---|
| ➤ Petrischale | ➤ Filterpapier |
| ➤ Spatel | ➤ Tabletten mit Cellulose als Füllstoff |
| ➤ Pasteurpipette | ➤ Druckpapier |
| ➤ Mörser und Pistill | ➤ Haushaltsschwamm aus Viskose |
| ➤ Messer | ➤ Verpackungsschutz aus aufgeschäumter Stärke |
| ➤ Objektträger | ➤ Baumwollkapsel |
| ➤ Deckgläser | ➤ Kartoffel |
| ➤ Mikroskope | ➤ SCOBY (Kombucha) |
| ➤ Puddingpulver | |
| ➤ Watte aus 100% Baumwolle | |

Chemikalien

- Iod-Zinkchlorid-Lösung
- Iod-Kaliumiodid-Lösung (Lugolsche Lösung)

Durchführung

1. Stelle vermuten darüber an, welche Stoffe Cellulose enthalten und welche Stärke! Notiere deine Vermutungen in einer Tabelle!
2. Gib pro Substanz zwei Proben in eine Petrischale und versetze sie mit den Nachweis-Lösungen, zerstoße dazu die Tablette mit Cellulose als Füllstoff zunächst mit Mörser und Pistill. Durchmische sie gegebenenfalls mit einem Spatel.
3. Betrachte die Samenhaare der Baumwolle und die Kartoffelschale nach dem Anfärben außerdem unter dem Mikroskop. Notiere deine Beobachtungen!





V2 Die Quellung von Cellulose

Informationen

Einleitung

Eine aus dem Alltag bekannte Eigenschaft von Cellulose ist, dass es sich nicht in Wasser löst. So "verschwindet" die Küchenrolle beim Aufwischen eines umgefallenen Wasserglases nicht, sie quillt. Dabei kann diese Eigenschaft zwischen unterschiedlichen Cellulose-Produkten variieren und sie somit für verschiedene Anwendungen brauchbar machen.

Aufgabenstellung

1. **Untersuche das Quellungsvermögen der Materialien, die du im Versuch 1 als cellulosehaltig identifiziert hast!**
2. **Ordne diese in eine Tabelle ein!**
3. **Stelle Hypothesen auf, weshalb sich das Quellungsvermögen der Materialien unterscheidet!**

Das Experiment

Materialien

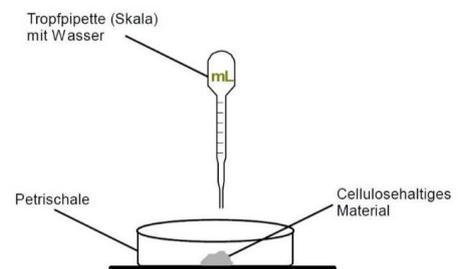
- Petrischalen, Schere
- Cellulosehaltige Materialien

Chemikalien

- Wasser

Durchführung

1. Zerkleinere die Materialien mit einer Schere und wiege jeweils 1 g Material ab.
2. Überführe das erste Material auf eine Petrischale und wiege nun erneut mit der Petrischale! Tare die Waage.
3. Tropfe mit einer Tropfpipette genau so viel Wasser auf das erste Material, wie dieses aufnehmen kann! (Es darf sich keine Pfütze bilden!)
4. Nimm nun erneut das Gewicht des mit Wasser getränkten ersten Materials und der Petrischale auf. Trage diesen Wert in eine Tabelle ein. Der erhaltene Wert entspricht der Masse des zugefügten Wassers. Verfahre nach derselben Abfolge mit den restlichen Materialien.



Erklärung/ Information

Die freien Hydroxydfunktionen der Glucosemoleküle der Cellulose bilden Wasserstoffbrückenbindungen zu den Wassermolekülen aus, wodurch der Abstand zwischen den Polymerketten abnimmt. Die gequollene Cellulose nimmt deshalb mehr Volumen ein als die trockene Cellulose.





V3 Die Herstellung von "Kupferseide"

Informationen

Einleitung

Hochreine Cellulose kann aufgrund seiner Biokompatibilität in der Medizintechnik, z.B. zur Blutwäsche bei Nierenpatienten, eingesetzt werden. Im Folgenden soll ein Verfahren zur Herstellung von hochreiner Cellulose, welches auch im Labor realisierbar ist, vorgestellt werden.

Aufgabenstellung

1. Stelle Kupferseide her!

Das Experiment

Materialien

- | | |
|---------------------------------------|--|
| ➤ Waage | ➤ Glasstab |
| ➤ Messzylinder (2 x 50 mL, 2 x 10 mL) | ➤ Heizplatte mit Rührfunktion |
| ➤ Pasteurpipette | ➤ Rührfisch |
| ➤ Saugflasche (250 mL) | ➤ Spritzflasche |
| ➤ Büchnertrichter | ➤ Becherglas (50 mL, 500 mL, 1 L) |
| ➤ Rundfilter | ➤ Pinzette |
| ➤ Bunsenbrenner | ➤ Zellstoff oder Watte (auch frische Baumwolle möglich, benötigt Vorreinigung) |
| ➤ Dreifuß mit Keramiknetz | |

Chemikalien

- Natronlauge (w = 10%)
- Natronlauge (w = 32%)
- Wasserstoffperoxid (w = 30%)
- Propan-2-ol
- Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat
- Ammoniaklösung (w = 20-25%)
- Verdünnte Schwefelsäure
- Destilliertes Wasser

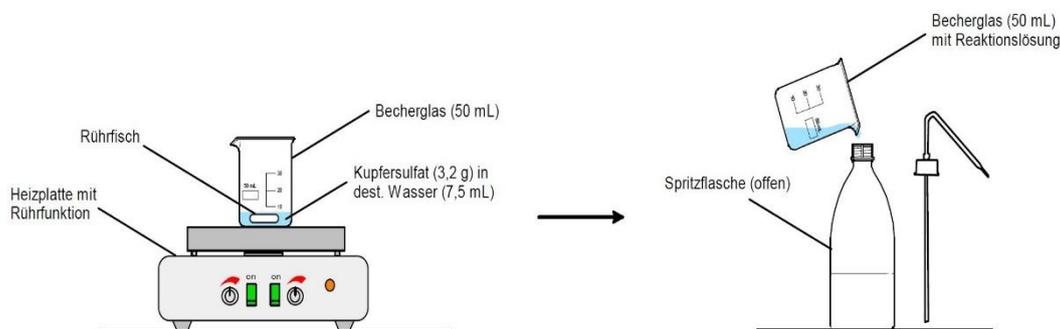
Durchführung

1. Reinige die Baumwolle indem du 2-3g in ein 1 L Becherglas überführst und 30 mL Natronlauge (w= 10%) und 30 mL Wasserstoffperoxid - Lösung (w=30%) hinzugibst. Gib 5 mL Propan-2-ol um Überschäumen des Reaktionsansatzes zu verhindern. Erhitze das Gemisch für 10 Minuten auf dem Dreifuß über dem Bunsenbrenner. Überführe die gebleichte Wolle in einen Büchnertrichter und sauge sie mit der Saugflasche ab. Wasche die Wolle zweimal mit 50 mL destilliertem Wasser. Dieser Schritt entfällt, wenn Zellstoff, oder eine andere aufbereitete Cellulosequelle verwendet wird.
2. Löse 3,2g Kupfersulfat-Pentahydrat in einem 50 mL Becherglas in 7,5 mL destilliertem Wasser, unter geringer Wärmezufuhr auf der Heizplatte und überführe die Lösung in eine Spritzflasche!

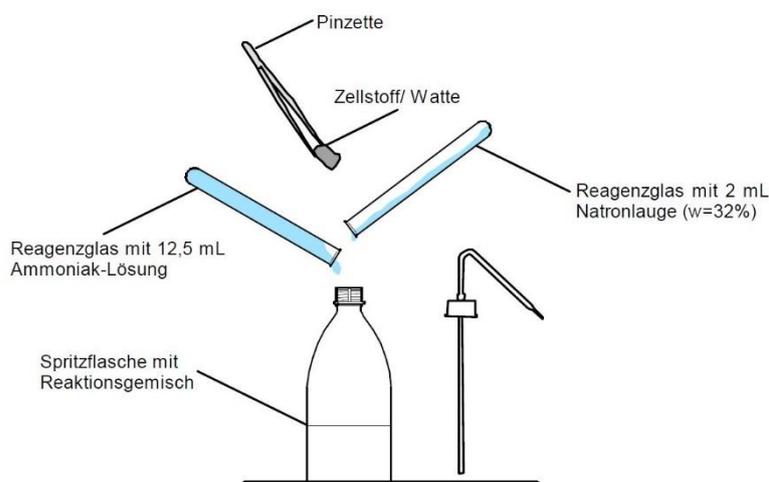




3. Versetze nun die Lösung zuerst mit 2 mL Natronlauge (w=32%) und darauf mit 12,5 mL Ammoniak-Lösung. Nun werden exakt 0,6 g des Zellstoffes oder der Watte hinzugefügt.



4. Verschließe die Spritzflasche und schüttle das Gemisch so lange, bis sich der Zellstoff oder die Watte vollständig gelöst hat.
5. Bereite nun ein Fällbad aus verdünnter Schwefelsäure vor und spritze die Lösung vorsichtig hinein. Nach dem Entfärben der Fäden werden diese in ein mit destilliertem Wasser gefülltes Becherglas gegeben und darauf zum Trocknen aufgehängt.



Erklärung/ Information

Cellulose geht mit Kupferhydroxid in wässrigem Ammoniak in Lösung und bildet Tetraammin-Kupfer(II)-Hydroxid Komplexe. Die entstandene Lösung wird auch Schweizer Reagenz genannt.



V4 Herstellung eines Cellulosederivates - Bakterienzellulose

Informationen

Einleitung

Bakterienzellulose entsteht durch das Essigsäurebakterium *Acetobacter xylinum*. Dieses kommt in der Natur auf vorrottendem Obst und Gemüse, aber auch in Symbiose mit Hefen, wie z.B. im Gärgetränk Kombucha vor. Es ist somit möglich mithilfe eines Kombucha-Scobys Bakterienzellulose selbst herzustellen, welche als hochreine und kristalline Cellulose vorliegt.

Aufgabenstellung

Langzeitexperiment aus einem Kombucha-Scoby Bakterienzellulose her:

- b) mit Sauerstoff und mit Zucker
- c) ohne Sauerstoff und mit Zucker
- d) mit Sauerstoff und ohne Zucker

2. Notiere zu allen drei Versuche deine Beobachtungen! Vergleiche deine Beobachtungen! 3. Beurteile die Wichtigkeit der Anwesenheit von Sauerstoff und Zucker bei der Herstellung von Bakterienzellulose!

Das Experiment

Materialien

- 3 Gärgefäße (Becherglas (500 mL)
- Kochtopf
- Baumwolltuch
- Gummiband
- Klarsichtfolie

Chemikalien

- Leitungswasser (1L)
- Grüntee oder Schwarztee (8 g)
- Zucker (90 g)
- Kombucha Scoby
- Apfelessig (zum Gefäß auswischen)

Durchführung**Versuch 1a:**

1. Reinige zunächst alle Utensilien die du verwendest und deine Hände.
2. Gebe 1 L Leitungswasser in einen Topf und koche dieses auf. Gebe den Tee hinzu und lasse diesen für 3 Minuten kochen. Anschließend nimmst du den Topf von der Wärmequelle und lässt den Tee für 15 Minuten ziehen.
3. Entnehme die Teebeutel aus der Flüssigkeit und löse nun den Zucker in der Flüssigkeit vollständig auf. Lasse die Flüssigkeit bis auf Zimmertemperatur abkühlen.
4. Spüle deine Gärgefäß ordentlich aus und wische es einmal mit ein wenig Apfelessig aus. Gebe nun den Kombucha-Scoby mit der hellen Seite nach oben in das Gefäß und gebe 300 mL der Ansatzflüssigkeit, sowie die Nährflüssigkeit dazu.





5. Decke das Gefäß mithilfe eines luftdurchlässigen Baumwolltuchs ab und verschließe es mit dem Gummiband, sodass keine Fremdkörper an die Kultur gelangen können.
6. Lasse nun das Gefäß 14 Tage bei Zimmertemperatur (ca. 23 °C) stehen. Direkte Sonneneinstrahlung sollte ebenfalls vermieden werden. Notiere jeden Tag deine Beobachtungen.
7. Notiere jeden Tag deine Beobachtungen.

Versuch 1b:

1. Führe ersten vier Schritte von 1a durch.
2. Nimm nun anstelle des Baumwolltuchs eine Klarsichtfolie um die Kultur luftdicht abzuschließen. Nimm das Gummiband um die Klarsichtfolie zu verschließen.
3. Die nächsten Schritte sind analog zu 1a.

Versuch 1c:

1. Führe die ersten beiden Schritte von 1a durch.
2. Entnimm die Teebeutel aus der Flüssigkeit und lasse die Flüssigkeit bis auf Zimmertemperatur abkühlen.
3. Die nächsten Schritte sind analog zu 1a



III. Didaktische Hinweise.

Cellulose ist die häufigste organische Verbindung und somit auch das häufigste Polysaccharid auf unserer Erde. Aufgrund ihrer großen Verfügbarkeit und Eigenschaften besitzt die Cellulose eine große Bedeutung in Natur und Technik. So wird das Polysaccharid bei der Papierherstellung, in der Bekleidungsindustrie, als Verpackungsmaterial, Dämmmaterial usw. angewendet. Eine besondere Form der Cellulose ist die hochreine Bakteriencellulose, welche vom Bakterium *Acetobacter xylinum* extrazellulär gebildet wird. Diese besitzt aufgrund ihrer dreidimensionalen Nanostruktur im feuchten Zustand eine hohe mechanische Stabilität, Flexibilität, sowie eine hohe Wasserabsorptionskapazität. Die Struktur und Eigenschaften prädestinieren dieses Polymer für eine Vielzahl von Anwendungen im medizinischen Bereich und in der Lebensmittelindustrie.

Laut dem Thüringer Lehrplan setzen sich die SuS erst in der 12. Klassenstufe im Thema Struktur und Reaktionen von Kohlenhydraten und Proteinen mit Cellulose auseinander. Hierbei lernen die SuS die Cellulose allgemein als Polysaccharid kennen.

Im Bereich der Sach- und Methodenkompetenz können die SuS verschiedene Arten von Kohlenhydraten nennen und diese den Mono-, Di- und Polysacchariden zuordnen. Außerdem sind die SuS in der Lage, die Bildung von Polysacchariden mit einfachen Strukturformeln zu beschreiben und die Reaktionsarten zu bestimmen. Des Weiteren können die SuS den Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften am Beispiel der Polysaccharide erläutern. Die SuS besitzen nun eine Vorstellung über die Struktur der Cellulose und können daraus ihre wichtigen Eigenschaften (besonders die Wasserunlöslichkeit) ableiten.

Ebenso wird den SuS die Bedeutung der Kohlenhydrate in der Umwelt und Technik vermittelt. In Bezug auf die Cellulose sind die SuS in der Lage, sowohl die Herstellung und Verwendung von Cellulosederivaten, als auch die Nutzung von Stärke und Cellulose als nachwachsende Rohstoffe zu erläutern. In diesem Punkt ist die Überleitung zur Bakteriencellulose sinnvoll, da diese Art der Cellulose eine große Bedeutung für die Umwelt und Technik besitzt. Dabei ist ein Vergleich zwischen Cellulose und der Bakteriencellulose in Bezug auf die Struktur und den daraus ableitenden Eigenschaften geeignet. Aufgrund der hochreinen dreidimensionalen Struktur besitzt die Bakteriencellulose viele Anwendungsbereiche, welche bereits ausführlich in der Sachanalyse beschrieben wurden. Bei der Nutzung von Stärke und Cellulose als nachwachsende Rohstoffe, kann im Vorfeld ein Vergleich der beiden Polysaccharide vollzogen werden, wozu Versuch 2 gut geeignet wäre. Anschließend können die Anwendungen der beiden Polysaccharide abgeleitet werden.

Im experimentellen Bereich ist der Vergleich der Löslichkeit von Polysacchariden als Schülerexperiment festgeschrieben. Als übergeordnetes Lernziel dient dabei das Untersuchen verschiedener Polysaccharide und die Erläuterung/Anwendung des Struktur-Eigenschaft-Prinzips. In diesem Thema bekommen die SuS einen breiten Überblick über die Struktur, Eigenschaften und Anwendungen der Bakteriencellulose, welche eine besondere Form der Cellulose darstellt.

Die SuS sind in der Lage, die Polysaccharide Stärke und Cellulose hinsichtlich ihrer Struktur und Eigenschaften zu vergleichen und in verschiedenen Alltagsprodukten nachzuweisen (V1). Weiterhin können die SuS das Quellvermögen der Cellulose als wichtige Eigenschaft erläutern und dieses in Cellulose-haltigen Alltagsprodukten nachweisen (V2). Die SuS sind ebenfalls in der Lage, hochreine Cellulose in Form von Kupferseide, zu synthetisieren (V3). Die können die Bakteriencellulose als Cellulosederivat, mithilfe eines Scoby in einem Langzeitexperiment selbst herstellen (V4).





V1 Cellulose und Stärke in Alltagsprodukten

Beobachtungen:

Die folgenden Alltagsprodukte reagieren positiv auf den Stärke-Nachweis (Iod-Kalium-Iodid-Lösung):
Puddingpulver, Verpackungsschutz aus aufgeschäumter Stärke, Kartoffel.

Die folgenden Alltagsprodukte reagieren positiv auf den Cellulose-Nachweis (Iod-Zinkchlorid-Lösung):
Watte, Filterpapier, Tablette mit Cellulose als Füllstoff, Druckpapier, Hausschwamm aus Viskose,
Baumwollkapsel, SCOBY



Abbildung 5: Wattepad

Abbildung 6: Baumwolle

Abbildung 7: Zellstoff

Auswertung:

Der Cellulose-Nachweis im SCOBY hat sich als uneindeutig herausgestellt, da bloß geringe Blaufärbungen nach einem Tag Reaktionszeit erkennbar wurden. Dies könnte zum einen an dem zu geringen Cellulosegehalt im SCOBY liegen wie auch der Tatsache geschuldet sein, dass der SCOBY mit Wasser gesättigt ist und somit das Nachweisreagenz nicht aufnehmen kann.



Abbildung 8: Nachweis mit frischem SCOBY



Der Versuch wurde außerdem mit getrockneten Kombucha-Stücken wiederholt. Nach einem Tag hat sich ein blauer Punkt auf dem SCOBY gebildet, was jedoch auch als nicht deutlicher Effekt gewertet werden kann.

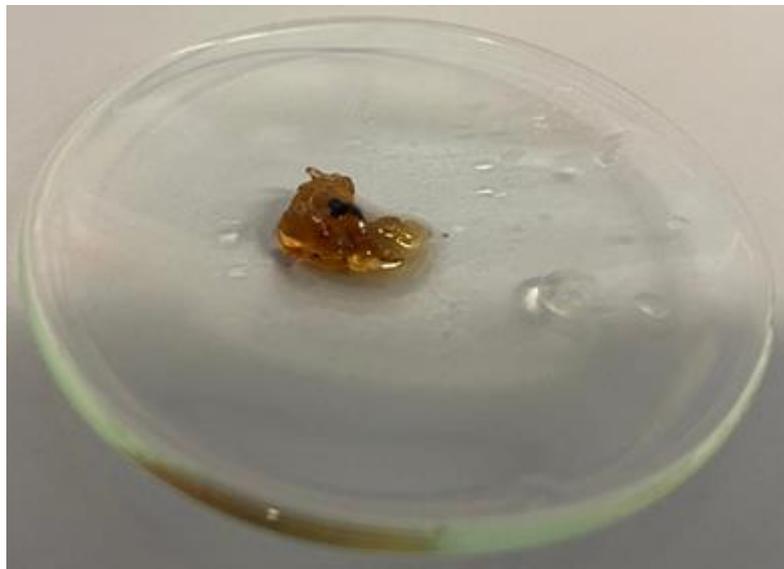


Abbildung 9: Nachweis mit getrocknetem SCOBY

Eine weitere Möglichkeit, weshalb der Nachweis nicht gut gelingt, ist das Vorliegen der bakteriellen Cellulose in feinen Fibrillen. Vermutlich reicht die Dicke der Strukturen nicht aus, um durch das Zinkchlorid aufzuquellen.

Didaktischer Kommentar:

Stärke besteht aus α -D-Glucopyranose-Ketten, welche eine schraubenförmig gewundene Helix ergeben. In den Hohlräumen der Helix können Iodid-Ionen komplexiert werden. Es kommt zur Delokalisierung der Valenzelektronen des Iodid-Ions, wodurch sich die Blaufärbung ergibt.

Für den Nachweis von Cellulose muss diese zunächst quellen, was durch die eingesetzten Zink-Ionen realisiert wird. Diese bilden Chelat-Komplexe mit den Polymeren, wodurch sich der Abstand zwischen den Polymerketten vergrößert. Die intermolekularen Wechselwirkungen zwischen den Ketten nehmen ab und die Polyiodidionen setzen sich in die entstehenden Hohlräume. Es kommt wieder zu einer Delokalisierung der Valenzelektronen der Polyiodidionen und somit zur Blaufärbung.

Die Schülerinnen und Schüler sollen anhand dieses Versuches dazu befähigt werden Aussagen darüber treffen zu können, ob diverse Alltagsprodukte Cellulose oder Stärke enthalten. Dabei kann dieser Versuch als Einstiegsexperiment in den Themenkomplex Cellulose dienen und als Schülerexperiment durchgeführt werden. Spezielles Vorwissen wird für dieses Experiment nicht benötigt,



da die Schülerinnen und Schüler im Rahmen dieses Experiments erstes Wissen zu den strukturgebenden und energiespeichernden Makromolekülen erlangen. Der Versuch kann außerdem nach Belieben erweitert werden, indem noch andere Alltagsprodukte auf ihre Inhaltsstoffe untersucht werden können. Im Anschluss könnte für die Untersuchung weiterer Eigenschaften von Cellulose das Quellvermögen und die Löslichkeit in Wasser untersucht werden. Für eine erkenntnisorientierte Auswertung des Versuches muss darauf geachtet werden, welche Nachweislösung verwendet wird und bei welchen Produkten sie positiv reagiert, da sich die Effekte der beiden Lösungen nicht stark unterscheiden, also eine farbliche Zuordnung mitunter nicht möglich ist. [9]

In Hinblick auf den Nachweis von Bakteriencellulose zeigen sich unzureichende Resultate, weshalb offenbleiben sollte, den Nachweis während der Unterrichtsstunde durchzuführen. Wie bereits erwähnt könnte der Nachweis von Cellulose im SCOBY bereits einen Tag vor dem Schülerexperiment in der Unterrichtsstunde durchgeführt werden, da der Effekt dann deutlicher wird. Das Exponat könnte dann am Lehrerpult platziert werden, sodass die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit bekommen, während des Versuchs auch die Beobachtungen des SCOBY's miteinzubeziehen.



V2 Quellungsvermögen von Cellulose

Beobachtungen:

Die verschiedenen Ausgangsstoffe weisen ein unterschiedlich starkes Quellungsvermögen auf.

Auswertung:

Das Wasser dringt in die verschiedenen Strukturen der Ausgangsstoffe ein, da die Cellulose aufgrund ihrer jeweiligen Verarbeitung über eine große innere Oberfläche verfügt. Die Wassermoleküle werden anschließend in den Zwischenräumen gehalten, da zwischen ihnen und den polaren Gruppen der Cellulose Wasserstoffbrückenbindungen ausgebildet werden. Das geschieht so lange, bis alle polaren Gruppen der Cellulosefasern besetzt sind. Das Quellungsvermögen ist demnach abhängig von dem Anteil und der Reinheit der Cellulose in den jeweiligen Ausgangsstoffen.

Didaktischer Kommentar:

Ziel des Versuchs ist es, dass die SuS eigenständig das Quellungsvermögen verschiedener Materialien experimentell bestimmen und mögliche Ursachen für die unterschiedliche Quellfähigkeit formulieren können. Beim Experimentieren liegt der Schwerpunkt hier vor allem auf der Genauigkeit.



Zum einen bei der Einwaage und zum anderen beim Zutropfen des Wassers. Die SuS müssen das Wasser vorsichtig und möglichst gleichmäßig Hinzutropfen, sodass das Quellvermögen nicht plötzlich überschritten wird. Zudem bietet es sich an von jedem Material noch eine Referenzprobe hinzuzuziehen, um über den Mittelwert das tatsächliche Quellvermögen möglichst genau einordnen zu können. Bezüglich der Funktion sollte der Versuch in der Erarbeitungsphase in Form von Schülerversuchen durchgeführt werden. Hier bietet es sich an die Schüler in Zweier-Gruppen einzuteilen, sodass die Aufgaben gemeinsam abgearbeitet werden können. Im Anschluss daran stehen die SuS in ihren Gruppen im konstruktiven Austausch bei der Formulierung der jeweiligen Hypothesen. Das benötigte Vorwissen setzt sich vor allem aus der Kenntnis über den grundsätzlichen Bau pflanzlicher Cellulose und den damit verbundenen Eigenschaften zusammen. Außerdem sollten die Schüler wissen, wie sich die Abweichungen im Bau der Bakteriencellulose auf die Eigenschaften auswirken. Daraus sollten die SuS schlussfolgern können, wie die Quellfähigkeit der Cellulose zu Stande kommt und welche Art der Wechselwirkung die funktionelle Gruppe der Glucosemoleküle mit den Wassermolekülen eingeht. Ein weiterführendes Experiment wäre die Herstellung von Kupferseide, da die Schüler somit von einfacheren Nachweis- und Eigenschaftsuntersuchungen zu einem komplexeren Syntheseexperiment kommen.[9]



V3 Herstellung von Kupferseide

Beobachtungen:

Nach der Bleichprozedur ist die Baumwolle weiß und besteht aus sehr feinen Fasern. Mit der Zugabe von Natronlauge zu Kupfersulfat-Pentahydrat entsteht ein tiefblauer Niederschlag, der sich durch das Zusetzen von Ammoniaklösung wieder auflöst. Dabei löst sich der Zellstoff unter Bildung einer sehr zähflüssigen Lösung auf. In dem Fällbad kommt es anschließend zur Entstehung von blauen Fäden, die langsam ihre ursprüngliche blaue Färbung verlieren. Die Fäden sind im nassen Zustand aufgequollen und sehr weich, im trockenen Zustand hingegen werden sie spröde.

Auswertung:

Normalerweise sind die Samenhaare der Baumwolle mit einer Wachs- und Pektinschicht überzogen. Diese Schicht würde jedoch das Lösen der Cellulose in der Schweizer Reagenz verhindern. Daher müssen die Baumwollfasern zunächst gereinigt werden. Mithilfe des Wasserstoffperoxids werden die Wachsschicht und Verunreinigungen entfernt. Zudem werden die Samenhaare so von den Samen getrennt. Die Weiterbehandlung mit Natronlauge führt dazu, dass Hydroxidionen zwischen die



Cellulosefibrillen gelangen. Die Zugabe von Ammoniaklösung und Natronlauge zu der wässrigen Kupfersulfat-Lösung führt zur Entstehung von einem hydratisierten Salzkomplex, dem $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$. Die wässrige Lösung des Komplexes wird als Schweizers Reagens bezeichnet. Wird hierzu Cellulose gegeben, findet ein Ligandenaustausch statt. Dabei werden zwei Ammin-Liganden durch zwei Hydroxylgruppen der Cellulose verdrängt. Der entstandene Komplex verhindert die Entstehung von inter- und intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Cellulosemolekülen, weswegen die Cellulose in Lösung geht. Das schwefelsaure Fällbad protoniert die Ammin-Liganden, wodurch sich der Komplex auflöst und die Cellulose erneuert wird. Dabei reagieren die Kupfer-Ionen mit der Schwefelsäure zu Kupfersulfat, weshalb es zu einer blauen Färbung des Wassers kommt. [9]

Didaktischer Kommentar:

Die Schüler sollen anhand dieses Versuches dazu befähigt werden, die einzelnen Syntheseschritte methodisch umzusetzen und die Funktion der einzelnen Schritte zu erläutern. Beim Experimentieren ist vor allem auf den Sachgemäßen Umgang mit den jeweiligen Chemikalien zu achten. Eine genauere Bewertung lässt sich aufgrund der gegebenen Umstände und der fehlenden praktischen Durchführung leider nicht formulieren. Da der Versuch in seiner Durchführung etwas umfassender ist sollte er in die Erarbeitungsphase eingeordnet und als Schülerversuch durchgeführt werden. Um die einzelnen Arbeitsschritte nachvollziehen zu können, bedarf es an etwas tiefgreifenden Vorwissens. Die SuS müssen wissen, dass die Samenhaare von einer Schutzschicht umgeben ist, die vorerst zerstört werden muss. Außerdem müssen die SuS entsprechend der funktionellen Gruppen von Cellulose die auftretenden Wechselwirkungen mit den jeweiligen Chemikalien charakterisieren können. Die Grundlagen der Komplexchemie sind zudem Voraussetzung für das Verstehen der weiteren Reaktionsfolgen. Dieser Versuch eignet sich eher als Abschluss einer Versuchsreihe, da er in seiner Komplexität tiefgreifendes und vernetzendes Denken von den SuS erfordert, das ohne die entsprechenden Vorkenntnisse nicht geleistet werden kann. [9]





V4 Herstellung eines Cellulosederivates - Bakteriencellulose

Beobachtungen:

Versuch 1a:

Bereits nach 3 Tagen entsteht eine weißliche Kahlhaut an der Oberfläche der Flüssigkeit. Diese im Laufe der Zeit immer mehr die Farbe der Flüssigkeit an. Tag für Tag wächst die Schicht in ihrer Breite und Stärke an, sodass nach 2 Wochen eine ca. 1 cm dicke Schicht entstanden ist.

Versuch 1b:

Beim Versuch ohne Sauerstoff hat sich um den Scoby nach ca. 8 Tagen eine leicht weißliche Schimmelschicht gebildet.

Versuch 1c:

Beim Versuch ohne Zucker ist im Laufe der 14 Tage gar nichts geschehen. Der Scoby liegt unverändert vor.



Abb. 5: Darstellung der entstandenen BC

Auswertung:

Versuch 1a:

Bei der Herstellung der BC aus dem Mutter-Scoby läuft ein Fermentationsprozess ab. Das heißt organische Stoffe werden mithilfe von Mikroorganismen abgebaut oder umgewandelt. Bei der Fermentation von Kombucha handelt es sich um eine aerobe Umwandlung von Zucker zu Essigsäure, da Sauerstoff benötigt wird. Kombucha selbst besteht aus Hefestämmen und Gattungen der Essigsäurebakterien (*Acetobacter xylinum*). Hefen besitzen die Eigenschaft sich vegetativ durch Zellteilung oder Knospung zu vermehren. Die Essigsäurebakterien sind in der Lage unter Lufteinfluss Ethanol zu Essigsäure umzuwandeln. Durch die symbiotische Zusammenarbeit der Kombuchabestandteile wird der Zucker in der Nährlösung durch die Hefen zu Ethanol vergärt. Die Essigsäurebakterien wandeln das produzierte Ethanol zu Essigsäure um. Dabei entsteht an der Grenzfläche zwischen Nährlösung und Luft eine Kahlhaut, welche die entstandene Bakteriencellulose darstellt. Der aus Mikroorganismen bestehende Biofilm kann Nährstoffe aus der Flüssigkeit und Sauerstoff aus der Luft aufnehmen. Die entstandene Kultur versorgt sich solange selbst, bis kein Zucker mehr vorhanden ist. Es muss darauf geachtet werden, dass die Fermentation erst bei 20 °C einsetzt. Temperaturen über 30 °C können der Kultur schaden. Die Bakteriencelluloseschicht bildet über mehrere Tage einen extrazellulären weißlichen Film, welcher in seiner Breite und seiner Stärke weiter wächst.[11]

Versuch 1b:





Wird der Versuch ohne Sauerstoff durchgeführt, so finden keine Fermentationsprozesse statt. Der Sauerstoff ist die Grundbedingung für die Umwandlung von Zucker zur Essigsäure. Die vitalen Inhaltsstoffe des Scoby (Bakterien und Hefen) werden durch den langandauernden Luftabschluss inaktiv und sterben ab. Aus diesem Grund steigt die Wahrscheinlichkeit für Schimmelbildung und die Vermehrung von Fremdkeimen. Es kann keine Bakteriencellulose hergestellt werden.

Versuch 1c:

Die Bakterien und Hefen benötigen Zucker, um diesen zu verstoffwechseln. Steht kein Zucker zur Verfügung, können die in der Nährlösung befindlichen Hefen kein Ethanol herstellen. Demzufolge steht den Essigsäurebakterien auch kein Ethanol zur Umwandlung zu Essigsäure zur Verfügung. Es laufen dementsprechend keine Fermentationsprozesse ab und die Herstellung von Bakteriencellulose kann nicht gewährleistet werden.

Didaktischer Kommentar:

Die SuS können die Herstellung von Bakteriencellulose aus einem Kombucha-Scoby durchführen und die ablaufenden Prozesse der Fermentation erklären.

Beim Experimentieren muss darauf geachtet werden, dass bei Versuch 1a, Sauerstoff in das Gärggefäß eindringen kann, da sonst eine Herstellung der BC unmöglich wird. Bei Versuch 1b dagegen, muss strengstens darauf geachtet werden, dass das Gärggefäß luftdicht verschlossen ist, um anschließend die Wichtigkeit der Sauerstoffanwesenheit für den Fermentationsprozess zu erkennen. Weiterhin sollte darauf geachtet werden, dass die Gefäße bei Zimmertemperatur (ca. 20-25°C) stehen bleiben, da geringere Werte den Fermentationsprozess verlangsamen und zu hohe Werte der Kultur Schäden zufügen, weshalb direkte Sonneneinstrahlung vermieden werden sollte. Ebenso sollte der Ansatz wirklich stehen gelassen werden und wenig Bewegungen ausgesetzt sein, da diese der Kultur schaden können. Außerdem kann die Menge und Zusammensetzung des Nährmediums, die Gefäßart und -form Einfluss auf das Wachstum der Kultur haben.

Der Versuch zur Herstellung der BC ist aufgrund seiner Dauer als Langzeitexperiment angesiedelt, welcher von den SuS zuhause oder in der Schule realisiert werden kann. Dieser kann sowohl als Einzel- oder auch als Gruppenarbeit durchgeführt werden.

Es ist möglich, das Experiment während der Bearbeitung des Themengebiets der Cellulosederivate oder schon vor Beginn des Themas durchzuführen (mit einem Ausblick auf zukünftige Themen), um mit den Ergebnissen aus dem Versuch in das neue Thema einzusteigen.

Die SuS sollten hierfür folgendes Vorwissen mitbringen. Die Bakteriencellulose und das Experiment kann dem Lehrplanthema „Herstellung und Verwendung von Cellulosederivaten“ zugeordnet





werden. Hierfür sollten die SuS die verschiedenen Arten und die wichtigsten Vertreter der Polysaccharide kennen. Besonders das Wissen über die Struktur und Eigenschaften, aber auch die Anwendungsgebiete der Cellulose sind für das Experiment von besonderer Bedeutung, um im Anschluss des Experiments auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten der beiden Cellulosearten einzugehen.

Als Anschlussversuch kann zum einen der Nachweis von Cellulose dienen. Ob die selbst hergestellte Bakteriencellulose tatsächlich Cellulose beinhaltet, kann mithilfe von Iod-Zinkchlorid-Lösung nachgewiesen werden (siehe Versuch 1)

Ebenso könnten im Anschluss des Versuchs die Strukturen der BC und der pflanzlichen Cellulose verglichen werden. Hierfür eignet sich die Ansicht der beiden Stoffe unter dem Mikroskop.

IV. Referenzen

- [1] Iguchi, M., Yamanaka, S., Budhiono, A. (2000). Bacterial cellulose — a masterpiece of nature's arts. *Journal of Materials Science* **35/2**, 261–270.
- [2] Marit Seifert. Modifizierung der Struktur von Bakteriencellulose durch die Zusammenstellung des Nährmediums bei der Kultivierung von *Acetobacter xylinum*.
- [3] Moore, J. T., Langley, R. (2011). *Organische Chemie für Dummies*, 1. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim.
- [4] Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.-P., Bohn, A. (2005). Cellulose: faszinierendes Biopolymer und nachhaltiger Rohstoff. *Angew. Chem.* **117/22**, 3422–3458.
- [5] vdiv (2015). Besonders gut verträglich: Mit bakterieller Zellulose beschichtete Implantate. *ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure*.
- [6] Shi, Z., Zhang, Y., Phillips, G. O., Yang, G. (2014). Utilization of bacterial cellulose in food. *Food Hydrocolloids* **35**, 539–545.
- [7] Bakteriencellulose (2018). <http://www.fzmb.de/prodbakteriencellulose.html> (letzter Zugriff am 22.1.2021).
- [8] Startseite (2021). <https://www.th-koeln.de/> (letzter Zugriff am 22.1.2021).
- [9] Didaktik der Chemie. <https://www.chemie.uni-wuerzburg.de/didaktik/lehrende/experimente-zum-thema-holz-und-cellulose/> (letzter Zugriff am 28.01.21)
- [10] Emilies Treats (2015). How to: Kombucha herstellen (Anleitung mit und ohne Scoby!). <https://emiliestreats.de/how-to-kombucha-herstellen-anleitung-mit-und-ohne-scooby/> (letzter Zugriff am 25.3.2021).
- [11] Rebekka Hehn (2021). Biofabrication_PDF. http://rebekkahehn.de/wp-content/uploads/2015/07/Biofabrication_PDF.pdf (letzter Zugriff am 25.3.2021).

Quellenverzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Schematische Darstellung der Bakteriencellulosebiogenese und Bildung der Microfibrillen [1]	1
Abb. 2: 2000-bfache Vergrößerung der BC. [2]	2
Abb. 3: 20000-fache Vergrößerung der BC. [2]	2
Abb. 4: Biopolymer Cellulose [3]	3
Abb. 5: Darstellung der entstandenen BC [10]	25



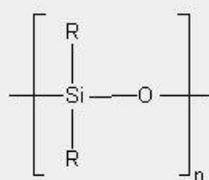
3. Anorganische Polymere (Dennis Donath, Jacob Töpel, Franziska Ullmann)

I. Sachinformation

1. Die Gruppe der anorganischen Polymere und die Silikone

Im Gegensatz zu den deutlich bekannteren und geläufigeren organischen Polymeren, als Beispiel sei hier die Cellulose zu nennen, ist die Stoffgruppe der anorganischen Polymere durch die Existenz von Heteroatomen und nicht Kohlenstoff innerhalb der Polymerhauptkette gekennzeichnet. Beispiele für solche Heteroatome sind Aluminium, Bor, Silizium, Stickstoff, Phosphor oder Schwefel. Anorganische Polymere lassen sich nach diesen Elementen und bestimmten Verknüpfungen in verschiedene Untergruppen einteilen – hierbei sind vor allem die Polyphosphazene (R-P=N-Struktur), Polysilane (R-Si-Struktur) sowie Polysiloxane (R-Si-O-Struktur), die auch als Silikone bezeichnet werden, von großer Bedeutung. [1, 2, 3, 4] Aufgrund der Ableitbarkeit der Struktur aus dem Namen „Siloxan“ ist es für Schüler¹ anfangs möglicherweise besser bzw. verständlicher, diesen zu gebrauchen. Trotzdem wird in dieser Broschüre von Silikonen die Rede sein, was auf die häufigere Verwendung zurückzuführen ist.

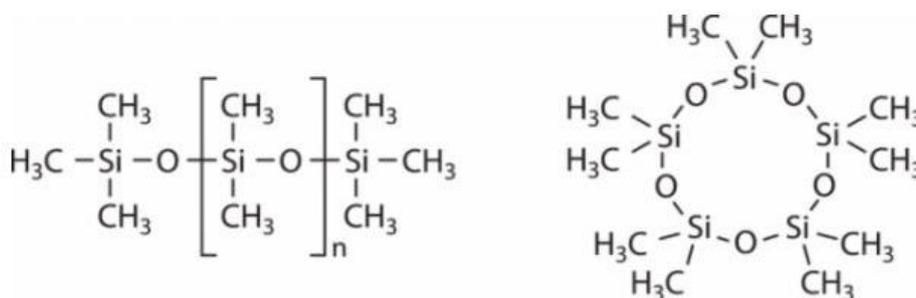
Allgemeine Strukturformel:



R = organische Seitengruppen wie Methyl, Alkyl, Phenyl

Allgemeine Strukturformel von Siloxanen bzw. Silikonen

Auch nur diese Gruppe, also die Silikone, werden von den anorganischen Polymeren ausgewählt betrachtet. Sie können verschiedenste Strukturformen annehmen, wobei die oben dargestellte Grundstruktur² für



Beispiele für ein lineares und ein cyclisches Silikon

¹ Hinweis: Im nachfolgenden wird stets das generische Maskulinum verwendet, da bei diesem keine Informationen über Geschlechterverhältnisse intendiert sind.

² vgl. Böhme, U.: Allgemeine Strukturformel der Silikone.

alle Silikone allgemeingültig ist. Die Begründung für die Eingrenzung auf diese Stoffgruppe findet sich in den folgenden Abschnitten. Silikone können dabei sowohl in linearen als auch cyclischen Formen vorliegen, welche ineinander umgewandelt werden können. Diese im Gleichgewicht vorliegende Umwandlung, welche vor allem für den Prozess des Downcyclings (Definition vgl. Versuchsbeschreibung V3) eine essentielle Rolle spielt, wird auch als Äquilibrierungsreaktion bezeichnet. [5] Beispiele für diese verschiedenen vorkommenden Strukturen sind nachfolgend dargestellt.³

Eine weitere bekannte Reaktionsart der Silikone stellt die Polykondensation dar, [6] die beispielsweise beim Aushärten von Silikondichtstoffen beobachtet werden kann. Entstehende Eliminierungsprodukte können dabei unter anderem Essigsäure sein, wobei die Säurefunktion einfach mit Unitest nachgewiesen werden kann. Dies ist der Fall bei Acetoxy-Silikon. Andere Typen von Dichtstoffen sind etwa Alkoxy- oder Amin-Silikone, die jeweils unterschiedlich reagieren und auch unterschiedliche pH-Werte anzeigen (basisch bzw. neutral). Je nach Oberfläche des abzudichtenden Materials, ist es wichtig, den richtigen Dichtstoff zu verwenden. Beispielhaft sei genannt, dass eine Abdichtung von Marmor (z. B. im Bad) nicht mit einem Acetoxy-Silikondichtstoff durchgeführt werden sollte, da dieser den zu großen Teilen aus CaCO_3 bestehenden Marmor zersetzen würde (vgl. Gleichung (3)). [7] Gleichung (1) zeigt eine Polykondensation eines Acetoxy-Silikons unter Abspaltung von Essigsäure.

2. Verwendung der Silikone

Silikone haben aufgrund ihrer Struktur besondere Eigenschaften. Im Allgemeinen sind sie äußerst stabil. [4] Sie sind beispielweise chemisch nahezu inert, sehr hitzebeständig, stabil gegenüber UV-Strahlung sowie nicht wasserlöslich und sogar wasserabweisend. Durch weitere Eigenschaften – z. B. die Durchlässigkeit für Gase und viele Wirkstoffe, ihre Ungiftigkeit sowie die Hemmung mikrobiellen Wachstums – finden sie eine Vielzahl von Anwendungen im alltäglichen Leben: beispielsweise als Dichtmasse, [7] Implantate und andere medizinische Verwendungen, als Beschichtung, in Shampoos, als wasserfeste Sonnenschutzmittel sowie als Flaschenaufsätze. [8] Allein aufgrund dieser großen Spannweite an Verwendungsmöglichkeiten ist es sinnvoll, sich bei der Gruppe der anorganischen Polymere auf die Silikone zu beschränken. Daneben sind Silikone am ehesten in der Schule bzw. im Labor vorhanden. Ferner ist diese Stoffgruppe den Schülern vielleicht von zu Hause geläufig.

3. Umweltrelevanz der Silikone

Obwohl Silikone, wie oben erwähnt, nicht toxisch sind, ergeben sich aus ihren Eigenschaften andere Probleme, die den Aspekt Umwelt betreffen. Dies ist insbesondere ihrer Stabilität geschuldet, die dafür sorgt,

³ vgl. Wittmann, J.: lineare oder cyclische Siloxane.

dass Silikone nicht über natürliche Prozesse abbaubar sind. Aber auch wenn der Mensch versucht, diese Stoffgruppe unschädlich zu machen, wird es problematisch: In Müllverbrennungsanlagen beispielsweise können sie nicht einfach zu Kohlenstoffdioxid und Wasser verbrennen, sondern „verglasen“ zu Siliziumdioxid, was sogar die Anlage schädigen kann. [9]

Eine Möglichkeit, ein Silikon wiederzugewinnen, stellt die oben bereits genannte Äquilibrierungsreaktion dar. In Anbetracht des Aufwandes (vgl. Experiment V3) und dass am Ende sogar nur ein Produkt minderer Qualität entsteht (aus festem nur ein flüssiges Silikonöl, was sogar noch aufgereinigt werden muss), ist diese Reaktionsart auch nicht die beste Lösung. Man spricht hier von „Downcycling“. [5, 10]

Die vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten sorgen für einen breiten Einsatz der Silikone und damit auch eine große Umweltrelevanz. Gerade in den letzten Jahren erfuhren Silikone wie kaum ein anderer Kunststoff einen Aufschwung, aber die damit verknüpften Umweltprobleme konnten noch nicht hinreichend gelöst werden. [9]



II. Schülermaterial

Thema: Makromoleküle – Silikone

Versuch 1: Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels

- Ein Acetoxy-Silikondichtstoff wird in eine mittels Bunsenbrenner erhitzte Agar-Agar-Lösung, welche mit Unitest versetzt wurde, gegeben, wodurch dieser aushärtet. Der Versuch ist eine typische makromolekulare Herstellungsreaktion, von der die chemische Gleichung aufgestellt wird. Es wird auf eine Alltagssituation (Verdichten von Marmorfliesen) Bezug genommen.
- Hauptlernziel: Die Schüler können die Bildung synthetischer Makromolekularer durch Polykondensation erläutern und praktisch durchführen.
- Nebenlernziele: Die Schüler können...
 - selbstständig den Versuch durchführen, beobachten und auswerten.
 - ihre naturwissenschaftlichen sowie fachspezifischen Kenntnisse bewusst nutzen, um Entscheidungen im Alltag sachgerecht zu treffen und sich entsprechend zu verhalten.

Versuch 2: Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?

- Das Verhalten gegenüber Wasser (Becherglas mit Wasser) sowie die Entflammbarkeit eines Silikondichtmittels (Brenner) wird im Vergleich mit Cellulose geprüft. Die aus den Eigenschaften resultierenden Verwendungsmöglichkeiten werden anschließend begründet sowie die Umweltrelevanz beurteilt.
- Hauptlernziel: Die Schüler können anhand der experimentell untersuchten Eigenschaften der Silikone verschiedene Verwendungsmöglichkeiten begründen und die resultierende Umweltrelevanz beurteilen.
- Nebenlernziele: Die Schüler können...
 - selbstständig den Versuch durchführen, beobachten und auswerten.
 - die experimentell untersuchten Eigenschaften des Silikons sowie der Cellulose kriterienorientiert vergleichen.

Versuch 3: Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen

- Die Äquilibrierungsreaktion eines Silikondichtstoffes wird als eine Möglichkeit der Wiederverwertung von Silikonen durch eine Lehrkraft durchgeführt. Dabei wird die zugrundeliegende Reaktionsgleichung erklärt und auf die Begriffe Re- und Downcycling bezogen. Vor- und Nachteile dieser Reaktion werden diskutiert.
- Hauptlernziel: Die Schüler können mithilfe des durchgeführten Versuches sowie den Erkenntnissen aus V1 und V2 die Vor- und Nachteile des Einsatzes von Silikon bewerten.
- Nebenlernziele:
 - selbstständig den Versuch beobachten und auswerten.
 - eine Äquilibrierungsreaktion mithilfe einer gegebenen Reaktionsgleichung erklären.
 - den Unterschied zwischen Recycling und Downcycling in Bezug auf den durchgeführten Versuch erkennen und zuordnen sowie die Zuordnung begründen.



V1 Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels

Informationen

Einleitung

Silikone, fachsprachlich auch Siloxane, haben vielfältigste Anwendungsbereiche. Ein gängiges Beispiel, was auch im Haushalt eine Rolle spielt, ist die Verwendung als Fugendichtmittel. Häufig werden diese im Bad eingesetzt. Bei der Aushärtung eines solchen Dichtmittels findet eine Polykondensation statt, die zu einer Änderung nicht nur der physikalischen, sondern auch der chemischen Eigenschaften führt.

Aufgabenstellung

1. Führen Sie den Versuch durch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.
2. Formulieren Sie für die Polykondensation (Aufgabe 1) die zugehörige chemische Gleichung. Verwenden Sie als Ausgangsstoff Diacetoxy-Polydimethylsiloxan. Kennzeichnen Sie darüber hinaus die Abgangsgruppe.
3. Sie überlegen, ob Sie in Ihrem Badezimmer, welches mit Marmor gefliest werden soll, die Fliesen mit einem Acetoxy-Silikon-Dichtstoff abdichten, da Sie diesen zu Hause vorrätig haben. Nehmen Sie Stellung zu diesem Vorhaben! Warum ist es ratsam, vielleicht einen alternativen Silikondichtstoff in Betracht zu ziehen? Verwenden Sie die chemische Zeichensprache. (Hinweis: Marmor enthält einen hohen Anteil an Calciumcarbonat)

Das Experiment

Materialien

- 2 Petrischalen
- Bunsenbrenner
- Drahtnetz
- Dreifuß

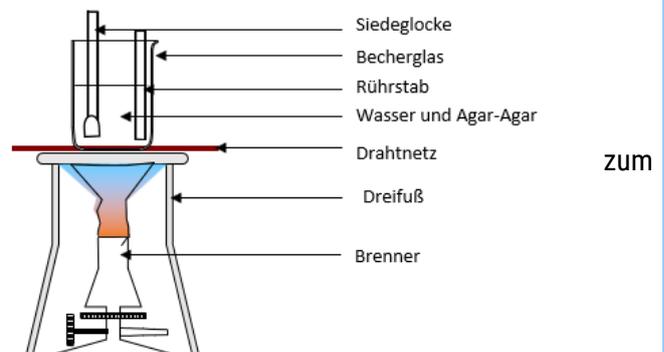
- Glasstab
- Becherglas (200 ml)
- Waage mit Wägeschälchen
- Siedeglocke

Chemikalien

- Acetoxy-Silikondichtstoff
- 100 ml destilliertes Wasser
- 2 g Agar-Agar
- Unitestlösung

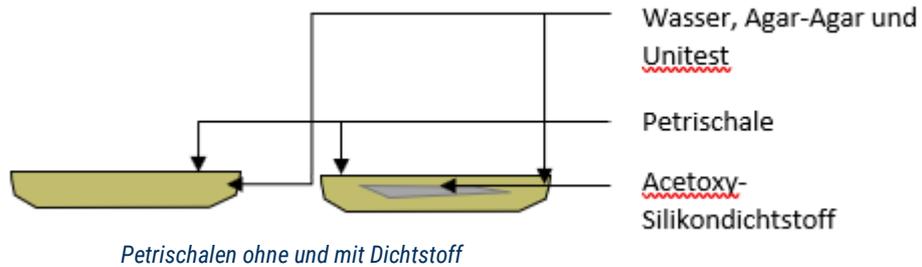
Durchführung

1. Bringen Sie 100 mL Wasser in einem Becherglas auf einer einem Drahtnetz, welches auf einem Dreifuß liegt, mithilfe eines Brenners Sieden (**Siedeglocke verwenden und vorsichtig sein!**). Der Bunsenbrenner soll eine leicht





- rauschende Flamme besitzen. Rühren Sie 2 g abgewogenes Agar-Agar nach dem Erhitzen noch auf der Heizplatte ein.
- Nehmen Sie das Becherglas von der Heizplatte herunter. Geben Sie mind. 5 Tropfen Unitestlösung hinzu.
 - Teilen Sie die Lösung auf zwei Petrischalen auf. Eine der Schalen dient als Referenzprobe.
 - Geben Sie in die andere Schale einen ca. 3 cm langen Streifen des Acetoxy-Silikons und warten Sie ca. 5-6 min. Beobachten Sie anschließend.



- Entsorgen Sie die Chemikalien im Restmüll.

Erklärung/ Information

Neben Acetoxy-Dichtstoffen existieren auch andere Silikone, die als Fugendichtmasse verwendet werden können, wobei Alkoxy- und Amin-Dichtstoffe die bekanntesten sind. Sie alle zeigen beim Aushärten andere pH-Werte an.



V2 Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?

Informationen

Einleitung

Die Wahl von Silikonen als Dichtmittel, sowie zum Beispiel als Beschichtungsmaterial bei Zelten, fußt auf mehreren Gründen. Man kann sie mit der besonderen Struktur und den daraus resultierenden Eigenschaften der Silikone erklären. Doch sollten beim Einsatz verschiedene Aspekte ins Auge gefasst werden.

Aufgabenstellung

1. Prüfen Sie das Verhalten gegenüber Wasser sowie die Entflammbarkeit einmal mit dem gegebenen Silikondichtstoff und einmal mit einem Stück Pappe oder Pappe (Cellulose). Notieren Sie Ihre Beobachtungen.
2. Vergleichen Sie die gemachten Beobachtungen bei Silikon und der Pappe bezüglich des Verhaltens gegenüber Wasser sowie der Entflammbarkeit und begründen Sie den Einsatz von Silikonen als Fugendichtstoff abseits der Aushärtung (V1) sowie als Beschichtungsmaterial bei Zelten.
3. Beurteilen Sie die Umweltrelevanz von Silikonen anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus den Aufgaben 1 und 2.

Das Experiment

Materialien

- Bunsenbrenner
- Dreifuß
- Drahtnetz

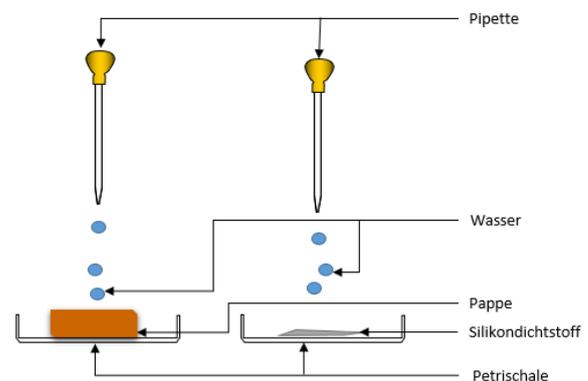
- Tiegelzange
- 2 Bechergläser (100 ml)
- Glasstab

Chemikalien

- Acetoxy-Silikondichtstoff
- Pappe oder Papier (Cellulose)
- Wasser

Durchführung

- I. Wasserlöslichkeit
 1. Nehmen Sie ein Stück Pappe und legen Sie es in ein mit Wasser befülltes Becherglas (100 ml). Rühren Sie mit dem Glasstab um und beobachten Sie.
 2. Wiederholen Sie den Vorgang mit ca. 5 cm Silikondichtstoff.
 3. Entsorgen Sie die Chemikalien im Restmüll



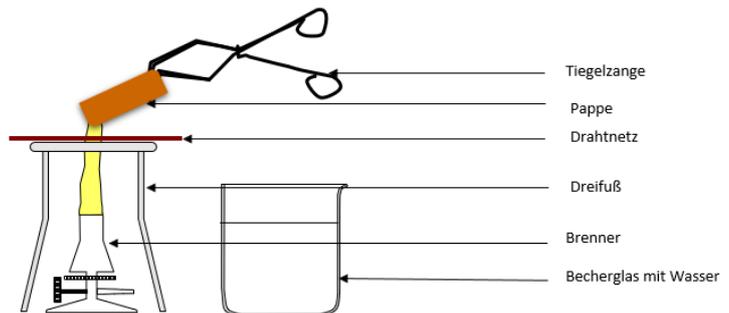
Prüfen des Verhaltens gegenüber Wasser bei Pappe und einem Silikon-Dichtstoff





II. Entflammbarkeit

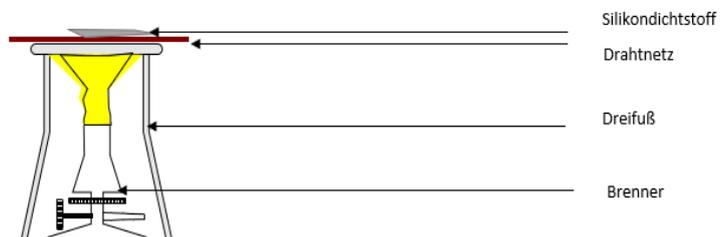
1. Entzünden Sie einen Brenner mit leuchtend oranger Flamme unter einem Dreifuß mitsamt Drahtnetz.
2. Nehmen Sie mit einer Tiegelzange ein kleines Stück Pappe und halten Sie es in die Flamme oberhalb des Drahtnetzes.



Prüfen der Brennbarkeit der Pappe

Löschen Sie im Falle einer Entzündung sofort im Becherglas ab.

3. Schalten Sie den Brenner aus. Geben Sie ca. 3 cm Silikondichtstoff auf das Drahtnetz und entzünden Sie erneut den Brenner. **Im Falle einer Entzündung: lassen Sie das Silikon auf dem Drahtnetz abbrennen.**

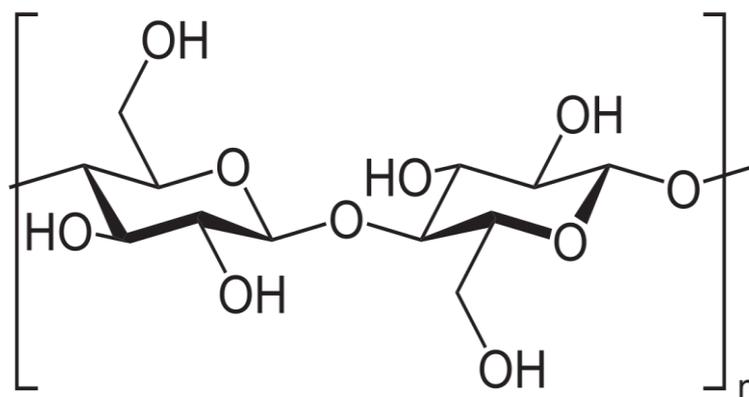


Prüfen der Brennbarkeit des Silikondichtstoffes

4. Entsorgen Sie die Chemikalien im Restmüll.

Erklärung/ Information

Cellulose ist, im Gegensatz zu Silikon, ein natürliches, organisches Polymer.



Strukturformel von Cellulose [Quelle: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/07/Cellulose_Sessel.svg/1200px-Cellulose_Sessel.svg.png, entnommen am 23.02.2021]



V3 Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen

Informationen

Einleitung

Die Eigenschaften des Silikons, die in V2 untersucht wurden, erweisen sich als Fluch und Segen. Insbesondere das Recycling spielt bei Silikonen deshalb eine große Rolle. Zelte, die aus Polyamid oder Polyester bestehen, werden mit Silikon beschichtet, um sie wasserabweisender zu machen. Doch wie kann eine solche Beschichtung wieder zurückgewonnen werden? Eine Reaktionsart, die diesen Aspekt aufgreift, ist die sogenannte Äquilibrierungsreaktion, die in diesem Experiment betrachtet wird. Kann man hier von Recycling sprechen? Oder ist der „Downcycling“-Begriff passender?

Aufgabenstellung

1. **Beobachten Sie den durch die Lehrkraft durchgeführten Versuch und notieren Sie Ihre Beobachtungen.**
2. **Erklären Sie die zugrundeliegende Reaktionsgleichung der Äquilibrierung (siehe Infobox) mit eigenen Worten. Ordnen Sie diese einer gegebenen Definition (siehe Infobox) zu und begründen Sie Ihre Wahl.**
3. **Diskutieren Sie Vor- und Nachteile des Einsatzes von Silikon hinsichtlich der in V1 nachempfundenen Verwendungsmöglichkeit und der in V2 ermittelten Eigenschaften sowie der in diesem Experiment durchgeführten Äquilibrierungsreaktion. Beziehen Sie hierbei den Aufwand des Verfahrens, die eingesetzten Ausgangschemikalien und die erhaltenen Reaktionsprodukte mit ein (siehe Infobox).**

Das Experiment

Materialien

- Ein kleines Stück Baumwollstoff (als „Zelt“)
- ein Messer o. Ä. zum Verteilen des Silikondichtstoffes
- Einhals-Rundkolben (300 ml)
- Rückflusskühler mit angeschlossenem Wasser und Abdichtungen sowie Durchflussanzeiger
- Stativfuß mit zwei Klemmen und zwei Muffen
- Heizpilz oder Ölbad
- Rührfisch Magnetrühr Tisch
- Waage mit Wägeschälchen
- Messzylinder
- Mörser und Pistill
- Wasserbad
- Petrischale

Chemikalien

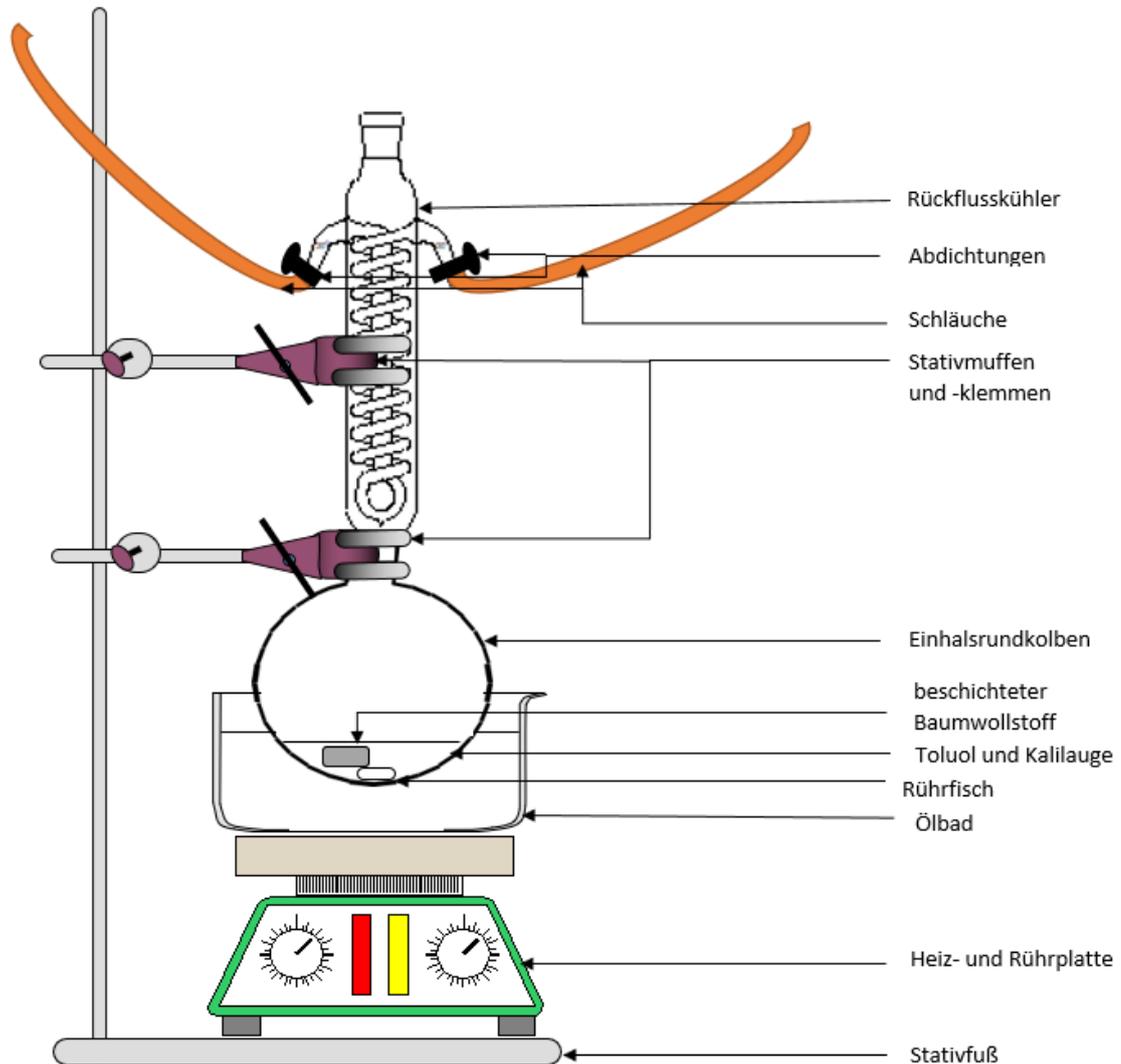
- Acetoxy-Silikondichtstoff
- Toluol (50 ml)
- Kaliumhydroxid (fest, 2,5 g)

Durchführung





1. Bauen Sie eine Apparatur gemäß der Versuchsskizze **unter dem Abzug** auf.



Die Versuchsapparatur nach Zugabe aller benötigten Chemikalien. Die Schläuche sind mit einem Durchflussanzeiger an das Wasser anzuschließen.

- Beschichten Sie das Stück Baumwollstoff mit dem Silikondichtstoff, bis es klar farblich unterschieden werden kann.
- Geben Sie den beschichteten Baumwollstoff in den 300 ml Rundkolben und setzen Sie diesen in die Apparatur ein.
- Messen Sie in einem Messzylinder 50 ml Toluol ab und geben Sie dieses in den Rundkolben. Schalten Sie den Magnetrührer an.
- Wiegen Sie in einer Wägeschale 2,5 g Kaliumhydroxid ab und mörsern Sie anschließend. Geben Sie das Pulver in den Rundkolben.
- Erhitzen Sie den Heizpilz bzw. das Ölbad so lange, bis eine Veränderung am Baumwollstoff erkennbar ist.



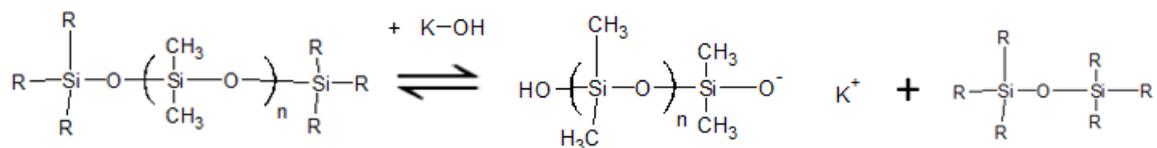
7. Kühlen Sie den Rundkolben in einem Wasserbad ab. Überführen Sie den Inhalt teilweise zur genaueren Betrachtung in eine Petrischale.
8. Entsorgen Sie die Chemikalien in die **organischen Restabfälle**.

Erklärung/ Information

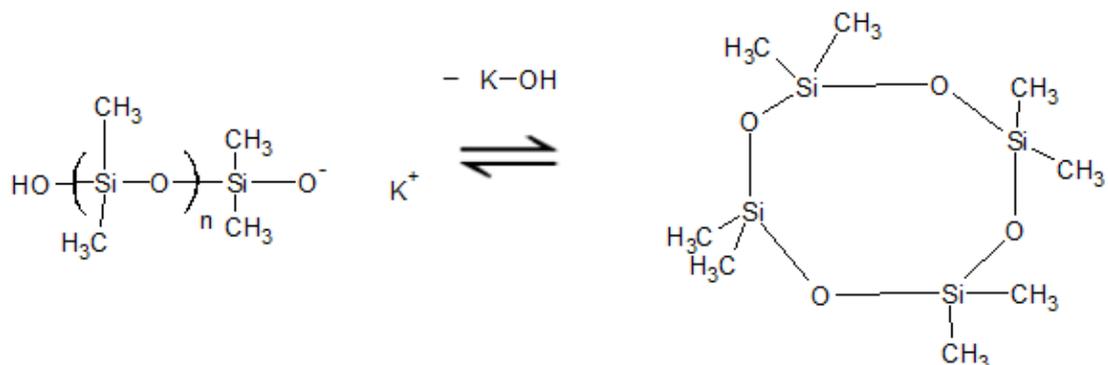
Näherungsweise wird das Zelt mit Baumwollstoff dargestellt. Nach der Reaktion bilden sich zwei Phasen, wobei die eine das fertige Produkt, die andere das Lösungsmittel Toluol ist, welches aus Erdöl gewonnen wird. Um das Produkt zu reinigen, muss es anschließend vakuumdestilliert werden.

Zur Vereinfachung entstehen bei dieser Äquilibrierungsreaktion aus einem **Polysiloxan (Silikon)** ein **lineares** (einfache Si-O-Si-Bindung) sowie ein **cyclisches** Siloxan (Ring). Die Reaktionsgleichung lautet:

1. Schritt:



2. Schritt:



[Quelle (23.02.2021): abgewandelt nach:

<https://slideplayer.com/slide/3867301/13/images/15/Anionic+Ring+Opening+Equilibrations.jpg>].

Definition von Recycling: „Aufbereitung und Wiederverwendung bereits benutzter Rohstoffe“

[Quelle: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Recycling>, 23.02.2021]

Definition von Downcycling: „Nutzung von Abfallstoffen oder gebrauchten Gegenständen als geringerwertige Rohstoffe“

[Quelle: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Downcycling>, 23.02.2021]



III. Didaktische Hinweise

Die anorganischen Polymere und deren Untergruppe, die Silikone, werden nicht explizit im Thüringer Lehrplan benannt. [11] Trotzdem haben sie eine gewisse Relevanz in der Schule. Dies ist insbesondere damit zu begründen, dass diese Stoffgruppe zeigt, dass es nicht nur kohlenstoffbasierte Polymere gibt, denn nur diese werden im Lehrplan namentlich erwähnt. Daneben könnte diese Stoffgruppe durchaus Schülern von zu Hause (Bau, Kosmetikprodukte, ...) bekannt sein. Möglicherweise kennen die Schüler auch bereits die Umweltproblematik (oder können diese ableiten) aufgrund des großen Einsatzbereiches der Silikone. Das Thema Re- bzw. Downcycling ist auch ein Grund, wieso die Silikone in der Schule behandelt werden könnten. Im Lehrplan werden im Bereich „Makromoleküle – Struktur und Reaktionen der Kunststoffe“ folgende Punkte benannt, die alle auf Silikone bezogen werden *können*:⁴

- Erwähnung der Polykondensation als Reaktion → **Erläuterung** (Sachkompetenz)
- Erwähnung der Alltagsrelevanz von Kunststoffen und daraus folgende Entscheidungen → **Nutzung naturwissenschaftlicher und fachspezifischer Kenntnisse, sachgerechte Bewertung, Treffen von Entscheidungen und sachgerechtes Verhalten** (Sach- und Selbst- und Methodenkompetenz)
- Erwähnung von Recycling von Kunststoffabfällen (auch Vor und Nachteile und ökologische und ökonomische Aspekte) → **Gegenüberstellung und Bewertung** (Sach- und Selbst- und Sozialkompetenz)
- Erwähnung der Untersuchung von Eigenschaften von Kunststoffen im SE (darunter: Verhalten beim Erwärmen, Löslichkeit in Wasser [...]) → **Untersuchung** (Sach- und Methodenkompetenz)

Dieses Thema ist in der Sekundarstufe II angesiedelt und auch nur hier ist der Einsatz der Silikone sinnvoll. Dies liegt auch am benötigten Vorwissen der Schüler (insbesondere allgemeine organische Chemie, evtl. auch Reaktionsmechanismen sowie der grundsätzlichen Verfahrens- und Verhaltensweisen während eines Experiments; die genauen benötigten Vorkenntnisse sind bei den Versuchen selbst aufgeführt). Darüber hinaus besitzt das Thema auch fächerübergreifende Zugänge, insbesondere bei der Biologie, der Physik oder der Geographie. Dies ist insbesondere im Bereich der Abbaubaukeit und der daraus resultierenden Umweltrelevanz der Fall.

⁴ Hinweis: Hier wurde eine Auswahl getroffen, die auf die formulierten Experimente zugeschnitten ist. Der Lehrplan erwähnt noch deutlich mehr Punkte.

V1 – Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels:⁵

Das Ziel dieses Versuches besteht im Kennenlernen einer wichtigen Reaktion der Silikone und von Polymeren überhaupt sowie dem Transfer auf eine Alltagssituation. Ferner kann man den Versuch gut als Beginn der Versuchsreihe (V1 bis V3) verwenden. Die Polykondensation des Silikondichtmittels wurde ausgewählt, da diese verhältnismäßig einfach darzustellen und umzusetzen ist sowie darüber hinaus bei Silikon als Herstellungsmethode weit verbreitet ist. Diese Reaktion wird mittels einer Agar-Agar-Lösung, dem Silikondichtstoff und hinzugefügtem Unitest durchgeführt. Infolge der pH-Wert-Änderung wird einerseits das Aufstellen der Gleichung vereinfacht (eine Säure muss entstehen) sowie andererseits die Möglichkeit eines Transfers auf eine Alltagssituation (Marmorfliesen mit einem sauer reagierenden Silikon abdichten?) aufgeworfen.

V2 – Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?

In diesem Versuch geht es darum, Eigenschaften von Silikonen im Vergleich zu Cellulose (ebenfalls ein Polymer, der vielleicht vorher bekannt ist!) zu ermitteln und an diesen die Umweltrelevanz der Silikone aufzuzeigen. Als Versuchsinhalte bieten sich das Verhalten gegenüber Wasser sowie gegenüber Hitze an, was insbesondere der Einfachheit der Versuche und der Eindringlichkeit der Ergebnisse geschuldet ist. Durch die genauen Anweisungen (z. B. Silikon nur in eine schwache Brennerflamme halten) sollten die beobachteten Eigenschaften eindeutig sein: Silikone sind sehr beständig. Durch die vom Schüler selbst gemachten Beobachtungen lässt sich ein Bezug zur Umwelt einfach aufzeigen: Wenn Silikone beständig sind, dann sind sie auch in der Umwelt schwer abbaubar.

V3 – Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen:

Dieser Versuch schließt die beiden vorherigen Versuche rund ab. Nach der Herstellung, der Anwendung und der Umweltproblematik folgt nun die mögliche Zurückgewinnung, die jedoch deutlich aufwendiger ist als die anderen Experimente. Als Versuch wurde eine Äquilibrierungsreaktion ausgewählt, da diese gut als Beispiel des Recyclings, was eigentlich ein Downcycling ist, dient. Dabei kommt es unter Aufwand zu einer Umwandlung des festen Silikondichtstoffes zu einem Silikonöl, was anschließend sogar noch gereinigt werden müsste, um wirklich erneut zum Einsatz zu kommen. Der als Lehrerdemonstrationsexperiment (bei einer so komplizierten und gefährlichen Versuchsanordnung ist nichts anderes möglich) konzipierte Versuch zeigt mit einer gegebenen Gleichung sowie Definitionen von Re- bzw. Downcycling gut die Vor- und Nachteile des Einsatzes von Silikonen auf – insbesondere, da V1 und V2 miteinbezogen werden.

⁵ Hinweis: Die Lernziele wurden bereits erwähnt und sind in den didaktischen Hinweisen der einzelnen Versuche auch noch einmal aufgeführt. Aufgrund dessen wurde auf eine Auflistung in diesem Abschnitt verzichtet.





V1 Polykondensation (Aushärten) eines üblichen Silikondichtmittels

Beobachtungen:

Um den ausgehärteten Silikondichtstoff (auf dem Bild heller Streifen) herum bilden sich rote Schlieren. Das nebenstehende Bild zeigt das Resultat.⁶

Auswertung:

Aufgabe 1:

Nur Durchführung & Beobachtung (s. o.).

Aufgabe 2:

Die Polykondensation läuft nach Gleichung (2) ab. Das Reaktionsprodukt ist das ausgehärtete Silikon. Als Abgangsgruppe fungiert Essigsäure (CH_3COOH), welche das hinzugegebene Unitest rot verfärbt.



Aufgabe 3:

Durch die saure Reaktion des Acetoxy-Silikondichtstoffs ist es ratsam, auf eine Anwendung auf Marmor zu verzichten. [7] Die Reaktionsgleichung (3) zeigt, dass dieser zersetzt werden würde. Alternative Dichtstoffe wären beispielsweise ein Amin-Silikondichtstoff, der basisch oder, noch besser, ein Alkoxy-Silikondichtstoff, welcher neutral reagiert. Sie sind dem Acetoxy-Silikondichtstoff vorzuziehen.

Didaktischer Kommentar:

Lernziele:

Das Hauptlernziel des Versuchs lautet: Die Schüler können die Bildung synthetischer Makromolekularer durch Polykondensation erläutern und praktisch am Beispiel des Aushärtens eines Silikondichtstoffes durchführen. Die Nebenlernziele bestehen darin, dass die Schüler einerseits den Versuch selbstständig durchführen, beobachten und auswerten sowie andererseits ihre naturwissenschaftlichen sowie fachspezifischen Kenntnisse bewusst nutzen können, um Entscheidungen im Alltag sachgerecht zu treffen und sich entsprechend zu verhalten. Die Lernziele nehmen direkt Bezug auf den Thüringer Lehrplan. [11]

Praktisch-Experimentelle Beurteilung:

Da der Versuch eine saure Reaktion behandelt, sollte dementsprechend vorsichtig mit den Chemikalien umgegangen werden, auch wenn es nur eine schwache Säure (Essigsäure) betrifft. Außerdem ist es wichtig, eine Siedeglocke beim Erhitzen zu verwenden, da sonst ein Siedeverzug droht.

⁶ vgl. Hoßfeld, V.: Einfache Polymerchemie im Badezimmer.



Selbstverständlich gelten auch die allgemeinen Hinweise und Gefahren, die bei der Benutzung eines Bunsenbrenners beachtet werden müssen.

Anberaumt wurden 30 min für den Versuch (inklusive Aufbau), wobei jedoch beachtet werden muss, dass aufgrund der Maßnahmen, die im Zuge der Corona-Pandemie umgesetzt wurden, das Experiment nicht eigenständig durchgeführt werden konnte. Die tatsächlich benötigte Zeit für den Versuch könnte dementsprechend variieren. Wichtig ist bei V1 außerdem das Vorhandensein eines Acetoxy-Silikondichtstoffes sowie Agar-Agar. Während letzteres bei den meisten Laboren der Fall ist, muss ein sauer reagierender Dichtstoff möglicherweise noch beschafft werden.

Eine Verbesserung des Versuchs könnte etwa erreicht werden, indem man weitere Silikondichtstoffe als Vergleich nimmt (z. B. basisch oder neutral reagierende). [7] Entsprechend der Änderungen müssen der erhöhte Material- und Zeitaufwand berücksichtigt werden. Des Weiteren können die gestellten Aufgaben abgewandelt werden: Etwa könnte der Ausgangsstoff mit der Formel vorgegeben werden (das Aufstellen ist nicht einfach!) oder auch der Reaktionsmechanismus sowie der Name des entstandenen Produktes (laut Gleichung) als zusätzliche Leistung abgefragt werden.

Didaktische Beurteilung:

Der Versuch bedient sich der Funktion als Erarbeitungsversuch. Von einer Funktion als Einführungsversuch ist abzuraten, da einige Vorkenntnisse (darunter Allgemeines und insbesondere die Nomenklatur der Silikone) vorhanden sein müssen.

Das Experiment wurde als Schülerversuch (optimalerweise als Partnerarbeit zur gegenseitigen Hilfestellung, aber auch Materialeinsparung) geplant, da der Aufwand und die Komplexität nicht zu groß sind. Auch die Fehlerquellen (wenn man von einer offenen Flamme absieht) sind minimal.

Möglichkeiten zur Erweiterung des Versuches bestehen insbesondere beim Vergleich der Resultate (saure Reaktion) mit anderen Silikondichtstoffen. Eine Möglichkeit bestünde hierbei darin, dass verschiedene Schülergruppen verschiedene Dichtstoffe untersuchen. Ferner sind die Versuche V2 und V3 als Anschlussversuche konzipiert. Außerdem könnte bereits im Vorfeld eine echte Fuge mit dem Silikon verdichtet werden, um den Schülern das praktische Beispiel näher zu bringen. Alternativ ließe sich hier ein Video zeigen, was vor allem preislich besser ist.

Die Aufgaben 2 und 3 sind direkt auf die Inhalte des Thüringer Lehrplanes bezogen und sollen einerseits dazu dienen, die Reaktionsart besser beschreiben zu können (Aufstellen einer chemischen Gleichung), als auch Transferwissen zu vermitteln (Stellungnahme eines geplanten Einsatzes des Acetoxy-Silikons auf Marmor).





V2 Eigenschaften von Silikonen: Nicht nur Vorteile?

Beobachtungen:

I. Verhalten gegenüber Wasser:

Der Silikondichtstoff ist nicht wasserlöslich, sondern sogar wasserabweisend, die Pappe (Cellulose) nimmt dagegen Wasser auf.

II. Entflammbarkeit

Das Silikon entflammt nicht, die Pappe (Cellulose) bereits nach kurzer Zeit und brennt anschließend weiter. Möglicherweise kommt es nach längerem Einwirken zu einer Art „Verglasung“.

(Hinweis: Da der Versuch aufgrund der Maßnahmen infolge der Corona-Pandemie nicht selbst durchgeführt werden konnten, sind Bilder leider nicht vorhanden).

Auswertung:

Aufgabe 1:

Nur Durchführung & Beobachtung (s. o.).

Aufgabe 2:

Das Silikon ist nicht wasserlöslich, sondern gar wasserabweisend sowie nicht entflammbar (unter diesen Bedingungen). Die Pappe (Cellulose) jedoch nimmt Wasser auf und ist leicht entflammbar. Silikone sind infolge der nachgewiesenen Eigenschaften neben der einfachen Aushärtung (V1) gut als Dichtstoffe sowie als Beschichtungsmaterial für Zelte zu gebrauchen. Ein wasserabweisendes Verhalten ist insbesondere im Bad (Dichtstoff) sowie bei Regen (Zeltbeschichtung) wichtig, die Nicht-Entflammbarkeit etwa bei einem Haus- (Dichtstoff) oder Zeltbrand (Beschichtung).

Aufgabe 3:

Silikone haben eine besondere Umweltrelevanz. Die Beständigkeit (nachgewiesen durch Wasserabweisung und Nicht-Entflammbarkeit) sorgt zwar einerseits für eine breite Anwendungspalette (Dichtstoff, Beschichtung für Zelte), andererseits aber auch für eine schwierige Abbaubarkeit. Wenn Silikone in die Umwelt gelangen, sind sie demzufolge auch nur schwerlich zu entfernen. Auch Recycling (V3) ist demzufolge schwierig.

Didaktischer Kommentar:

Lernziele:

Das Hauptlernziel des Versuchs lautet: Die Schüler können anhand der experimentell untersuchten Eigenschaften der Silikone verschiedene Verwendungsmöglichkeiten begründen und die resultierende Umweltrelevanz beurteilen. Die Nebenlernziele bestehen darin, dass die Schüler sowohl den



Versuch selbständig durchführen, beobachten und auswerten, als auch die experimentell untersuchten Eigenschaften des Silikons sowie der Cellulose kriterienorientiert vergleichen können. Die Lernziele nehmen direkt Bezug auf den Thüringer Lehrplan, in welchem beispielsweise vermerkt ist, dass das Verhalten von Kunststoffen beim Erwärmen sowie die Löslichkeit gegenüber Wasser mittels Schülerexperimenten untersucht werden soll. Daneben ist auch die Rede von der Erläuterung des Zusammenhangs von Eigenschaften und Verwendung bei Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren, [11] was jedoch mit dem Thema der Silikone nur bedingt vereinbar ist.

Praktisch-Experimentelle Beurteilung:

Im Versuch sollte man Vorsicht im Umgang mit dem Bunsenbrenner walten lassen, insbesondere beim Entzünden der Cellulose. Aus diesem Grund sollte ein Becherglas mit Wasser bereitstehen.

Der Versuch sollte innerhalb von 20 min, inklusive Aufbau, durchführbar sein, wobei jedoch wie bei V1 der Umstand beachtet werden sollte, dass das Experiment nicht eigenhändig durchgeführt wurde. Darüber hinaus ist analog das Vorhandensein eines Silikon-Dichtstoffes im Vorfeld zu prüfen. Im Gegensatz zu V1 ist hier jedoch auch eine andere Sorte (z. B. Alkoxy- oder Amin-Dichtstoff) möglich.

Für diesen Versuch sind vielfältige Erweiterungsmöglichkeiten denkbar. Dies liegt an der hohen Beständigkeit von Silikonen, die sich auch bei anderen Eigenschaften [13, 14] zeigt, etwa an der chemischen Inertie (z. B. gegenüber vielen Säuren), der Beständigkeit gegenüber (UV)-Strahlung, eine schlechte biologische Abbaubarkeit oder auch der Unmöglichkeit einer elektrischen Zersetzung, da Silikone nicht elektrisch leitfähig sind. Als Experimente sind dabei insbesondere die Untersuchung auf letzteres sowie auf verschiedene Säuren möglich. Außerdem besteht die Möglichkeit einer thermischen Zersetzung (mit sehr viel Energie), wobei man hier sogar das entstehende CO_2 mittels Barytwasser nachweisen könnte. An allen gezeigten Möglichkeiten lässt sich die Umweltrelevanz ableiten. Natürlich muss dafür die Zeit sowie das verwendete Material angepasst werden.

Didaktische Beurteilung:

Der Versuch wurde als Erarbeitungsversuch konzipiert und schließt idealerweise an V1 an. Möglich ist hier allerdings auch eine Funktion als Einstiegsversuch, da keine großen chemischen Vorkenntnisse benötigt werden. Eine Variante wäre auch, den Versuch und auch das gesamte Thema der Silikone anzusetzen, wenn bereits organische Polymere bekannt sind. So lässt sich der Vergleich zur Cellulose, die vorher ebenfalls behandelt werden würde, besser ziehen.

Sinnvoll ist der Einsatz als Partner-Schülerversuch, was mit dem geringen Aufwand und, bis auf die offene Brennerflamme, geringen Verletzungsrisiko begründet werden kann.





Wie oben erwähnt, ist eine Erweiterung des Versuches mit weiteren Eigenschaften möglich. Darüber hinaus kann man auch einen Struktur-Eigenschafts-Zusammenhang von Cellulose und dem Silikon herstellen, wobei hier aber größere Vorkenntnisse nötig sind (z. B. Struktur der Silikone, Thermodynamik bei der Verbrennung, Dipole für Verhalten gegenüber Wasser etc.). Auch hierbei kann man, analog zu V1, mehrere Schülergruppen mehrere Eigenschaften untersuchen lassen. Weiterhin ist es ratsam, im Anschluss V3 durchzuführen, da hier der Bogen von der Umweltproblematik zum Recycling bzw. Downcycling gezogen wird. Außerdem hätte man so einen Dreischritt von der Herstellung (V1) über den Einsatz und die Problematik desselben (V2) zur Wiederverwertung (V3).

Die Aufgaben 2 und 3 sollen genau zu diesem Aspekt hinführen. Zunächst geht es darum die Eigenschaften zu untersuchen und mit der Verwendung zu verknüpfen (vgl. Lehrplan [11]) sowie anschließend die Umweltproblematik zu beurteilen.





V3 Recycling? Äquilibrierungsreaktionen mit Silikonen

Beobachtungen:

In Folge der Äquilibrierungsreaktion, welche durch die Lehrkraft durchgeführt wurde, entsteht aus einem Silikon ein Silikonöl, was sich anhand seiner physikalischen Beschaffenheit klar vom vorher eingesetzten Silikon unterscheidet. Der beschichtete Baumwollstoff hat sich außerdem entfärbt. In den hier aufgeführten Abbildungen sieht man den Arbeitsschritt der Zerkleinerung des Silikondichtstoffs sowie das Entfernen der Beschichtung (vorher – nachher).



Auswertung:

Aufgabe 1:

Hier war nur die Beobachtung des Lehrerdemonstrationsexperiments sowie das Notieren der erfassten Beobachtungen (s. o.) gefragt.

Aufgabe 2:

Die Äquilibrierungsreaktion läuft nach der in der Infobox dargestellten Reaktionsgleichung ab, so dass sich aus einem Silikon ein lineares (1. Schritt) sowie ein cyclisches Siloxan (2. Schritt) bildet. Die Kalilauge katalysiert die Reaktion und wird wieder zurückgewonnen. Es handelt sich um eine Gleichgewichtsreaktion. Mithilfe der vorgegebenen Definitionen von Re- und Downcycling lässt sich schnell auf eine Downcycling-Reaktion schließen, da der Ausgangsstoff nicht zurückgewonnen werden konnte, sondern nur andere – geringerwertige – Produkte bei der Reaktion entstehen. [5, 10]

Aufgabe 3:

Durch die Einbeziehung aller drei Teilversuche ist ersichtlich, dass Silikone aufgrund ihrer großen chemischen und physikalischen Beständigkeit (vgl. V2) eine große Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten im Alltag besitzen (vgl. V1). Diese Beständigkeit ist jedoch gleichzeitig – vor allem aus

⁷ vgl. Hoßfeld, V.: „Intelligente Knete“ für einen nachhaltigen Chemieunterricht.

⁸ vgl. ebd.



umweltchemischer Sicht – ein Problem, da sich Silikone nur unter hohem Aufwand mittels Downcycling zurückgewinnen lassen (vgl. V3). Dabei entsteht sogar nur ein Silikonöl, welches anschließend noch gereinigt werden müsste, um erneut verarbeitet werden zu können. Des Weiteren wird als Ausgangsstoff (Lösungsmittel) u. A. Toluol eingesetzt, was aus Erdöl gewonnen wird und die Umweltbilanz weiter verschlechtert.

Didaktischer Kommentar:

Lernziele:

Als Hauptlernziel dieses Versuches kann die Bewertung der Vor- und Nachteile des Einsatzes von Silikon im alltäglichen Gebrauch angesehen werden. Mithilfe der Versuche V1 und V2 sowie den Beobachtungen und den vermittelten theoretischen Grundlagen aus V3 soll der Schüler in der Lage sein, eine Verknüpfung zwischen physikalischen & chemischen Eigenschaften, der Verwendung im Alltag sowie der entstehenden Umweltproblematik herzustellen. Die Schüler sollen zusätzlich in der Lage sein, diese drei Aspekte durch fachlich gestützte Argumente zu diskutieren und letztendlich eine Einschätzung über die Silikone – insbesondere mit Fokus auf die entstehende Umweltproblematik – geben zu können. Die Diskussion von Vor- und Nachteilen des Kunststoffrecyclings sowie die Gegenüberstellung von ökonomischen und ökologischen Prinzipien desselben wird im Thüringer Lehrplan angesprochen. [11] Die hier gestellten Aufgaben greifen dies auf.

Praktisch-experimentelle Beurteilung:

Dieser Versuch ist aufgrund des komplexen Aufbaus (Verwendung eines Rückflusskühlers) sowie der verwendeten Chemikalien (festes Kaliumhydroxid) nur als Lehrerdemonstrationsexperiment vorstellbar. Gegen ein Schülerexperiment sprechen dabei nicht nur das hohe Gefahrenpotential der verwendeten Kalilauge und Toluol, sondern auch logistische Probleme: Dass eine Schule zehn oder mehr Rückflusskühler besitzt, ist sehr unwahrscheinlich. Auch die Tatsache, dass der Versuch zwingend unter einem Abzug durchgeführt werden muss, spricht gegen den Einsatz als Schülerexperiment. Auch von einem Schülerdemonstrationsexperiment ist abzuraten, da experimentell nur die Zugabe der Chemikalien als Tätigkeit durchgeführt wird und das ist nicht ungefährlich. Eine Möglichkeit zur Beteiligung der Schüler besteht darin, die Zerkleinerung des Dichtstoffes einem oder mehreren Schülern zu überlassen, was aber mehr Zeit erfordert.

Die Einschätzung genau dieser ist für diesen Versuch schwierig, da er aufgrund der anhaltenden Corona-Pandemie nicht selbst durchgeführt werden konnte. Bei einem Einsatz im Unterricht empfiehlt sich aufgrund des komplexen Aufbaus des Versuches jedoch, diese bereits vor





Unterrichtsbeginn vorzubereiten. Eine Einschätzung, wie lange der Erhitzungs- und Abkühlprozess (vgl. Arbeitsschritte 6 und 7) dauert, ist aufgrund der fehlenden praktischen Durchführung ebenfalls nicht möglich. Auch muss nach Unterrichtsende weitere Zeit zum ordnungsgemäßen Abbau der Apparatur sowie der Entsorgung der Chemikalien eingeplant werden. Für die reine Durchführung des Versuches kann man aber ca. 45-60 min als realistisch ansehen.

Verbesserungen lassen sich bei diesem Versuch schwierig ausmachen, da beispielsweise die, auch nicht ungefährlichen, Chemikalien zwingend benötigt werden.

Didaktische Beurteilung:

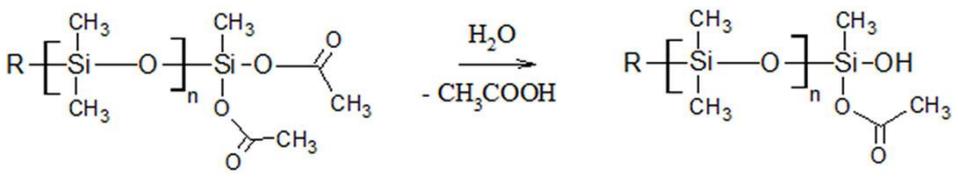
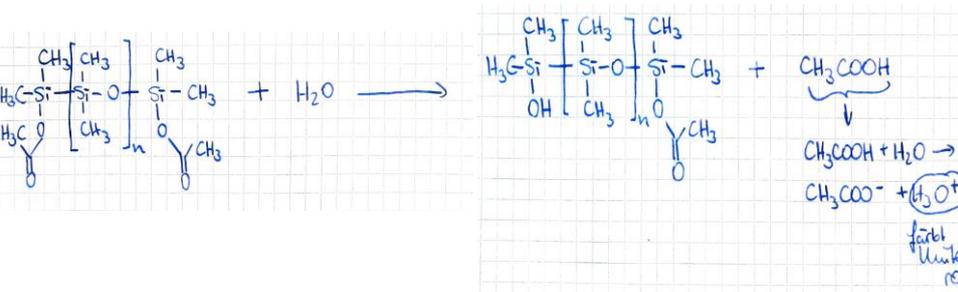
Dieser Versuch ist aufgrund der Beschaffenheit der Aufgabenstellungen klar als Erarbeitungsversuch zu charakterisieren, der sinnvollerweise im Anschluss an die Experimente V1 und V2 durchgeführt werden sollte. Dies ist durch die hohe Komplexität der Reaktion sowie dem benötigten Vorwissen zu erklären, welches insbesondere für die Aufgabe 3 des Experimentes benötigt wird. Nur durch die Verbindung der gewonnenen Erkenntnisse aus V1, V2 sowie V3 lässt sich Aufgabe 3 vollständig beantworten, sodass eine Isolierung dieses Versuches – ohne die Durchführung von V1 und V2 – als nicht zielführend eingeschätzt werden kann.

Wie oben bereits erläutert, sollte der Versuch als LDE durchgeführt werden.

Die Erweiterungs- bzw. Ersatzmöglichkeiten dieses Versuches lassen sich als stark begrenzt einschätzen, da es keine einfachere Möglichkeit gibt, den Prozess des Downcyclings darzustellen. Diese Tatsache kann jedoch von der Lehrkraft verwendet werden, um den Schülern die Umweltproblematik der Abbaubarkeit von Silikonen zu verdeutlichen. Daneben ist es möglich, aus dem enthaltenen Silikonöl tatsächlich ein neues Produkt herzustellen, z. B. sogenannte „Intelligente Knete“. So haben die Schüler etwas „in der Hand“. Dieser Prozess ist aber nochmal sehr aufwendig. [5, 10] Daneben ließen sich bei der Beantwortung der 3. Aufgabe anstelle der Infobox auch das Internet oder andere Rechercheoptionen nutzen, sodass dieses gleich mit geübt werden kann. Auch hier ist der Material- und Zeitaufwand zu berücksichtigen.

Die Aufgaben 2 und 3 dienen als Erklär- und Transferaufgaben.

Verwendete chemische Gleichungen

Chemische Gleichung	Nummer	Quelle
<p>Polykondensation I:</p> 	(1)	[7]
<p>Polykondensation II:</p> 	(2)	[12]
<p>Auflösung von Marmor:</p> $\text{CaCO}_3 + 2 \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	(3)	entfällt

IV. Referenzen

- [1] Mark, J., Allcock, H., West, R. (1992). Inorganic Polymers, Prentice Hall, New Jersey, zu finden auf: <http://www.chem.tu-freiberg.de/~boehme/materialien/polymere/polymere.html> [zuletzt geöffnet am: 23.02.2021].
- [2] Böhme, U. (2001). Polyphosphazene. Chemie TU Freiberg (URL: <http://www.chem.tu-freiberg.de/~boehme/materialien/polymere/phosphazene.html> [zuletzt geöffnet am: 23.02.2021]).
- [3] Böhme, U. (2001). Polysilane. Chemie TU Freiberg (URL: <http://www.chem.tu-freiberg.de/~boehme/materialien/polymere/polysilane.html> [zuletzt geöffnet am: 23.02.2021]).
- [4] Böhme, U. (2001). Polysiloxane, Silikone. Chemie TU Freiberg (URL: <http://www.chem.tu-freiberg.de/~boehme/materialien/polymere/silikone.html> [zuletzt geöffnet am: 23.02.2021]).
- [5] Hoßfeld, V., Lühken, A. (2016). „Intelligente Knete“ für einen nachhaltigen Chemieunterricht. PDF Poster Uni Frankfurt (URL: https://www.uni-frankfurt.de/63181096/Hossfeld_Poster_2016.pdf [zuletzt geöffnet am 23.02.2021]).
- [6] Seiffert, S., Kummerlöwe, C., Vennemann, N. (Hrsg.) 2020. Lechner, Gehrke, Nordmeier – Makromolekulare Chemie – Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker, Berlin, S. 275.

- [7] Hoßfeld, V., Lühken, A. (2015). Einfache Polymerchemie im Badezimmer – Experimentelle Untersuchung der Polykondensation an Silicondichtstoffen. CHEMKON 22 Nr. 1, S. 37-39.
- [8] Wittmann, J. (2017). Silikone – Stars der Kosmetik - Mauerblümchen der Rezeptur? Deutsche Apotheker-Zeitung (URL: <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2017/daz-12-2017/silikone> [zuletzt geöffnet am 23.02.2021]).
- [9] o. A. (o. J.). Silikone – die aus Sand gemachten Kunststoffe. Reichelt Chemietechnik Online (URL: <https://www.rct-online.de/magazin/silikone-kunststoffe/> [zuletzt geöffnet am: 23.02.2021]).
- [10] Hoßfeld, V. (2016). Siliciumverbindungen im Chemieunterricht – Entwicklung und Erprobung von alltagsorientierten, experimentellen Zugängen, Frankfurt am Main, S. 109-113.
- [11] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife – Chemie, S. 42-43.
- [12] abgewandelt nach Hoßfeld, V., Lühken, A. (2015). Einfache Polymerchemie im Badezimmer – Experimentelle Untersuchung der Polykondensation an Silicondichtstoffen. CHEMKON 22 Nr. 1, S. 37-39 und nach Knott, W., Dudzik, H., Henning, F. (2020). Lineare Polydimethyl Siloxon-Polyoxyalkylen-Blockcopolymere des Strukturtyps ABA. Europäische Patentanmeldung Patentblatt 2020/08 (EP 3 611 216 A1), S. 6.
- [13] Lambrecht, J., Wolf, H., Gerlach, E. (o. J.). Chemische Eigenschaften von Siliconelastomeren. Uni Frankfurt PDF (URL: https://www.uni-frankfurt.de/61049683/chemische_eigenschaften_siliconelastomere.pdf, [zuletzt geöffnet am 23.02.2021]), S. 7-10.
- [14] Rücker, C., Kümmerer, K.: Environmental Chemistry of Organosiloxanes (2015). Chemical Reviews Bd. 115, Nr. 1, S. 466-524.

Quellenverzeichnis der Abbildungen

Hinweis: Die Abbildungsnachweise für Bilder, die in den Versuchsbeschreibungen vorkommen (vgl. II. Schülermaterial) sind direkt dort und nicht als Fußnote und hier im Verzeichnis aufgeführt.

- Böhme, U.: Allgemeine Strukturformel der Silikone, <http://www.chem.tu-freiberg.de/~boehme/materialien/polymere/silikone.html> [zuletzt geöffnet am 23.02.2021]
- Hoßfeld F.: „Intelligente Knete“ für einen nachhaltigen Chemieunterricht, https://www.uni-frankfurt.de/63181096/Hossfeld_Poster_2016.pdf [zuletzt geöffnet am 23.02.2021]).
- Hoßfeld F.: Einfache Polymerchemie im Badezimmer, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ckon.201410239> [zuletzt geöffnet am 23.02.2021].
- Wittmann, J.: lineare oder cyclische Siloxane, <https://www.deutsche-apotheker-zeitung.de/daz-az/2017/daz-12-2017/silikone> [zuletzt geöffnet am 23.02.2021].

4. Naturkautschuk (Christabel Samira Dietz, Emilie Lou Dittmar, Milena Gese, Adriana Riedel)

I. Sachinformation

1. Naturkautschuk

Naturkautschuk gehört aufgrund seiner Polymerketten aus Isopren-Einheiten (2-Methyl-1,3-butadien) (siehe Abbildung 1) zu den Makromolekülen, Elastomeren und Polyterpenen [1]. Die Isopren-Einheiten sind durch cis-1,4-Verbindungen miteinander verknüpft [1]. Aufgrund dieser Struktur besitzt Naturkautschuk einige spezifische chemische Eigenschaften. So ist Naturkautschuk lipophil, thermoplastisch und wird bei Kontakt mit Sonnenlicht (UV-Strahlung) als Elastomer spröde und kann sich auflösen [2]. Das im Makromolekül enthaltene Protein kann gegebenenfalls eine Latex-Allergie auslösen. Außerdem ist die vulkanisierte Form des Naturkautschuks bei hohen Temperaturen viskoelastisch und bei tiefen Temperaturen elastisch [2]. Die vulkanisierte Form des Naturkautschuks wird auch als Gummi bezeichnet [2].

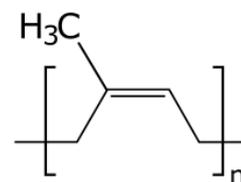


Abbildung 4: Struktur des Naturkautschuks

Kautschuk wird in großen Mengen aus dem Kautschukbaum gewonnen. Der Baum gehört zu den Wolfsmilchgewächsen und ist einer der wichtigsten Naturkautschuklieferanten [1]. *Hevea Brasiliens* ist im sogenannten Kautschukgürtel innerhalb 15° nördlicher Breite bis 15° südlicher Breite vorzufinden [1]. Auch heimische Pflanzen, wie beispielsweise Gänsedistel, Löwenzahn oder Mohn besitzen Latexmilch, welche zur Gewinnung von Naturkautschuk im experimentellen Maßstab verwendet werden kann [1]. So setzt der Autoreifenhersteller Continental auf Gummigewinnung durch Löwenzahn. Löwenzahn kann regional auch in Deutschland angebaut werden und ist kostengünstiger als der Kautschukbaum [3].

Die Latexmilch kann durch Anritzen der Milchröhren des Kautschukbaums gewonnen werden. Der Schnitt wird von links oben nach rechts unten am Stamm des Kautschukbaumes durchgeführt [1]. In Bezug auf die Umwelt gestaltet sich der Anbau der Kautschukbäume als problematisch. Häufig wird der Baum in Monokulturen angepflanzt. Durch die Verwendung von Pestiziden und der Rodung größerer Regenwaldflächen, nimmt die Gewinnung des Naturkautschuks Menschen die Lebensgrundlage und bedroht die Artenvielfalt [3]. Bereits 13 Millionen Hektar Fläche auf der Erde sollen durch Gummipflanzen bepflanzt worden sein [3]. Naturkautschuk wird vorwiegend in Asien oder Indonesien angebaut und muss nach Deutschland importiert werden. Der Transport wirkt sich ebenfalls auf die Umwelt aus und verschlechtert die Ökobilanz der Naturkautschukgewinnung [3].

2. Autoreifen

2.1 Aufarbeitung des Naturkautschuks

Die Aufarbeitung des Naturkautschuks erfolgt einerseits durch Koagulation der Latexmilch. Durch den Zusatz von Ameisensäure ($HCOOH$) zur Latexmilch erfolgt ein Umsatz zu schwammartigen Kautschukmatten und Gelen [4].

In den meisten Fällen erfolgt die Kautschukaufarbeitung jedoch durch die Vulkanisation. Diese bezeichnet ein Verfahren, bei welchem thermoplastischer Naturkautschuk in einen elastomeren Kunststoff (Gummi) überführt wird [5].

Auf dem klassischen Weg wird durch Zugabe von Schwefel vulkanisiert. Hierbei wird die Struktur des Naturkautschuks verändert, so dass ein Elastomer entsteht [6]. Dabei werden zwischen den Isopren-Ketten des Naturkautschuks Schwefelbrücken ausgebildet (siehe Abbildung 2).

Hierzu wird eine Mischung aus Rohkautschuk und Schwefel sowie schwefelhaltigen Stoffen erhitzt. Außerdem werden Zusatzstoffe wie Beschleuniger zum Herabsetzen der Vulkanisationstemperatur, Aktivatoren zur Unterstützung der Beschleuniger, Antioxidantien zum Alterungsschutz und Füllstoffe zur Volumenab-

nahme sowie Weichmacher hinzugegeben, um die allgemeinen Bedingungen der Reaktion und deren Geschwindigkeit zu verbessern [7].

Die Vulkanisation erfolgt bei Temperaturen zwischen 120 °C und 160 °C, damit es zum Aufbruch der Doppelbindungen kommen kann. Nach der Zugabe von etwa 1,8 bis 2,5 Prozent Schwefel entsteht unter Bildung von Schwefelbrücken Gummi. Hierbei bestimmt die zugegebene Schwefelmenge die Eigenschaften des Gummis. Je mehr Schwefelbrücken ein Gummi besitzt, desto härter ist er. Die ursprünglichen, plastischen Eigenschaften gehen hierbei nach und nach verloren [8]. Man kann die Schwefelmenge, welche für die entsprechende Gummiart benötigt wird, prozentual zur Gesamtmasse angeben (siehe Abbildung 3).

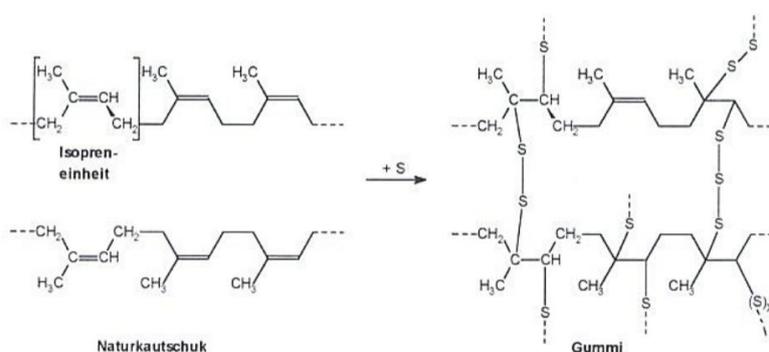


Abbildung 5: Reaktion des Naturkautschuks mit Schwefel unter Ausbildung von Schwefelbrücken

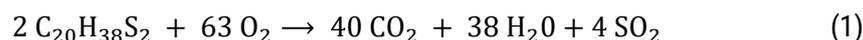
Schwefelmenge (Gew. in %)	Gummiart
2-3	Weichgummi
5-15	lederartig bzw. unbrauchbar
30-50	Hartgummi

Abbildung 6: Gummiarten und benötigte Schwefelanteile

2.2 Recycling von Autoreifen

Autoreifen zählen zu den wichtigsten Produkten, die durch die Aufarbeitung des Naturkautschuks gewonnen werden können. Diese Verwendung des Naturkautschuks bringt ungemeine Vorteile und ein breites Anwendungsspektrum mit sich. Das Recycling der Autoreifen birgt jedoch im Hinblick auf die Folgen für die Umwelt einige Schwierigkeiten. Jeder Autoreifen hat entsprechend des Verwendungszweckes und der Hersteller unterschiedliche Zusammensetzungen. Dies kann für das Recycling jedoch zum Problem werden, da hierbei das Prinzip der Sortenreinheit oberste Priorität hat [9]. Daher wird aktuell ein großer Teil der jährlich anfallenden 1,8 Milliarden Altreifen verbrannt und lediglich energetisch weiterverwertet [9]. Dies bringt die angesprochene Umweltproblematik mit sich, da die Verbrennungsprodukte in die Umwelt gelangen. Neben der Verbrennung gibt es allerdings noch weitere Recyclingmethoden, die zum Teil viel umweltfreundlicher sind. So können die Altreifen geschreddert und als Boden- und Fallschutzmatten beispielsweise in der Autoindustrie oder als Kunstrasen-Granulat verwendet werden [9]. Die Weiterverwertung der Altreifen kann generell in zwei Formen unterteilt werden. Es gibt zum einen die artgerechte Verwendung, bei welcher die Altreifen erneuert und in ihre ursprüngliche Verwendung zurückgeführt werden [10]. Zum anderen gibt es die artfremde Verwendung, bei welcher die Reifen einen gänzlich neuen Zweck erfüllen. So werden sie beispielsweise auf Spielplätzen oder als Prallschutz in der Schifffahrt verwendet [10]. Neben der Weiterverwertung der Altreifen können diese auch chemisch recycelt werden.

Zwei weitere Recyclingalternativen stellen hierbei die Herstellung von Druckerschwärze und die Herstellung von Gips aus eben diesen Altreifen dar [10]. Dabei basieren beide Methoden auf der Verbrennung von Altreifen. Dabei entstehen bei der Verbrennung des Reifens neben diversen Kohlenwasserstoffen auch Schwefeloxide und das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2), wie in Gleichung (1) zu sehen ist. [11]



Die beschriebenen Methoden des chemischen Recyclings machen sich hierbei die bei der Verbrennung entstehenden Gase zu Nutze. Die Verbrennungsprodukte werden aufgefangen und in unterschiedlichen chemischen Reaktionen umgesetzt. Dadurch findet eine Aufreinigung der Verbrennungsgase statt, womit nicht alle Schadstoffe in die Umwelt gelangen.

II. Schülermaterial

Thema: Naturkautschuk

Versuch 1: Doppelbindungsnachweis im Naturkautschuk

Bei diesem Versuch wird auf die Struktur des Naturkautschuks eingegangen, mit dem Ziel, dass die SuS die Doppelbindung als Teil der Struktur positiv nachweisen können. Hierbei wird mit dem Baeyer-Reagenz gearbeitet, welches angemischt und zu dem Kautschuk gegeben werden muss. Dabei kann der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt werden.

Versuch 2: Vulkanisation von Naturkautschuk

Das Ziel des Versuches ist, dass die SuS die Veränderungen von Naturkautschuk zu Gummi anhand des Struktur-Eigenschafts-Konzepts beschreiben und anschließend Verwendungsmöglichkeiten von Gummi ableiten können. Der Versuch kann als Schülerexperiment durchgeführt werden, sodass die SuS eine Methode zur Herstellung von Gummi nachvollziehen können. Beispielsweise kann durch die Zugabe von Tensiden, Zinkoxid, 2-Mercaptobenzothiazol (MBT) und Schwefel aus Latexmilch Gummi hergestellt werden.

Versuch 3: Recycling von Autoreifen – Druckerschwärze selbst herstellen

Die SuS lernen bei diesem Versuch eine Form des Altreifenrecyclings durchzuführen und diese Recyclingmethode in Bezug auf andere Methoden der Altreifenverwertung zu bewerten. Dabei sollen die SuS die Verbrennung eines Altreifenstücks selbstständig durchführen und den bei der Verbrennung erhaltenen Ruß weiter verwerten. Hierbei soll aus dem Ruß Druckerschwärze hergestellt werden. Die SuS lernen somit eine Methode kennen, die Reaktionsprodukte weiter zu verwerten und die Umwelt vor unnötiger Schadstoffbelastung zu schützen. Der Versuch kann als Schülerexperiment durchgeführt werden.

Versuch 4: Recycling alter Autoreifen – Herstellung von Gips

Die SuS lernen bei dem Experiment eine weitere Form des Altreifenrecyclings kennen, führen diese selber durch und beurteilen dabei die Umweltrelevanz dieser Methode.

Dabei wird der Werkstoff Gips hergestellt. Dieser Versuch kann sowohl als Schülerdemonstrationsexperiment als auch als Lehrerdemonstrationsexperiment durchgeführt werden.





V1 Doppelbindungsnachweis im Naturkautschuk

Informationen

Einleitung

Naturkautschuk wird aus der Latexmilch des Gummibaums gewonnen. Dieses Polymer ist aus Isopren-Einheiten aufgebaut, welche linear miteinander verknüpft sind. Eine strukturelle Besonderheit stellt die Doppelbindung in den Isopren-Einheiten dar. Diese Doppelbindung kann mit Hilfe des Baeyer-Reagenz nachgewiesen werden.

Aufgabenstellung

1. Führen Sie den Versuch durch und notieren Sie ihre Beobachtungen!
2. In der ablaufenden Reaktion reagieren die Kohlenstoffatome, welche die Doppelbindung bilden, mit den Permanganat-Ionen. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für diesen Schritt und benennen Sie die Art der ablaufenden Reaktion! Begründen Sie Ihre Entscheidung!
3. Erklären Sie, warum Permanganat als Nachweismittel für Doppelbindungen genutzt wird! Wie können Sie sich die dunkle Färbung erklären?

Das Experiment

Materialien

- 1 Waage
- 2 Bechergläser (100 ml)
- 1 Reagenzglas
- 1 Reagenzglasständer
- 1 Pipette

Chemikalien

- 5 g Rohkautschuk
- 0,1 g Kaliumpermanganat ($KMnO_4$)
- 10 g Natriumcarbonat ($CaCO_3$)
- 200 ml destilliertes Wasser
(hergestellte Lösungen für die ganze Klasse)

Durchführung

1. Stellen Sie zunächst das Baeyer-Reagenz her. Stellen Sie dazu in einem der beiden Bechergläser aus 10 g Natriumcarbonat und 100 ml destilliertem Wasser eine Natriumcarbonat-Lösung her.
2. Im anderen Becherglas stellen Sie aus 0,1 g Kaliumpermanganat und 100 ml destilliertem Wasser eine Kaliumpermanganat-Lösung her. Achtung im Umgang mit Kaliumpermanganat geben!
3. Geben Sie nun 5 g Kautschuk in das Reagenzglas.
4. Geben Sie mit der Pipette 2 ml Natriumcarbonat-Lösung und 2 ml Kaliumpermanganat-Lösung in das Reagenzglas.
5. Entsorgung: Der Kautschuk-Rest wird in den anorganischen Feststoffen und die restliche Lösung im Abfallbehälter für Schwermetalle entsorgt.



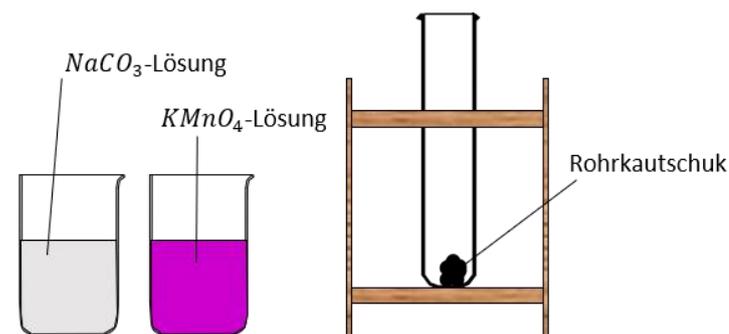


Abbildung 7: Versuchsskizze V1

Hinweise

Farbe der Lösungen von löslichen Mangan-Salzen

Oxidationsstufe Mangan	+2	+3	+4	+5	+6	+7
Farbe der Lösung	rosa	rot	braun	blau	grün	violett



V2 Vulkanisation von Naturkautschuk

Informationen

Einleitung

Naturkautschuk besteht aus langen, gegeneinander verschiebbaren Ketten von Isopren-Einheiten. Aufgrund der Van-der-Waals Kräfte in den Polymerketten und der Doppelbindung ist Naturkautschuk aber auch sehr klebrig sowie temperaturempfindlich. Der Geruch kann ebenfalls als störend empfunden werden. Diese Eigenschaften erweisen sich im Alltag häufig als unvorteilhaft (zum Beispiel ein klebriger, kälteempfindlicher Regenmantel). Lassen sich durch Vulkanisation die Struktur und Eigenschaften des Naturkautschuks zu unseren Vorteilen verändern?

Aufgabenstellung

- Führen Sie den Versuch durch und untersuchen Sie die Eigenschaften des Ausgangsstoffes und Endproduktes!**
- Vergleichen Sie die Strukturen und Eigenschaften des Latex mit denen des vulkanisierten Produkts! Beachten Sie das Struktur-Eigenschafts-Konzept!**
- Leiten Sie Verwendungsmöglichkeiten für das entstehende Produkt ab! Stellen Sie Vermutungen auf, um welchen Stoff es sich handelt!**

Das Experiment

Materialien

- 1 Becherglas (50 ml), enge Form
- Mörser mit Pistill
- Petrischale aus Glas
- Magnetrührer
- Pipetten

Chemikalien

- 3 g Schwefel
- 20 ml Latexmilch
- 3-4 Tropfen Tensid Fairy Ultra
- 0,5 g MBT (2-Mercaptobenzothiazol)
- 0,3 g Zinkoxid
- destilliertes Wasser

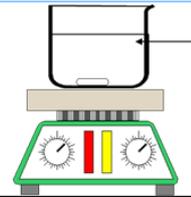
Durchführung

- Zerreiben Sie 3 g Schwefel fein im Mörser.
Geben Sie in den Mörser 0,5 g MBT, 0,3 g Zinkoxid, 3-4 Tropfen Tensid und destilliertes Wasser. Verreiben Sie die Mischung gründlich bis eine homogene, zähflüssige Masse entsteht.
- Füllen Sie die zähflüssige Masse in ein Becherglas. Geben Sie anschließend unter vorsichtigem Rühren mit Hilfe des Magnetrührers 20 ml Latexmilch hinzu. Lassen Sie die Mischung 5 min ruhen.
- Geben Sie die Mischung anschließend in eine Petrischale, bis der Boden bedeckt ist. Trocknen Sie anschließend die Mischung im Trockenschrank für 2 h bei 80 °C.





4. Nachdem der Wasseranteil verdunstet ist, wird noch einmal für 30 min bei 130 °C im Trockenschrank getrocknet (Vulkanisation).
5. Entsorgung: Der entstandene Kautschuk kann in den anorganischen Feststoffen entsorgt werden.



Mischung aus MBT, Zinkoxid, Tensid, destilliertem Wasser und Latex

Abbildung 8: Versuchsskizze V2

Hinweise

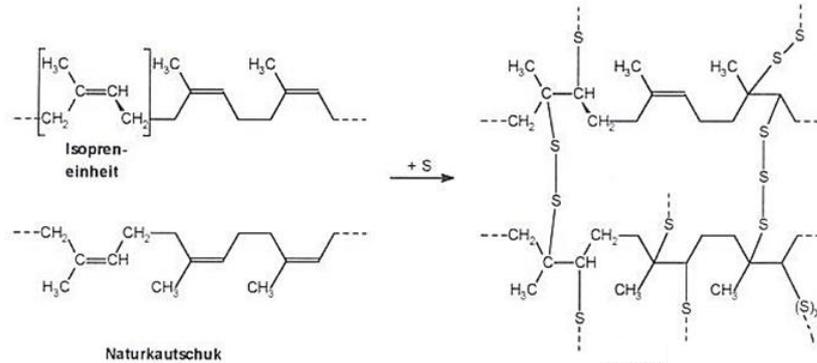


Abbildung 9: Vergleich der Struktur von Naturkautschuk und ?



V3 Recycling von Autoreifen – Druckerschwärze selbst herstellen

Informationen

Einleitung

Jedes Jahr müssen ungefähr 50 Mio. Altreifen entsorgt werden. Die am weitesten verbreitete Recyclingmethode ist die Verbrennung dieser Altreifen. Dabei werden aufgrund der vorangegangenen Bearbeitung des Gummis Unmengen an Ruß, aromatischen Kohlenwasserstoffen und hoch toxischen Gasen freigesetzt. Da diese Stoffe in großen Mengen sehr schädlich für die Umwelt sind, wird nach anderen Recyclingmethoden bzw. Möglichkeiten für Altreifen gesucht, die anfallenden Reaktionsprodukte weiterzuverwenden.

Aufgabenstellung

1. Führen Sie den Versuch durch und notieren Sie ihre Beobachtungen!
2. Nennen Sie das Reaktionsprodukt, welches bei der Verbrennung von Altreifen entsteht. Erklären Sie, warum sich dieses Reaktionsprodukt für die Herstellung von Druckerschwärze eignet!
3. Bewerten sie diese Form des Altreifenrecyclings im Hinblick auf andere Möglichkeiten des Recyclings von Altreifen! Verwenden sie dafür das unten gegebene Material.

Das Experiment

Materialien

- Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtnetz
- 2 Abdampfschalen
- Glasscheibe (ca. 20x20 cm²)
- Gummi-Schaber
- Pistill
- Petrischale
- Spatel Heizplatte
- Waage
- Sicherheitshandschuhe

Chemikalien

- Altreifenstück (Würfel von 2-3 cm Kantenlänge)
- Kolophonium
- Paraffinöl

Durchführung

1. Geben Sie ein Gummistück des Altreifens in die Abdampfschale auf dem Dreifuß und entzünden Sie es mit dem Brenner. Die Verbrennung muss unter dem Abzug erfolgen.
2. Halten Sie die Glasscheibe über das brennende Gummistück, um das entstehende Reaktionsprodukt aufzufangen.
3. Ist eine deutliche Schicht des Reaktionsproduktes auf der Scheibe zu erkennen, kann dieses mit dem Gummi-Schaber entfernt und in eine Petrischale gegeben werden.

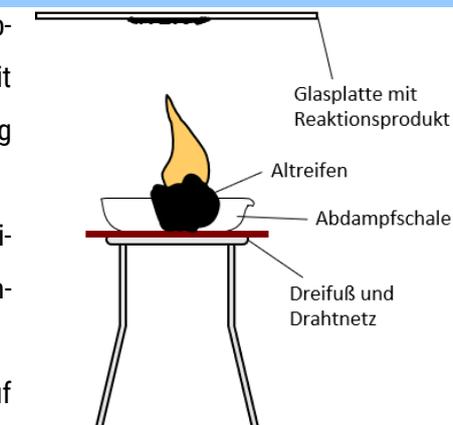
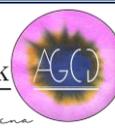


Abbildung 10: Versuchsskizze V3 Teil 1





4. Es werden nun Kolophonium, Paraffinöl und Reaktionsprodukt im Massenverhältnis 8:5:3 benötigt. Wiegen Sie die entsprechenden Mengen Kolophonium und Paraffinöl ab und geben Sie diese in das Becherglas. Die benötigten Massen für das Kolophonium und Paraffinöl erhalten Sie, indem sie das eben erhaltene Reaktionsprodukt einwiegen. Aus dieser Masse des Reaktionsproduktes können mit Hilfe des gegebenen Massenverhältnisses die Massen von Kolophonium und Paraffinöl bestimmt werden.
5. Erhitzen Sie die Kolophonium-Paraffinöl-Mischung in der Abdampfschale auf der Heizplatte auf ca. 80°C. Geben Sie nach und nach das Reaktionsprodukt in kleinen Mengen mit dem Spatel hinzu und stellen Sie durch Verreiben mit dem Pistill eine Schmelze her. Ziehen Sie dazu entsprechende Sicherheitshandschuhe an!
6. Nach dem Erkalten der Schmelze können Sie die hergestellte Druckerschwärze durch Abnehmen ihrer Fingerabdrücke testen.
7. Entsorgung: Die entstandene Druckerschwärze kann ohne Bedenken im Restmüll entsorgt werden.

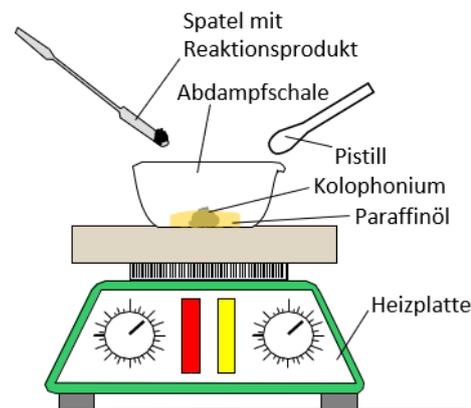


Abbildung 11: Versuchsskizze V3 Teil 2

Hinweise

Möglichkeiten des Altreifenrecyclings

Neben der weitverbreiteten Methode der Verbrennung von Altreifen stehen noch weitere Möglichkeiten des Altreifenrecyclings zur Verfügung. Dabei können die Altreifen werkstofflich, thermisch oder chemisch verwertet werden. Dazu wird zuerst die werkstoffliche Verwertung von Altreifen betrachtet.

Zunächst kann das Verfahren einer **Reifenrunderneuerung** als **artgerechte Verwendung** angewendet werden. Hierbei werden die Altreifen, soweit dies möglich ist, repariert und weiter als Reifen in diesem Sinne verwendet. Sind die Autoreifen so beschädigt, dass sie auch mit einer Reperatur nicht wieder ihre eigentliche Aufgabe erfüllen können, wird eine **artfremde Verwendung** in Betracht gezogen. Hierbei werden die Altreifen beispielsweise auf Spielplätzen, in der Landwirtschaft zur Beschwerung von Futterabdeckungen oder als Prallschutz für Schiffe verwendet.

Ist eine oben beschriebene Verwendung aufgrund der Beschädigung der Reifen nicht mehr möglich, kommt nur noch eine thermische oder chemische Verwertung in Frage.

Bei einem **thermischen (energetischen) Recycling** wird eine Verbrennung der Altreifen wie im obigen Versuch durchgeführt. Im Unterschied zum Versuch oben wird die bei der Verbrennung frei werdende Energie umgeleitet und für andere chemische Prozesse verwendet. Wird dieses Verfahren in der





chemischen Industrie beispielsweise in der Zementindustrie angewendet, kann das thermische Recycling von Altreifen als Energiequelle genutzt werden. Bei einer solchen Anwendung sollte jedoch auf eine ausreichende Abgasreinigung geachtet werden, da sonst Ruße, aromatische Kohlenwasserstoffe und andere toxische Substanzen in großen Mengen in die Umwelt gelangen.

Anschließend besteht die Möglichkeit eines **chemischen Recyclings** für Altreifen. Bei dieser Form der Altreifenverwertung werden die Reifen in ihre Bestandteile zerlegt. Diese einzelnen Bestandteile können dann in anderen chemischen Synthesen eingesetzt werden. So kann beispielsweise durch Kühlung mit flüssigem Stickstoff das Gummi der Altreifen spröde gemacht werden und so von den restlichen Bestandteilen des Altreifens getrennt werden. Das feingemahlene Gummi kann beispielsweise zur Herstellung von Gummimatten oder Bodenbelägen genutzt werden. [10] [12]





V4 Recycling alter Autoreifen – Herstellung von Gips

Informationen

Einleitung

Gips gilt als einer der wichtigsten Werkstoffe in der Zement- bzw. Bauindustrie. Dabei wird Gips eingesetzt, um die Erstarrungszeit des Zements zu regulieren. Für die Gipsherstellung kann ein Abfallprodukt verwendet werden, welches bei der Verbrennung von Altreifen entsteht. Im Verlauf der Herstellung werden dem Reifengummi unzählige Stoffe zugegeben, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Diese Stoffe werden bei der Verbrennung der Altreifen freigesetzt und schädigen die Umwelt in hohem Maß.

Aufgabenstellung

- Führen Sie den Versuch durch und notieren Sie ihre Beobachtungen!**
- Stellen Sie die Reaktionsgleichung der in der Waschflasche ablaufenden Reaktion auf und benennen Sie die Edukte und Produkte dieser Reaktion!**
- Beurteilen Sie die Vorteile dieser Form des Altreifenrecyclings für die Umwelt!**

Das Experiment

Materialien

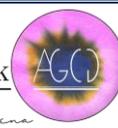
- | | |
|---------------------------|----------------|
| ➤ Stativmaterial | ➤ Trockenrohr |
| ➤ Schläuche, Glasröhrchen | ➤ Spatel |
| ➤ 2 Stopfen | ➤ Messzylinder |
| ➤ Verbrennungsrohr | ➤ Brenner |
| ➤ Luftpumpe | ➤ Waage |
| ➤ Waschflasche | |

Chemikalien

- Altreifenstück
- 0,25 g Calciumcarbonat ($CaCO_3$)
- Iod-Kaliumiodid-Papier
- 20 ml Wasserstoffperoxid (H_2O_2)
(10 %ige Wasserstoffperoxid-Lösung)

Durchführung

- Geben Sie mit dem Spatel kleine Raspeln des Altreifengummis in das Verbrennungsrohr und bauen Sie die Versuchsanordnung entsprechend der Versuchsskizze auf.
- Im Verbrennungsrohr wird an einem Ende ein Stück angefeuchtetes Iod-Kaliumiodid-Papier platziert und diese Seite anschließend mit einem passenden Stopfen mit Loch verschlossen.
- An der anderen Seite des Verbrennungsrohrs wird eine Luftpumpe angebracht und über einen Stopfen mit passendem Glasröhrchen und Schläuchen verbunden.
- Geben Sie 0,25 g Calciumcarbonat und 20 ml Wasserstoffperoxid in die Waschflasche und schwenken Sie diese.
- Die Waschflasche wird über einen Stopfen mit einem Glasröhrchen und einem Schlauch mit dem Verbrennungsrohr verbunden.





6. An der anderen Seite der Waschflasche wird ein Trockenrohr angebracht, welches ein Stück angefeuchtetes Iod-Kaliumiodid-Papier enthält.
7. Entzünden Sie nun das Reifengummi im Verbrennungsrohr und betätigen Sie die Luftpumpe, um die Verbrennungsprodukte in die Waschflasche zu leiten.
8. Entsorgung: Alle Lösungen werden in den in den wässrigen anorganischen Abfällen und alle übrigen Feststoffe (Unitest-Papier, Verbrennungsrückstände, ...) in den anorganischen Feststoffen entsorgt.

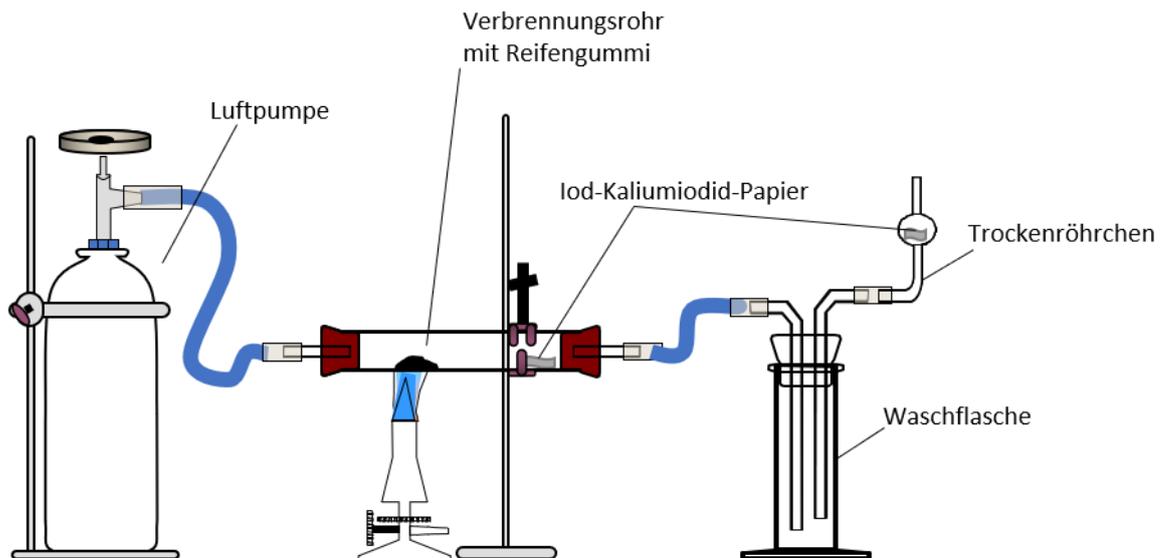


Abbildung 12: Versuchsskizze V4

III. Didaktische Hinweise

Das Thema Naturkautschuk als Makromolekül hat in der (technischen) Chemie eine große Bedeutung, insbesondere die Vulkanisation des Naturkautschuks zu Gummi, welche eine Vielfalt an Verwendungsmöglichkeiten bietet. Jedoch lässt sich Gummi nicht einfach entsorgen oder recyceln. Außerdem schädigen die Gewinnung von Kautschuk beispielsweise durch den Anbau in Monokulturen oder die Lagerung und Entsorgung der Altreifen die Umwelt massiv. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Betrachtung des Themas (aus umweltchemischer und technischer Sicht), eignet sich der Naturkautschuk auch als Themenbehandlung im Unterricht.

In Klassenstufe 9/10 setzen sich die SuS intensiver mit der organischen Chemie auseinander. Der Lehrplan fordert in den Sach- und Methodenkompetenzen, dass SuS beispielsweise im Schülerexperiment Mehrfachbindungen nachweisen können (V1), sowie Recycling-Methoden erläutern können [13]. Ebenfalls sollen die SuS hinsichtlich der Selbst- und Sozialkompetenz in der Lage sein, Eingriffe des Menschen in die Natur sachgerecht zu bewerten [13]. Teilweise können die Versuche V1 und V3 bereits in Klassenstufe 9/10 behandelt werden. Aufgrund des höheren Anforderungsniveaus der Versuche V2 und V4 eignet sich die Behandlung des Themas eher im erhöhten Anforderungsniveau der Klassenstufe 11/12, zum Beispiel als Vorbereitung auf das Abitur. Anhand des geforderten Struktur-Eigenschafts-Konzepts in V2 können die SuS ihr Vorwissen mit neu Erlerntem verknüpfen. So wird in der Klassenstufe 11/12 im Lehrplan als Methodenkompetenz das Erfassen von Informationen aus beispielsweise Texten, das korrekte Ausführen wissenschaftlicher Tätigkeiten und das Protokollieren von Versuchen genannt [13]. Die Arbeit mit wissenschaftlichen Texten und Abbildungen wird durch die Versuche V2 und V3 in die Unterrichtseinheit eingebunden. In der Sekundarstufe II ist dem Thema Makromoleküle ein eigener Themenkomplex gewidmet. Dabei werden Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere hinsichtlich ihrer Eigenschaften und Verwendung besprochen [13]. An dieser Stelle bietet sich der Versuch V2 an, da er die Umwandlung des Thermoplasten Naturkautschuk zum Elastomer Gummi thematisiert. Des Weiteren wird im Lehrplan das Thema Kunststoffrecycling angesprochen. Um genauer zu sein sollen die drei Formen von Recycling und deren Vor- und Nachteile thematisiert werden [13]. Dieser Themenschwerpunkt wird umfangreich im Versuch V3 am Beispiel des Autoreifenrecyclings behandelt. Außerdem wird im Versuch V4 eine Methode des Altreifenrecyclings vorgestellt, die insbesondere in Bezug auf die Umweltrelevanz einige Besonderheiten aufweist (Herstellung von Gips). Auch die ökonomische und ökologische Sicht auf das Kunststoffrecycling soll laut Lehrplan nicht außer Acht gelassen werden. Schließlich verlangt der Lehrplan ein Experiment zum Thema Recycling von Kunststoffen. Hierbei stellen die Versuche V3 und V4 sehr gute Möglichkeiten für ein solches Experiment dar [13]. Autoreifen bieten sich als Aufhänger für diese Unterrichtseinheit sehr gut an, da sie sowohl die anfänglichen Punkte im Lehrplan thematisieren, das heißt strukturelle Unterschiede

zwischen Thermoplasten und Elastomeren und deren Verwendung, als auch in Bezug auf den Umwelt-Aspekt sehr viel Potential haben. Auch der Bezug zum Alltag kann durch die Problematisierung von Autoreifen im Unterricht hergestellt werden. Folgendes Hauptziel könnte für die Unterrichtseinheit(en) gesetzt werden:

Die SuS können Struktur, Eigenschaften, Gewinnung, Aufarbeitung und Verwendung von Naturkautschuk anhand des Beispiels Autoreifen beschreiben. Die folgenden Teilziele sollten in den Unterrichtseinheiten enthalten sein:

Die SuS können...

- die chemische Struktur von Naturkautschuk beschreiben.
- die Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von Naturkautschuk nennen.
- die Gewinnung und Vulkanisation von Naturkautschuk beschreiben und unter verschiedenen Umweltaspekten bewerten.
- Auswirkungen der Produktion und Verwendung von Autoreifen auf die Umwelt erklären.
- Möglichkeiten des Recyclings für Autoreifen beschreiben und aus Experimenten ableiten.

In Bezug auf die Selbst- und Sozialkompetenz können die folgenden Lernziele formuliert werden:

Die SuS können...

- entsprechende Verhaltensweisen in Bezug auf das Recycling von Altreifen ableiten.
- Sachverhalte eigenständig in Partner- bzw. Gruppenarbeit erarbeiten.
- die Ergebnisse der Versuche auf ihr alltägliches Handeln übertragen.



V1 Doppelbindungsnachweis im Naturkautschuk

Beobachtungen:

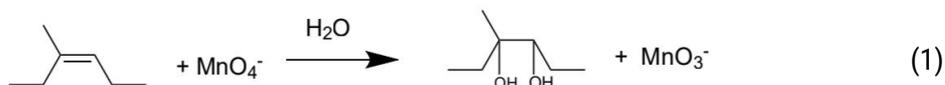
Nach Zugabe des Baeyer-Reagenz reagiert der Rohkautschuk von einer violetten zu einer immer dunkler werdenden, braun/schwarzen Substanz.

Auswertung:

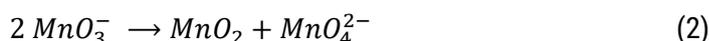
Aufgabe 2

In diesem Versuch findet eine Redoxreaktion statt. Die Kohlenstoffatome der Doppelbindung werden mit den Sauerstoffatomen des Kaliumpermanganats umgesetzt. Die Doppelbindung bricht dadurch auf und es entsteht eine Einfachbindung, wie in Gleichung (1) zu sehen ist.

Die Kohlenstoffatome werden oxidiert und das Mangan wird von Mn^{7+} zu Mn^{5+} reduziert.



Diese Mangan(V)-Verbindung ist allerdings sehr instabil, weswegen dieser Stoff in einer Disproportionierungsreaktion zu Mn^{4+} und Mn^{7+} zerfällt, was in Gleichung (2) aufgezeigt wird.



Die Mangan(IV)-Verbindung ist hierbei Braunstein (MnO_2), welches als Begründung für den Farbumschlag genutzt wird.

Aufgabe 3

Kaliumpermanganat (KMnO_4) wird hierbei als starkes Oxidationsmittel genutzt. Aus diesem Grund kann es als Nachweismittel für Doppelbindungen genutzt werden. KMnO_4 ist stark pH-Wert abhängig, weswegen die Natriumcarbonat-Lösung genutzt wird, damit die Lösung in der Lage ist, die Mangan-Ionen zu reduzieren.

Didaktischer Kommentar:

Die SuS können nach diesem Versuch die Doppelbindung in der Struktur des Naturkautschuks positiv mittels Baeyer-Reagenz nachweisen.

Für den Versuch ist eine Zeitspanne von etwa 45 Minuten vorgesehen. Es ist zu Beginn das Baeyer-Reagenz anzusetzen, welches etwas Vorbereitungszeit benötigt, da die Lösung frisch sein muss und die Permanganat-Lösung nur begrenzt haltbar ist. Ansonsten wird der Versuch recht zügig durchgeführt. Die 200 ml Lösung können für die ganze Klasse genutzt werden.

Die Thematik gehört laut Lehrplan in die 11. Klasse. Ziel ist es, einen positiven Nachweis der Doppelbindung zu erzielen.



Der Aufbau des Versuchs ist recht simpel. In einem Becherglas wird eine Kaliumpermanganat-Lösung hergestellt und in einem weiteren Becherglas eine Natriumcarbonat-Lösung. Diese beiden Komponenten werden anschließend in ein Reagenzglas gegeben, in welchem sich Naturkautschuk befindet.

Die Haupteigenschaft des Versuchs ist es, in dem vorhandenen Kautschuk die Struktur zu untersuchen und die Doppelbindung nachzuweisen.

Das Experiment kann als Schülerexperiment durchgeführt werden, da die Chemikalien, außer Kaliumpermanganat, ungefährlich sind und keine Gefahr durch entstehende Reaktionsprodukte besteht. Allerdings muss aufgepasst werden, dass die Konzentration des Kaliumpermanganats nicht zu hoch ist, da es dann gesundheitsschädlich und ätzend wirkt. Kaliumpermanganat gilt generell als gefährlich und gesundheitsschädlich, bringt jedoch keine relevanten Einschränkungen für den Gebrauch mit sich. Es kann bei falschem Umgang mit dem Stoff ätzend wirken. In gelöster Form wirkt es reizend.

Weiterhin ist die Dauer des Versuchs eher gering, weswegen die Konzentration der SuS eher nicht abnimmt. Die Durchführung ist simpel, weswegen keine großen Probleme auftreten.

Allerdings kann bei der Durchführung des Versuchs der Flüchtigkeitsfehler auftreten, dass nicht die richtige Menge an Baeyer-Reagenz verwendet wird. Wird zu wenig verwendet, ist der sichtbare Effekt nicht gegeben und die Reaktion findet abgeschwächt oder gar nicht statt. Nimmt man allerdings zu viel Baeyer-Reagenz, kann es dazu kommen, dass die Kaliumpermanganatlösung den gesamten Platz einnimmt und die Lösung lila bleibt. Andererseits kann zu lange gewartet werden und die Lösung verliert an Reaktionskraft. Wird zu wenig Natriumcarbonat-Lösung verwendet, stellt sich nicht der korrekte pH-Wert ein. Zudem muss darauf geachtet werden, die gleichen Volumina der beiden Lösungen zu dem Kautschuk zu geben.

Der Farbumschwung von lila zu braun/schwarz ist eindeutig sichtbar. Es ist ein hoher Farbkontrast zu sehen, weswegen der Versuch optisch gut erkennbar und eindeutig ist.

Der Zeitaufwand steht in einem guten Verhältnis zum Lerneffekt, welcher gut sichtbar und nachvollziehbar ist.

Um die Aufgaben korrekt lösen zu können, wird als Vorwissen das Wesen der Redoxreaktion sowie die elektrophile Addition vorausgesetzt. Diese Themen werden in Klassenstufe 10 angesprochen und im Unterricht behandelt.

Der bearbeitete Kautschuk wird getrocknet und in der Feststofftonne entsorgt. Die Reste des Baeyer-Reagenz werden mit weiterem Kautschuk oder Glukose umgesetzt und bei dem Schwermetallabfall entsorgt.



Als Alternativversuch kann für dieses Experiment Bromwasser statt des Baeyer-Reagenz verwendet werden. Dabei wird Latexmilch mit Toluol gemischt und nach Zugabe des Bromwassers kommt es zuerst zu einer braunen Verfärbung. Dieses Gemisch entfärbt sich allerdings schnell wieder. Aufgrund des vorhandenen Broms, welches sehr toxisch ist, kann dieser Alternativversuch nur als Lehrerversuch durchgeführt werden. Vom Zeitaufwand her wäre es identisch mit dem Baeyer-Reagenz, da nur die Reagenzien ausgetauscht werden können und die Durchführung und Umsetzung unverändert bleiben. Der theoretische Mechanismus wäre bei der Reaktion mit Bromwasser einfacher zu verstehen, da hierbei nur die Bromatome an die Doppelbindung addiert werden und auf weitere Nebenreaktionen, wie die Disproportionierungsreaktion, verzichtet wird.

Allerdings wird ein Versuch, welcher von SuS selber durchgeführt wird, eher im Gedächtnis bleiben und auf mehr Begeisterung treffen als ein Versuch, bei dem nur der Lehrkraft zugeschaut werden darf.

V2 Vulkanisation von Naturkautschuk

Beobachtungen:

Zunächst wurde MBT, Tensid, Schwefel, Zinkoxid und destilliertes Wasser zusammen verrieben und eine homogene zähflüssige Masse entstand.

Nach der Zugabe von Latex wurde die Mischung zum Trocknen in den Trockenschrank überführt. Nach dem Trocknungsprozess blieb eine elastische, dünne Gummischicht in der Petrischale zurück.

Auswertung:

Aufgabe 1/Aufgabe 2

Der Grundbaustein des Naturkautschuks sind Isopren-Einheiten, welche über cis-1,4-Verbindungen zu langen Ketten verknüpft sind. Diese Ketten sind gegeneinander verschiebbar und lang, weshalb Naturkautschuk zu den Makromolekülen gehört. Durch die Doppelbindungen und die Van-der-Waals-Kräfte ist der Naturkautschuk klebrig und temperaturempfindlich, da die Van-der-Waals-Kräfte zwischen unpolaren Substanzen wirken und nicht sehr stabil sind. Naturkautschuk besitzt kaum elastische Eigenschaften, sondern plastische Eigenschaften. Ursache hierfür ist, dass die langen Ketten frei gegeneinander verschiebbar sind und somit nicht in ihre Ausgangslage zurückkehren.

Bei der Vulkanisation wird Schwefel hinzugegeben. Dadurch werden die Doppelbindungen des Naturkautschuks aufgebrochen und die Ketten des Naturkautschuks durch Schwefelbrücken (Sulfidbrücken) miteinander verknüpft. Somit verliert der Naturkautschuk auch seine klebrige Eigenschaft. Aus dem Thermoplast Naturkautschuk entsteht das Elastomer Gummi. Je mehr Schwefelbrücken ausgebildet werden, desto härter wird das Gummi. Zudem verhält sich der Gummi durch die Schwefelbrücken auf Dauer elastisch (kehrt also bei mechanischer Beanspruchung in seine Ausgangslage zurück), besitzt eine höhere Reißfestigkeit im Vergleich zum Naturkautschuk und ist beständiger gegenüber Alterung und anderen thermischen und mechanischen Einflüssen. Denn die langen Ketten sind nicht mehr frei gegeneinander verschiebbar im Vergleich zum Naturkautschuk. Bei Alterung des Gummis werden die Schwefelbrücken durch Sauerstoffbrücken ersetzt. Diese Reaktion hat zur Folge, dass das Gummi brüchig und porös wird. Der Vergleich der Eigenschaften und Strukturen des Eduktes und Produktes kann auch mithilfe einer Tabelle erfolgen.

Aufgabe 3

Aufgrund der veränderten Eigenschaften des Naturkautschuks bei der Reaktion zu Gummi, lassen sich folgende Verwendungsmöglichkeiten ableiten:

- Verwendung als Handschuhe
- Luftballons
- Reifen
- Kondome
- ...

Didaktischer Kommentar:

Die SuS können die Veränderung von Naturkautschuk zu Gummi anhand des Struktur-Eigenschafts-Konzepts beschreiben und Verwendungsmöglichkeiten ableiten.

Der Versuchsaufbau ist simpel, nur das Anrühren der Mischung aus MBT, Zinkoxid, Tensid, Schwefel und destilliertem Wasser kann sich als schwierig erweisen, denn es muss eine bestimmte Menge destilliertes Wasser hinzugegeben werden, sodass eine zähflüssige Mischung entsteht. Die veränderten Eigenschaften sollten leicht von den SuS feststellbar sein. Dies kann beispielsweise durch Fühlen beziehungsweise Bearbeitung mit Pinzetten oder Messern erfolgen. Aufgrund des einfachen Versuchsaufbaus und der wenigen Fehlerquellen, eignet sich der Versuch als Schülerexperiment. Lediglich die lange Zeit des Trocknens muss berücksichtigt werden. Alternativ kann von der Lehrkraft bereits das Gummiprodukt vorbereitet und mit den bereits hergestellten Mischungen der SuS ausgetauscht werden. Alternativ kann die Auswertung des

Versuches in der nächsten Stunde aufgenommen werden. Zusätzlich kann der Versuch erweitert werden, indem der Mischung kleine Mengen an Ruß hinzugefügt werden. Dadurch kann im Anschluss das Produkt für Versuch 3 (Recycling von Autoreifen-Druckerschwärze aus Ruß) verwendet werden. Der Versuch kann im Unterricht als Erarbeitungsversuch genutzt werden. Die SuS können selbstständig die Eigenschaften des Naturkautschuks und Gummis vergleichen und sich die Veränderungen mithilfe des zusätzlichen Materials hinsichtlich der Struktur und den damit verbundenen Änderungen der Eigenschaften erarbeiten. Das Struktur-Eigenschafts-Konzept spielt im Chemieunterricht eine wichtige Rolle. Somit kann der Versuch auch beispielsweise zum Üben in Vorbereitung auf das Abitur genutzt werden.

Um die im Versuch gestellten Aufgaben beantworten zu können, müssen die SuS folgendes Vorwissen besitzen: Sie sollten bereits mit der organischen Chemie vertraut sein, die Begriffe Doppelbindung sowie van-der-Waals-Kräfte erklären können und mit deren Wirkung hinsichtlich der Eigenschaften eines Stoffes vertraut sein. Zudem kann es sich als vorteilhaft erweisen, wenn die SuS bereits Vergleiche hinsichtlich des Struktur-Eigenschafts-Konzepts im Unterricht angestellt haben und Ihnen demzufolge ähnliche Aufgabenstellungen bekannt sind. Der Versuch dient als Erarbeitungsversuch, da die SuS hierbei die Vulkanisation von Kautschuk kennen lernen und die Eigenschaftsveränderungen ableiten. Außerdem dient der Versuch der Wiederholung des Struktur-Eigenschafts-Konzepts. Als Anschlussversuch eignet sich Versuch 3, denn aufgrund der Beständigkeit des Gummis können die SuS eine Möglichkeit des Recyclings durchführen, eventuell sogar mit ihrem eigenen Produkt (falls in die Mischung von Versuch zwei Ruß hinzugegeben wurde). Versuch 4 enthält ein ähnliches Konzept (Herstellung von Gips) und kann im Anschluss durchgeführt werden.



V3 Recycling von Autoreifen – Druckerschwärze selbst herstellen

Beobachtungen:

Das Altreifenstück brennt nach ausreichender Energiezufuhr mit leuchtender Flamme. An der Glasscheibe bildet sich nach und nach eine schwarze Schicht. Bei der Verbrennung ist ein stechender, rauchiger Geruch wahrzunehmen. Die entstandene schwarze Schicht lässt sich mit einem Spatel leicht von der Glasplatte abtragen.

Aus dem farblosen Paraffinöl und dem rot-orangen Kolophonium entsteht zusammen mit dem schwarzen Ruß eine tief schwarze, schmierige Schmelze. Testet man die hergestellte Druckerschwärze mit Fingerabdrücken aus, so erhält man deutliche, schwarze Abdrücke auf dem Papier.

Auswertung:

Aufgabe 2

Bei der Verbrennung des Altreifenstücks entsteht Ruß, welcher sich an der Glasscheibe absetzt. Ruß besteht zu ca. 90% auf feinstverteilten Graphitkristallen, da er bei der unvollständigen Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen entsteht. Der Ruß wird beispielsweise als Füllstoff in der Gummiherstellung verwendet. Er erhöht die Abriebfestigkeit des Gummis beispielsweise in Autoreifen. Dabei besteht der Autoreifen etwa zu einem Drittel aus Ruß. Außerdem kann Ruß als Farbpigment für Druckerfarben oder Tusche verwendet werden. Rußpigmente sind sehr fein verteilt und bilden ein „sehr leichtes, weiches oft etwas schmieriges Pulver“ [13]. Außerdem gilt die schwarze Farbe von Rußpigmenten als eine der schwärzesten Farbtöne, die es gibt. Weiterhin gilt Ruß als sehr beständig gegenüber UV-Strahlung, Säuren, Basen und anderen Chemikalien. Schließlich ist Ruß noch hydrophob und hat zusätzlich eine hohe Oberflächenspannung.

Aus all diesen Eigenschaften von Ruß kann man die Verwendung als Druckerschwärze ableiten. Aufgrund der feinen Verteilung und kräftigen Farbe sorgt Ruß als Farbpigment für eine intensive, deckende Schwarzfärbung. Die Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung sorgt dafür, dass die gedruckte Farbe nicht nach und nach in der Sonne ausbleicht. Außerdem ist es auch von Vorteil, wenn die Druckerschwärze sich nicht in Wasser löst, da so die gedruckte Farbe nicht sofort verläuft, wenn sie mit Feuchtigkeit in Kontakt kommt. Aufgrund all dieser Eigenschaften eignet sich Ruß als Pigment ausgezeichnet zu Herstellung von Druckerschwärze. [14] [15]

Aufgabe 3

Das Altreifenrecycling in Form einer Verbrennung dieser Altreifen ist die am weitesten verbreitete Recyclingmethode von Altreifen. Verbrennt man die Altreifen ohne entsprechende Vorkehrungen für die Aufreinigung der anfallenden Abgase zu treffen, werden Unmengen an Schadstoffen, wie Ruße, aromatische Kohlenwasserstoffe und toxische Gase, freigesetzt. Solche Schadstoffe sind in





diesen Mengen äußerst schädlich für die Umwelt. Würde man die Verbrennung von Altreifen mit einer Form des thermischen Recyclings kombinieren, so kann zumindest die bei der Verbrennung entstehende Energie umgeleitet werden und in einem anderen chemischen Prozess verwendet werden. Hierbei könnten außerdem die entstehenden Abgase aufgereinigt werden. Diese Aufreinigung ist jedoch nicht immer zu 100% erfolgreich, weshalb noch immer größere Mengen Schadstoffe in die Umwelt gelangen. In diesem Sinne benötigt es bessere Aufreinigungsmethoden, um die Altreifenverbrennung zu einer umweltfreundlichen Recyclingmöglichkeit zu machen.

Eine Alternative stellt die Form des chemischen Recyclings dar. Hierbei werden alle Bestandteile des Altreifens, soweit es möglich ist voneinander getrennt und für unterschiedliche chemische Synthesen weiterverwendet. Eine solche Auftrennung in die einzelnen Bestandteile ist mit einem großen Aufwand und unzähligen chemischen Reaktionen verbunden. Dabei entstehen ebenfalls Nebenprodukte, die in manchen Fällen ebenfalls umweltschädlich sein können. Außerdem ist es nicht möglich jeden einzelnen Bestandteil des Reifens sauber von den anderen zu trennen, wodurch es zu Verunreinigungen kommt. Aufgrund dieser Verunreinigungen können die isolierten Bestandteile des Altreifens nicht für jede beliebige Synthese verwendet werden. Betrachtet man diese Form des Altreifenrecyclings also aus dieser Sicht, stellt es auch nicht die optimale Form der Weiterverwertung von Altreifen dar.

Die umweltfreundlichsten Methoden des Altreifenrecyclings stellen die artgerechte und die artfremde Verwendung von Altreifen dar. Bei der artgerechten Verwendung von Altreifen führt man eine sogenannte Reifenrunderneuerung durch. Hierbei werden Altreifen mit leichteren Defekten repariert und in ihren ursprünglichen Zustand zurückversetzt. Im Anschluss daran können diese erneuerten Reifen wieder genutzt werden. Reifen, welche größere Defekte aufweisen und durch eine Reparatur nicht mehr in Stand zu setzen sind, werden artfremd verwendet. Hierbei können die Altreifen beispielsweise auf Kinderspielplätzen eingesetzt werden. Sie können auch als Beschwerung für Futtermittelabdeckungen in der Landwirtschaft oder als Prallschutz für Schiffe verwendet werden. Hierbei bieten sich unzählige Möglichkeiten, die defekten Reifen artfremd weiterzuverwenden. Dabei werden weder schädliche Abgase produziert, noch müssen weitere Chemikalien für eine Zersetzung oder Aufbereitung zugeführt werden. In Bezug auf die Umwelt ist dies die wohl vorteilhafteste Verwendung von Altreifen. Hierbei muss nur darauf geachtet werden, dass die Altreifen nach ihrer artfremden Verwendung dennoch weiter recycelt oder entsorgt werden müssen.

Insgesamt kann man also sehen, dass die Verbrennung von Altreifen in Bezug auf die Umweltaspekte deutlich hinter anderen Recyclingmethoden von Altreifen zurückfällt. Arbeitet man jedoch weiter an der Aufreinigung der entstehenden Abgase und sorgt dafür, dass die bei der Verbrennung entstehende Energie fast vollständig genutzt werden kann, kann die Altreifenverbrennung durchaus





eine rentable und umweltfreundliche Recyclingmethode für Altreifen werden. Die bei der Verbrennung entstehenden Stoffe können isoliert und weiterverwendet werden. Dennoch sollten so viele Autoreifen wie möglich zunächst artgerecht und anschließend artfremd weiterverwendet werden, bevor sie durch eine andere Methode vollständig recycelt werden.

Didaktischer Kommentar:

Die SuS können nach diesem Versuch eine Form des Altreifenrecyclings durchführen und diese Recyclingmethode in Bezug auf andere Methoden der Altreifenverwertung bewerten.

Der Versuch zielt darauf ab, eine Form des Altreifenrecyclings vorzustellen, welche den bei der Verbrennung entstehenden Ruß weiter in der chemischen Industrie verwendet.

Der Versuch hat einen simplen Aufbau, bei dem keine Schwierigkeiten für die SuS auftreten sollten. Es muss nur darauf geachtet werden, dass die Verbrennung des Altreifenstücks zwingend unter dem Abzug durchgeführt wird, da hierbei unzählige Schadstoffe freigesetzt werden. Eine Schwierigkeit kann sich bei diesem Versuchsteil dadurch ergeben, dass die SuS die Glasscheibe nicht lang genug über die Flamme des Altreifenstücks gehalten werden kann. Hierbei kann man alternativ die Glasscheibe mit Hilfe von Stativmaterial über der Flamme fixieren. Eine größere Fehlerquelle kann des Weiteren die Bestimmung der Massen von Kolophonium und Paraffinöl darstellen. Die SuS müssen hier den bei der Verbrennung erhaltenen Ruß einwiegen und mit Hilfe des gegebenen Verhältnisses die anderen benötigten Massen ausrechnen. Dabei kann es den SuS schwer fallen, zu verstehen, wie diese Berechnung erfolgen muss und dass sie zuerst ihre erhaltene Menge an Ruß einwiegen müssen. Man könnte alternativ durch vorheriges Probieren herausfinden, wie viel Ruß ungefähr bei der Verbrennung einer bestimmten Menge an Altreifen entsteht. Basierend darauf kann man einen Richtwert für die benötigten Massen an Kolophonium und Paraffinöl angeben.

Aufgrund des einfachen Versuchsaufbaus und der verhältnismäßig wenigen Fehlerquellen eignet sich der Versuch sehr gut als Schülerexperiment. Außerdem hat die Erkenntnis des Versuches, dass eine Methode entwickelt wurde, um die bei der Verbrennung der Altreifen anfallenden Ruße weiter zu verwerten, eine so große umweltliche Relevanz, welche die SuS selbstständig durch den Versuch erfahren können. In diesem Sinne bietet sich der Versuch im Unterrichtsverlauf als Erarbeitungsversuch an. Die SuS können auf diesem Wege die vorgestellte Verbesserung des Reifenrecyclings selbstständig erarbeiten.

Um die zum Versuch gestellten Aufgaben vollständig bearbeiten zu können und um den Versuch vollständig durchdringen zu können, muss das benötigte Vorwissen bereits im Unterricht behandelt worden sein. Dies betrifft insbesondere die umweltlichen Aspekte der Gummiherstellung und welche Auswirkung die Bearbeitung des Rohkautschuks auf die Verbrennung der Altreifen hat. Außerdem sollte auch die Verbrennung im Allgemeinen bereits behandelt worden sein. Als





Anschlussversuch wäre hierbei der Versuch 4 vorzuschlagen. Dieser Versuch beschäftigt sich mit der weiteren Verwertung anderer Stoffe, die bei der Verbrennung von Altreifen entstehen. Dabei können die SuS nach diesen beiden Versuchen erkennen, dass eine Kombination beider Versuche und eine entsprechende Abgasaufreinigung in der Industrie eine umweltfreundliche Methode des Altreifenrecyclings liefert.

Da der erste Teil des Versuches zwingend unter dem Abzug durchgeführt werden sollte, kann der Versuch unter Umständen nicht als Schülerexperiment durchgeführt werden. Für den Fall, dass der Schule genügend Abzüge zur Verfügung stehen, kann der Versuch bedenkenlos als Schülerexperiment durchgeführt werden. Anderenfalls bietet sich eine Durchführung als Schülerdemonstrationsexperiment an.



V4 Herstellung von Gips aus Altreifen

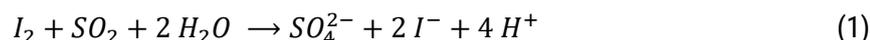
Beobachtungen:

Die Altreifenschnipsel verbrennen beim Erhitzen des Verbrennungsrohres unter Rauchentwicklung. Durch Einschalten der Luftpumpe werden die Gase in Richtung der Waschflasche getragen. Während das Gas an dem Iod-Kaliumiodid-Papier vorbei strömt, entfärbt sich dieses. Nachdem der Rauch in die Waschflasche geströmt ist, fällt aus der farblosen Lösung ein weißer, kristalliner Feststoff aus. Das zweite Iod-Kaliumiodid-Papier am Ausgang der Waschflasche hingegen entfärbt sich nicht.

Auswertung:

Aufgabe 2

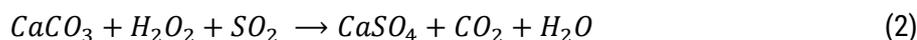
Bei der Verbrennung des Reifenstückes entsteht neben Kohlenstoffdioxid und einigen unspezifischen Kohlenwasserstoffen das für diesen Versuch wichtige Schwefeldioxid. Die Luftpumpe leitet das Gas in die Richtung der Waschflasche, damit es zu einer Reaktion kommen kann. Die Entfärbung des Iod-Kaliumiodid-Papiers ist damit zu erklären, dass Schwefeldioxid mit dem Iod reagiert und dieses zu Iodid-Ionen reduziert, wie in Gleichung (1) zu sehen ist.



Das vor der Reaktion vorhandene Iod färbt das Filterpapier braun und die nach der Reaktion vorhandenen Iodid-Ionen sind farblos. Folglich entfärbt sich das Iod-Kaliumiodid-Papier während der Reaktion.



In der Waschflasche reagiert das Schwefeldioxid mit dem Calciumcarbonat zu Calciumsulfat, wie in Gleichung (2) zu sehen ist. Das weiße, kristalline Calciumsulfat, welches bei der Reaktion ausfällt, erklärt die auftretende Trübung in der Waschflasche.



Das zweite Iod-Kaliumiodid-Papier entfärbt sich nicht, da diese Reaktion ein spezifischer Schwefeldioxidnachweis ist und durch die Reaktion in der Waschflasche kein Schwefeldioxid an das Papier gelangt.

Aufgabe 3

Diese Methode der Verwertung von Altreifen erweist sich als eine gute Methode, um im Reifen enthaltene Stoffe weiter zu verwerten. So bildet das Produkt Gips einen für die Bauindustrie unabdingbaren und wichtigen Rohstoff, der sehr gut weiterverarbeitet werden kann. Ein großer Vorteil dieser Methode ist, dass das für die Umwelt schädliche Gas Schwefeldioxid umgewandelt wird und als Gips nicht mehr die Umwelt belastet. Allerdings entstehen bei der Verbrennung auch andere gasförmige Stoffe, allen voran Kohlenstoffdioxid. Dadurch darf das übrige entstandene Gas nicht ungefiltert in die Umwelt gelangen, weshalb es aufgefangen und gereinigt werden muss. Dieser Schritt kann sehr aufwändig werden und sowohl Zeit als auch Kapital verschlingen. Somit ist das Recycling der Altreifen auf diese Weise eine industriell sinnvoll einsetzbare Methode, die allerdings mit Vorsicht zu genießen ist.

Didaktischer Kommentar:

Die SuS können nach dem Experiment eine weitere Form des Altreifenrecyclings beschreiben, diese selber durchführen und dabei die Umweltrelevanz dieser Methode beurteilen.

Das Experiment Gipsherstellung aus Altreifen eignet sich für schulische Anwendungszwecke sehr gut, da mit diesem Versuch den SuS eine klimaneutrale Form des Altreifenrecyclings präsentiert werden kann. Dabei eignet sich der Versuch eher als Lehrerdemonstrationsexperiment. Der Versuchsaufbau ist zum einen sehr komplex und würde zum anderen den Umfang einer Unterrichtsstunde überschreiten. Außerdem wäre der Materialaufwand bei einem Schülerexperiment zu hoch. Ebenso sind Teile wie die Luftpumpen nur mit Vorsicht zu bedienen, da bei zu ruckartigem Aufdrehen die Verbrennung unterbrochen werden könnte. Generell sollte der Versuch in der 11./12. Klasse im Themenkomplex „Struktur und Reaktionen der Kunststoffe“ [16] durchgeführt werden. Dieses Experiment kann sowohl als Erarbeitungsversuch als auch als Überprüfungsversuch eingesetzt werden. Bei der Verwendung als Erarbeitungsversuch sollen die SuS an diesem Beispiel die Problematik der Wiederverwertung des Endproduktes Altreifen erkennen und gleichzeitig dabei ihr erlangtes Wissen anwenden, um diese alternative Recyclingmethode zu beurteilen. Dazu sollte bereits eine Einführung in die Thematik der Elastomere erfolgt sein. Unter anderem durch die Verbindung mit





der Werkstoffindustrie sollte es den SuS gelingen, den Mehrwert dieser Recyclingmethode zu erkennen. Darüber hinaus sollen sich die SuS auch kritisch mit der Vorteilhaftigkeit der vorgestellten Recyclingmethode auseinandersetzen. Neben der Erarbeitung von neuem Wissen und der Anwendung von Transferwissen, sollen die SuS auch nachvollziehen können, dass durch zuvor erfolgte Verarbeitungsschritte Stoffe in die Struktur von Reifengummi eingearbeitet werden. So dient der Schwefeldioxidnachweis mit Iod-Kaliumiodid-Papier für die SuS als Überprüfung, dass Schwefel durch das Vulkanisieren in den Kautschuk eingearbeitet wurde. Auch dient der Aufbau mit zwei Iod-Kaliumiodid-Papierstreifen einmal vor der Reaktion in der Waschflasche und einmal danach dazu, den SuS zu zeigen, dass die schädlichen Stoffe durch die Reaktion tatsächlich umgewandelt wurden und kein Schwefeldioxid in die Umwelt gelangt. Somit zielt dieser Versuch darauf ab, den SuS die Problematik des Recyclings von Altreifen näher zu bringen.

Durch den komplexen Aufbau des Experimentes ergeben sich auch einige Fehlerquellen. So kann eine fehlerhafte Bedienung der Luftpumpe dazu führen, dass die Verbrennung nicht ablaufen kann oder die Reaktionsprodukte nicht vollständig in die Waschflasche getragen werden. Außerdem kann durch eine ungenügende Erhitzung keine ausreichende Verbrennung der Altreifenstücke erfolgen. Auch können Fehler durch eine fehlerhafte Abdichtung der Übergänge zwischen den einzelnen Teilen der Apparatur und dadurch ein Verlust an Gasvolumen passieren. Auch könnten die Chemikalien fehlerhaft abgewogen sein. Um den Versuch umfassend verstehen zu können, wird Wissen in den Bereichen Redoxreaktion, Verbrennung (auch speziell von Gummi), Autoreifen und Recyclingmethoden von Altreifen vorausgesetzt.

Dieser Versuch kann unter anderem auch fächerübergreifend eingesetzt werden. So ist die Problematik der Umweltbelastung auch ein Thema, dass in dem Unterrichtsfach Geographie besprochen werden soll. Da der Zeitaufwand bei diesem Versuch mit etwa einer Unterrichtsstunde relativ hoch ist, empfiehlt es sich den Versuch dann durchzuführen, wenn auch andere Themenbereiche mit eingebunden werden können. Anderenfalls empfiehlt es sich, einen Alternativversuch durchzuführen. So können alternative Recyclingmethoden gezeigt werden, die einen geringeren zeitlichen Aufwand haben. Ein Beispiel dafür wäre die Herstellung von Druckerschwärze aus Altreifen, die bereits in Versuch V3 vorgestellt wurde.



IV. Referenzen

- [1] https://www.chids.de/dachs/expvortr/802Kautschuk_Lassmann.pdf (S. 4) (Stand: 24.02.2021).
- [2] <https://www.chemie.de/lexikon/Kautschuk.html> (Stand: 24.02.2021).
- [3] <https://utopia.de/ratgeber/naturkautschuk-das-sind-die-vor-und-nachteile-des-naturerlichen-rohstoffs/> (Stand: 24.02.2021).
- [4] <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Kautschuk> (Stand: 24.02.2021).
- [5] <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/441-vulkanisation> (Stand: 24.02.2021).
- [6] <https://www.chemie.de/lexikon/Elastomer.html> (Stand: 24.02.2021).
- [7] https://chids.online.uni-marburg.de/dachs/expvortr/802Kautschuk_Lassmann.pdf (Stand: 24.02.2021).
- [8] <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/441-vulkanisation> (Stand: 24.02.2021).
- [9] <https://www.wissenschaft.de/umwelt-natur/das-zweite-leben-der-altreifen/> (Stand: 25.02.2021)
- [10] Prof. Blume: <https://www.chemieunterricht.de/dc2/auto/gum-rec.htm> (Stand: 03.02.2021)
- [11] Wacker Chemie AG: https://www.chem2do.de/c2d/de/schulversuche/v2_brennverhalten/player-seite_3.jsp?vidIndex=0 (Stand 25.03.2021).
- [12] Prof. Blume: <https://www.chemieunterricht.de/dc2/auto/rec-uebs.htm> (Stand: 03.02.2021).
- [13] Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Chemie. S. 21-43.
- [14] Dr. S. Wülfert: https://materialarchiv.ch/en/ma:material_997/?maapi:f_collections=ma:collection_499 (Stand: 03.02.2021).
- [15] W. Schröter, K.-H. Lautenschläger, H. Bibrack: Taschenbuch der Chemie, Auflage 15; Fachbuchverlag Leipzig, 1991; S. 348.
- [16] Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Chemie. S. 42.

Quellenverzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: <https://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/434-naturkautschuk> (Stand: 25.02.2021)
- Abb. 2: <https://www.chemieunterricht.de/dc2/auto/images/vulkanis.jpg> (Stand: 21.02.2021)
- Abb. 3: https://chids.online.uni-marburg.de/dachs/expvortr/802Kautschuk_Lassmann.pdf (Stand: 20.01.2021)
- Abb. 4: eigene Abbildung
- Abb. 5: eigene Abbildung
- Abb. 6: <https://www.chemieunterricht.de/dc2/auto/images/vulkanis.jpg> (Stand: 21.02.2021)
- Abb. 7: eigene Abbildung
- Abb. 8: eigene Abbildung
- Abb. 9: eigene Abbildung



5. Makromoleküle (Benedikt Blümbott, Adrian Hofmann, Tim Jacobs, Erik Richter)

I. Sachinformation

1. Definition

1.1. Plastik

Plastik ist eine umgangssprachliche Bezeichnung für Kunststoffe. Kunststoffe sind hierbei nicht-metallische Polymere mit einem hohen molekularen Gewicht, welche synthetisch hergestellt werden. Typisch sind sich wiederholende makromolekulare Strukturen. Beispiele für Plastik finden sich in jedem Haushalt: Die Borsten der Zahnbürste und die Saiten vieler Streichinstrumente bestehen aus Nylon, der Joghurtbecher wird häufig aus Polystyrolen hergestellt und Sitzkissen auf können Polyurethane beinhalten. [1]

1.2. Mikroplastik

Mikroplastik und Plastik haben zwar die gleichen chemischen Bestandteile, unterscheiden sich jedoch in der Größe. Eine gängige Größendefinition für Mikroplastik ist hierbei eine Größe unter 5 mm. Weiterhin kann in große Mikroplastikpartikel (1 mm bis 5 mm) und in kleine Mikroplastikpartikel (1 µm bis 1 mm) unterschieden werden. [2]

Wird Mikroplastik im Zusammenhang mit Umweltchemie betrachtet, ist eine Einteilung in primäres und sekundäres Mikroplastik sinnvoll. Dabei ist primäres Mikroplastik Mikroplastik, welches bewusst als solches hergestellt wird und eine Funktion hat (Beispiel: Mikroplastik für Kosmetik). Sekundäres Mikroplastik entsteht durch den Abbau größerer Kunststoffteile. Dies kann durch UV-Licht, Oxidation, mechanische Einwirkungen und durch biologische Prozesse gefördert werden. Sekundäres Mikroplastik hat folglich keinen funktionalen Zweck. [3]

2. Herstellung

Kunststoffe werden heutzutage in industriellen Maßstäben und häufig, aufgrund der besseren Transportierbarkeit, in Form von Granulaten und Pulvern hergestellt. Wichtige Reaktionen sind dabei die Polymerisation (Beispiel: Polystyrole), die Polykondensation (Beispiel: Polyamide) und die Polyaddition (Beispiel: Polyurethane). Da einer der Versuche die Herstellung eines Polykondensates beinhaltet, soll dieser Reaktionstyp im Folgenden erläutert werden. [3].

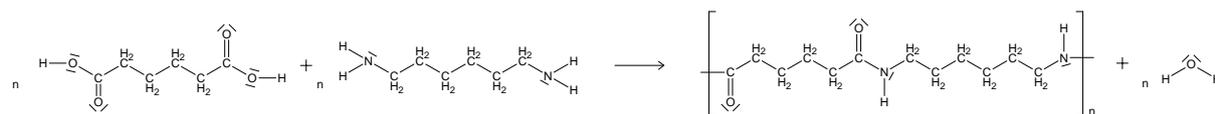


Abbildung 13 Polykondensation (Beispiel)

Neben der Herstellung von Phenoplasten und Polyestern ist die Herstellung von Polyamiden auch eine Polykondensation (vgl. Abbildung 13). Bei der Herstellung von Polyamiden kommt es zur Reaktion einer Dicarbonsäure (hier: Adipinsäure) mit einem Diamin (hier: Hexamethyldiamin). Da es sich um eine Kondensation handelt wird Wasser abgespalten. Zwischen den beiden Edukten entsteht eine Amidgruppe (vgl. Abbildung 14), welche der Peptidbindung ähnelt.

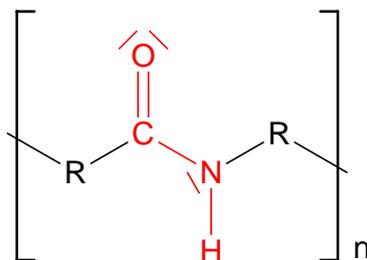


Abbildung 14 Amidgruppe (rot)

3. Eintrags- und Verbreitungswege sowie Beständigkeit

Die Verbreitungswege von Plastik und Mikroplastik sind vielfältig. Sie lassen sich nach den jeweils beteiligten Kompartimenten Wasser, Luft und Boden kategorisieren und werden im Folgenden kurz vorgestellt. Von hoher Bedeutung ist das Kompartiment Wasser, da die hier vorliegenden Transportprozesse sehr vielfältig sind. In das Kompartiment wird Plastik einerseits über Littering und andererseits in Form von Mikroplastik über das Abwasser eingetragen. Beispiele sind hier Kosmetika, der Eintrag über die Wäsche (Nylonfäden) und Zahnpasta. Kläranlagen sind zwar in der Lage einen großen Teil der Verunreinigungen aus dem Abwasser heraus zu filtern, jedoch verbleiben geringe Mengen im gefilterten Abwasser. Zählungen von Partikeln in den Abwässern von Kläranlagen bewegen sich im Rahmen von weniger als einem Partikel pro Liter Abwasser bis hin zu 100 Partikeln pro Liter. Nach dem Filtern befindet sich das Mikroplastik im Klärschlamm und wird als Dünger in den Boden eingetragen. Die Menge der gefundenen Partikel bewegt sich im Rahmen von 1000 Partikeln in einem Kilogramm Trockenmasse bis hin zu mehr als 20000 Partikeln pro Kilogramm. [3]

Das Kompartiment Boden nimmt eine Sonderrolle ein, da sich Plastik im Boden nur wenig fortbewegt und vor allem nur lokal in diesen eingetragen wird. Dies geschieht in den offensichtlichen Fällen durch die industrielle Deponierung von Müll. Weniger offensichtlich, jedoch nicht zu vernachlässigen, ist der Eintrag von plastikhaltigen Klärschlämmen in den Boden in Form von Dünger oder in Form von Biokunststoffen, welche nach der Norm EN13432 bereits als kompostierbar gelten, wenn maximal 10% ihrer Rückstände größer als 2 mm sind. Des Weiteren kann Plastik über Littering, das Liegenlassen von Müll (zum Beispiel im Wald), in Böden eingetragen werden. [3]

Über das Kompartiment Luft wird vor allem sekundäres Mikroplastik durch die Atmosphäre transportiert. Das sekundäre Mikroplastik entsteht hierbei vor allem im Straßenverkehr durch mechanische Belastungen wie zum Beispiel Reifenabrieb und Bremsstaub. Durch Ablagerung gelangt das Mikroplastik dann in die Kompartimente Wasser und Boden. [3]

Die große Gefahr von Plastik in der Umwelt geht nicht nur von der großen Masse aus, die in die Umwelt gelangt, sondern auch von der Beständigkeit von Kunststoffen gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen. Dies hat zur Folge, dass sich das Plastik sehr lange in den verschiedenen Kompartimenten aufhalten kann, ohne sich zu zersetzen. Somit sind Kunststoffe in der Lage, auch lange Transportwege zu durchlaufen. Ein Beispiel hierfür sind Meeresströmungen. Dies hat ebenfalls zur Folge, dass sich (Mikro-)Plastik in verschiedenen Gliedern der Nahrungskette nachweisen lassen kann. Die Folgen hiervon sind jedoch noch weitestgehend unerforscht. Neben der Beständigkeit gegenüber Chemikalien und Umwelteinflüssen besitzen Kunststoffe die Eigenschaft, andere Schadstoffe an ihrer Oberfläche gut zu binden (zu adsorbieren) und dem zu Folge zu transportieren. Schadstoffe (organische Schadstoffe, aber auch Schwermetalle) finden somit ihren Weg zurück in die belebte Umwelt. [3]

4. Quellen von (Mikro-)Plastik in der Umwelt und Lösungsansätze

Die Quellen von Plastik in der Umwelt sind ebenso zahlreich wie die Verbreitungswege, die es hier nimmt. Im Folgenden sollen die wichtigsten Quellen und mögliche Interventionen genannt werden.

Nach einer IUCN Studie [4] werden 98% des im Meer befindlichen Plastiks durch Aktivitäten an Land verursacht. Hier sind die größten Quellen der Reifenabrieb im Straßenverkehr und aus Textilien ausgewaschene Fasern. Da Auto-, Bus- und Lkw-Verkehr zurzeit nicht wegzudenken sind, ist vor allem eine Verminderung desselben erforderlich. Alternativen zum Individualverkehr (ÖPV in und zwischen Städten) müssen also weiter gestärkt und geschaffen werden. Das Bewusstsein jedes Individuums muss ebenfalls geschärft werden, damit auf „unnötige“ Fahrten mit dem Pkw verzichtet wird. In Hinsicht auf den Eintrag von Textilfasern kann beispielsweise regulierend von der Politik eingegriffen werden. Erste Eingriffe der Politik sind im Bereich des Einwegplastiks ab 2021 zu beobachten. So genannte „Wegwerfartikel“ (darunter zählen: To-go Becher, Einweg-Geschirr, Einweg-Behälter aus Styropor, Trinkhalme und Rühr- und Wattestäbchen aus Einwegplastik) werden verboten. [5]

Eine weitere, oben bereits erwähnte Quelle für Mikroplastik in Abwässern stellen Kosmetika dar. So gibt es viele Peeling-Cremes, Zahnpasta und Duschgel mit hohen Mengen an Mikroplastik. Erneut ist hier ein Eingriff der Politik denkbar, allgemein sollte (vorerst) jedoch jeder Mensch individuell darauf achten, mikroplastikfreie Produkte zu kaufen. Hierfür sollte die Bevölkerung stärker sensibilisiert werden.



Eine weitere Quelle von Mikroplastik in den Meeren ist die Antifoulingbeschichtung von Schiffen, welche den Bewuchs von Schiffsrümpfen verhindert. Da die Antifoulingbeschichtung zu einer hohen Treibstoffersparnis beiträgt, ist diese nicht weg zu denken. Es ist deshalb wichtig, in die Forschung in diesem Bereich zu investieren, um neue, moderne und umweltfreundliche Beschichtungen zu entwickeln. [3]

Zusammenfassend lassen sich drei verschiedene Lösungsansätze finden. Diese sind die Regelung durch die Politik, das selbstständige Anpassen des Konsumverhaltens des Einzelnen, sowie die Neu- und Weiterentwicklung von Produkten, die diese umweltverträglich machen. Im Folgenden werden Anregungen für die Änderung im Konsumverhalten aufgezählt: 1. Einwegprodukte (und auch Mehrwegprodukte) aus Plastik vermeiden und Alternativen nutzen: Kaffeebecher aus Emaille oder Bambus, Bambuszahnbürsten; 2. mikroplastikfreie Kosmetik kaufen; 3. Obst und Gemüse in wiederverwendbaren Netzen kaufen (nicht Einwegbeutel) und möglichst loses Obst und Gemüse kaufen; 4. Unverpackt-Läden nutzen.

5. Identifizierung/ Analytik

Um Mikroplastik in einem Kompartiment nachzuweisen wird ein mehrstufiges Verfahren durchlaufen. Eine Probe (zum Beispiel: Boden-, Luft- und Wasserprobe oder Peeling-Creme) wird zuerst durch Sieben aufgearbeitet (vgl. Experiment V4). Dabei wird das zu untersuchende Mikroplastik im Sieb aufgefangen. Durch unterschiedliche Porendurchmesser der Siebe kann es hier schon zur Größentrennung kommen. Im nächsten Schritt wird die Mikroplastikprobe von anderen Teilchen (Metalle, Biofilme ...) durch optische und haptische Trennung, Dichtentrennung, mit Hilfe von chemischen Lösemitteln oder Enzymen getrennt. [3]

In der Mikroplastik-Analytik kommt es nach der Probenaufbereitung zur Größenbestimmung über zum Beispiel mikroskopische Vermessungsverfahren und zum Nachweis von Kunststoffen über spektroskopische Methoden. Hierbei wird die Infrarot- und die Ramanspektroskopie verwendet. [3]

II. Schülermaterial

Thema: (Mikro-)Plastik in der Umwelt

Versuch 1: Herstellung von Nylon

Im Versuch wird Polyamid 6.6 hergestellt. Die Aufgaben sind nur mit viel Vorwissen zu bearbeiten. Jahrgangsstufe: 12 (EA)

- Die Lernenden können im Experiment Polyamid 6.6 (Nylon) herstellen und entsprechende Reaktionsgleichungen zur Polykondensation aufstellen.
- Die Lernenden können Eigenschaften aus der Struktur des Polyamid 6.6 ableiten und die Verwendung beziehend auf die Eigenschaften bewerten.

Versuch 2: Dichteuntersuchung von Kunststoffen

Im Versuch werden die Dichten verschiedener Kunststoffe untersucht und die Relevanz in Bezug auf Umwelt (vor allem Wasser) erarbeitet. Jahrgangsstufe: 7-12, die Aufgabenbearbeitung ist jedoch komplex und eher für Jahrgangsstufe 12 (EA) vorgesehen.

- Die Lernenden können im Experiment verschiedene Kunststoffe auf ihre Dichte untersuchen und mit den Ergebnissen der Untersuchungen Alltagsprobleme (z.B.: die Bildung von Müllinseln) erklären.
- Die Lernenden können aus den Eigenschaften Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten.

Versuch 3: Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen

Im Versuch werden verschiedene Kunststoffproben auf ihre Beständigkeit gegenüber Säuren und Basen untersucht. Die Aufgaben zielen auf eine Einordnung in die Umweltchemie ab. Alternative Denkweisen werden zusätzlich gefördert. Jahrgangsstufe: 10-12

- Die Lernenden können die Gefährlichkeit von Kunststoffen in Bezug auf die Beständigkeit erklären und daraus Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten.

Versuch 4: Wir untersuchen Quellen von Mikroplastik

Im Versuch wird Mikroplastik in Alltagsprodukten nachgewiesen. Dabei werden mit Hilfe einfacher Mittel (Teebeutel) verschiedene Proben filtriert. Die Aufgaben zielen erneut auf eine Einordnung in das Thema der Umweltchemie ab. Jahrgangsstufe: 10-12

- Die Lernenden können im Schülerexperiment Mikroplastik in alltäglichen Substanzen nachweisen. (Sachkompetenz)
- Die Lernenden können Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten.





V1 Herstellung von Nylon [6]

Informationen

Einleitung

Aus dem Alltag kennst du viele Anwendungen der Gruppe der Polyamide, welche auch als Kunststofffasern bekannt sind. Kunststofffasern finden sich in deiner Bekleidung (Damenstrümpfe, Sportbekleidung), in deiner Zahnbürste als Borsten oder als Saiten auf deinem Streichinstrument oder deiner Gitarre. Im Versuch stellst du ein Polyamid (Polyamid 6.6, Nylon) in Form eines langen Fadens, wie er in der Kleidungsproduktion verwendet wird, her.

Aufgabenstellung

1. Führe den Versuch durch und notiere deine Beobachtungen.
2. Die ablaufende Reaktion ist eine Polykondensation, bei welcher sich jeweils eine Peptidbindung zwischen einem Molekül Adipinsäure und einem Molekül Hexamethyldiamin bildet. Stelle die Reaktionsgleichung in Lewisschreibweise auf. Nenne die Bedeutung der Zahlen „6.6“ im Trivialnamen.
3. Leite aus der Struktur des Polyamids 6.6 mögliche, allgemeine Eigenschaften ab. Bewerte die Verwendung bezugnehmend auf die Eigenschaften (z.B.: Elastizität, Reißfestigkeit, ...).

Das Experiment

Materialien

- 2 Bechergläser (250 mL)
- 1 Glasstab
- 1 Pinzette oder 1 Haken
- 2 Spatel und 2 Wägeschalen zum Abwiegen
- (Scheidetrichter: nur Lehrkraft)

Chemikalien

- Adipinsäuredichlorid (1 g)
- Cyclohexan (50 mL)
- Hexamethyldiamin (2 g)
- Natriumhydroxid (0,8 g)
- Phenolphthalein
- Wasser (destilliert) (50 mL)

Durchführung

1. Becherglas 1: Löse in einem Becherglas in 50 mL Cyclohexan 1 g Adipinsäuredichlorid.
2. Becherglas 2: Löse in einem weiteren Becherglas in 50 mL Wasser 2 g Hexamethyldiamin und 0,8 g Natriumhydroxid. Gib 3 Tropfen Phenolphthalein zur Lösung.
3. Überschichte die Lösung aus Becherglas 2 vorsichtig mit der Lösung aus Becherglas 1.

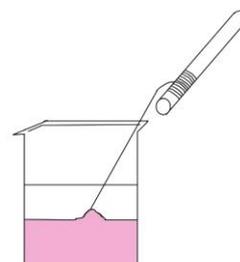


Abbildung 3 Versuchsdurchführung Nylon





- Ziehe die Grenzschicht mit Hilfe eines Hakens oder einer Pinzette heraus und wickle diesen Faden über einen Glasstab. Wickle den Faden vollständig auf den Glasstab.
- Entsorgung: Phasen im Scheidetrichter trennen. Organische Phase: halogenierte organische Abfälle. Wässrige Phase: Ausguss, mit viel Wasser spülen.

Erklärung/ Information

Adipinsäure:

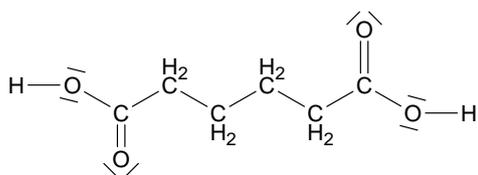


Abbildung 4 Struktur Adipinsäure

Hexamethyldiamin:

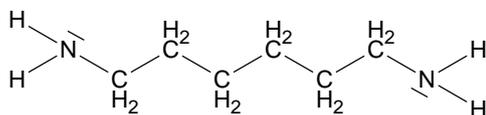


Abbildung 5 Struktur Hexamethyldiamin



V2 Dichteuntersuchungen von Kunststoffen

Informationen

Einleitung

Wie du aus deinem Alltag weißt, gibt es viele verschiedene Kunststoffe. Im Chemieunterricht hast du gelernt, dass diese sich nicht nur in ihrer Farbe und Form unterscheiden, sondern auch hinsichtlich ihrer chemischen Struktur. Die Dichtebestimmung bietet eine Möglichkeit, die vielen verschiedenen Kunststoffe voneinander zu trennen. Mit der Dichte kann auch die Bildung von Müllinseln in den Ozeanen begründet werden.

Aufgabenstellung

1. Führe den Versuch durch und notiere deine Beobachtungen.
2. Ordne die Kunststoffproben nach steigender Dichte. Erkläre das Phänomen, dass sich Müllinseln erst in den Ozeanen und noch nicht in Flüssen bilden.
3. Bewerte die Eignung verschiedener Kunststoffe als Auftriebsmittel in Schwimmwesten. Gehe hierbei auf verschiedene Einsatzgebiete wie Flüsse, Seen und Meere ein.

Das Experiment

Materialien

- 1 Becherglas (1000 mL)
- 1 Spatel
- 1 Glasstab
- 1 Aräometer

Chemikalien

- Kochsalz
- Wasser (500 mL)
- Spülmittel
- Verschiedene Kunststoffproben

Durchführung

1. Fülle etwa 500 mL Wasser in das Becherglas und füge einen kleinen Tropfen Spülmittel hinzu.
2. Lege die Kunststoffproben in das Becherglas hinein.
3. Gib nun behutsam und schrittweise Kochsalz in kleinen Mengen hinzu und löse dieses möglichst vollständig auf. Nimm dir hierbei den Glasstab zu Hilfe und rühre die Lösung damit um.
4. Gib schrittweise immer weiter Kochsalz hinzu, bis alle Kunststoffproben schwimmen oder sich kein Kochsalz mehr im Wasser löst.

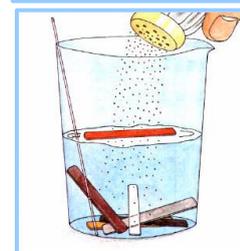
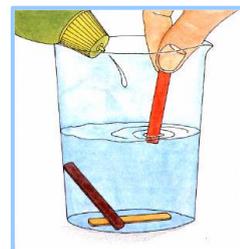


Abbildung 6 Versuchsdurchführung Dichteuntersuchung





5. (Zusatz) Miss jedes Mal, wenn du eine Veränderung beobachten kannst, mit dem Aräometer die Dichte der Lösung.
6. Entsorgung: Wasser: Ausguss. Plastik: Plastikmüll oder wieder-/weiterverwenden

Erklärung/ Information

Aräometer

Ein Aräometer ist ein Gerät zur Messung der Dichte von Flüssigkeiten. Es besteht aus einem großen Auftriebskörper aus Glas, welcher mit einer definierten Masse an Bleischrot beschwert wurde. Die Dichte kann an einer Skala am oberen Ende des Auftriebskörper abgelesen werden. Aräometer sind auf eine bestimmte Temperatur kalibriert. Diese beträgt in der Regel 20 °C und lässt sich im unteren Teil des Aräometers auf einem eingebauten Thermometer ablesen. Aräometer sind in der Regel nur für einen bestimmten Dichtebereich kalibriert. Das Messprinzip beruht auf dem archimedischen Prinzip, welches besagt, dass die Masse eines Körpers mit der Masse der von ihm verdrängten Flüssigkeit übereinstimmt. Mit einem bekannten Volumen der verdrängten Flüssigkeit des Probekörpers und einer bekannten Probenmasse lässt sich nun die Dichte einer Flüssigkeit bestimmen.



Abbildung 7 Aräometer





V3 Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen

Informationen

Einleitung

Du kennst bereits eine Vielzahl an Verwendungsmöglichkeiten von Plastik im Alltag und hast dabei vielleicht schon festgestellt, dass Plastik, je nach Verwendungszweck, ein durchaus sehr widerstandsfähiges Material sein kann. Wie widerstandsfähig verschiedene Kunststoffe sind und was das für die Umwelt bedeutet, sollst du in diesem Experiment einmal herausfinden.

Aufgabenstellung

1. Führe den Versuch gemäß der Anleitung durch.
2. Vergleiche die unbehandelte Probe mit den behandelten Proben und notiere deine Beobachtungen.
3. Bewerte anhand deiner Beobachtungen die Chemikalienbeständigkeit der Kunststoffproben. Erkläre die Bedeutung deiner Beobachtungen für die Umwelt.
4. Formuliere eigene Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Plastik im Alltag.

Das Experiment

Materialien

- 1 Schere
- 1 Unterlage (Tablett aus Holz etc.)
- 6 Uhrglasschalen
- 1 Spatel

Chemikalien

- Spiritus (enthält Ethanol), acetonhaltiger Nagellackentferner, Universalverdünnung (enthält Xylol)
- konzentrierte Salzsäure
- Salpetersäure

- Natronlauge
- Kunststoffproben (Plastikfolie, etc.)

Durchführung

1. Zerschneide mithilfe der Schere die Plastikfolie in 7 Stücke (6 Proben und eine Vergleichsprobe).
2. Platziere die Kunststoffproben anschließend auf den Uhrglasschalen.
3. Gib nun auf jede Probe 1-2 Tropfen der verschiedenen Chemikalien (je Probe eine Chemikalie) und lass sie 3 Minuten stehen.
4. Spüle nach den 3 Minuten vorsichtig alle Proben mit Wasser ab.

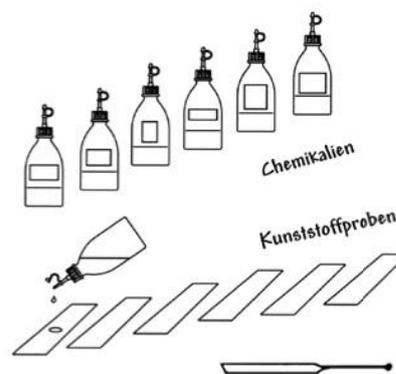


Abbildung 8 Versuchsdurchführung Chemikalienbeständigkeit





5. Vergleiche nun die behandelten Oberflächen mit der unbehandelten Vergleichsprobe und achte auf Veränderungen. Dafür kannst du auch mit einem Spatel an der Oberfläche schaben oder kratzen und die Veränderungen dokumentieren.
7. Wiederhole die Durchführung mit einer weiteren Kunststoffprobe.
8. Entsorgung: Kunststoffproben: Plastikmüll oder wieder-/weiterverwenden. Aceton, Verdünnung (Xylol): halogenfreie Lösemittel. Säuren: wässrige Lösungen, sauer. Basen: wässrige Lösungen, basisch.





V4 Wir untersuchen Quellen von Mikroplastik

Informationen

Einleitung

Wie du aus dem Chemieunterricht bereits weißt, gibt es in deinem Alltag viele Produkte, die Mikroplastik enthalten. Doch wusstest du auch, dass es sehr einfach ist, dieses Mikroplastik auch nachzuweisen? Dafür brauchst du lediglich ein paar einfache Hilfsmittel aus der Küche.

Aufgabenstellung

1. Führe den Versuch durch. Betrachte das Filtrat mit der Lupe und notiere Farbe und Form der gefundenen Partikel.
2. Bestimme die Masse des gewonnenen Filtrats. Berechne, ausgehend von der untersuchten Menge, welche Masse an Mikroplastik in den verschiedenen Proben enthalten ist.
3. Bewerte den Einsatz von Mikroplastik in Alltagsprodukten. Nenne Vor- und Nachteile gegenüber mikroplastikfreien Produkten.

Das Experiment

Materialien

- 1 Spatel
- 4 Petrischalen
- 1 Föhn
- 4 Teefilterbeutel
- 1 Lupe
- Waage

Chemikalien

- Waschpulver (10 g)
 - 2 Peeling-Cremes (je 10 g)
 - Zahnpasta (10 g)
 - Wasser
- (Hinweis: Achte darauf, dass die Produkte **nicht** frei von Mikroplastik sind!)

Durchführung

1. Wiege auf der Waage 10 g Waschpulver ab und gib dieses anschließend in einen Teefilter.
2. Falte die Öffnung des Filters mehrmals um, sodass kein Inhalt entweichen kann.
3. Spüle den Teefilter so lang unter dem Wasserhahn aus, bis nur noch klares Wasser aus dem Filter kommt.
4. Föhne den Filter so lang, bis er getrocknet ist. (Vorsicht: Heiß!)
5. Öffne den Filter und gib den Rückstand mit einem Spatel auf eine Petrischale. Achte darauf, möglichst alle Partikel zu übertragen.
6. Wiederhole Schritt 1-5 mit den restlichen Produkten.
7. Entsorgung: Mikroplastikpartikel: Plastikmüll. Nicht über Abfluss entsorgen!



Abbildung 9 Versuchsdurchführung



III. Didaktische Hinweise

Im Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife in Thüringen von 2012 wird das Thema der Kunststoffe in Bezug auf Umweltchemie nicht explizit genannt. Jedoch finden sich verschiedene Hinweise auf die Relevanz des Themas. So beinhaltet die naturwissenschaftliche und die darin enthaltene chemische Grundbildung unter anderem die "[...] Mitgestaltung unserer Lebensbedingungen im Sinne der nachhaltigen Entwicklung" [7]. Im Zuge dessen wird die Bedeutung von vielen lebensnahen Bereichen, wie zum Beispiel Kunststoffe und Umweltschutz, unterstrichen und erwähnt. [7]

Aufgrund dessen ist die Einordnung des Themas "Natürliche und künstliche Makromolekulare" und insbesondere der Unterpunkt "Struktur und Reaktionen der Kunststoffe" in den Kontext der Umweltchemie und des Umweltschutzes naheliegend. Ferner ist das Thema Umweltschutz, auch in Bezug auf Kunststoffe (vgl. [5]), ein in Politik und Wirtschaft viel diskutiertes Thema. Hier findet sich also eine Übereinstimmung mit dem Beutelsbacher Konsens und die Relevanz des Themas für den Unterricht wird weiter betont. [7, 8] Das Thema (Mikro-)Plastik wird in dieser Broschüre durch die Auswahl an Experimenten und insbesondere in Verbindung mit den Aufgaben in den Kontext der Umweltchemie gebracht. Dabei haben die einzelnen Experimente ebenfalls einen starken Lehrplanbezug in Klassenstufe 11 und 12 (erweitertes Anforderungsniveau). Im Lehrplan wird vorgeschrieben, dass die Lernenden im Schülerexperiment einen Kunststoff herstellen können. Als Beispiel wird ebenfalls Nylon (Polyamid 6.6) explizit aufgeführt (vgl. V1). Des Weiteren können die Lernenden Eigenschaften von Kunststoffen untersuchen. Beispielhaft werden die Dichte im Vergleich zu Wasser (vgl. V2) und die Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen genannt (vgl. V3). Die Untersuchung von Quellen von Mikroplastik wird zwar nicht explizit im Lehrplan genannt, ist jedoch, um das Thema in seiner Vielfalt und mit seinem hohen Alltagsbezug vollständig abzudecken, sehr gut geeignet. Bereiche aus diesem Themenkomplex finden ebenfalls Bezug zum Thüringer Lehrplan des Wahlpflichtfachs Naturwissenschaften und Technik in den Klassenstufen 9 und 10 in den folgenden Modulen: "ökonomisches und ökologisches Verpacken", "Umgang mit Abfällen" und "Kunststoffe im Alltag". [7, 9]

Als übergeordnete Lernziele ergeben sich im Bereich der Sachkompetenzen die folgenden Lernziele:

- Die Lernenden können das Thema Kunststoffe ((Mikro-)Plastik) vielfältig im Kontext und mit Bezug zur Umweltchemie erläutern. Die Lernenden können Eigenschaften, Quellen und Lösungsansätze in diesem Themenbereich erklären und begründen.

Als übergeordnetes Lernziel ergibt sich im Bereich der Selbst- und Sozialkompetenzen das folgende Lernziel:

- Die Lernenden können mit Hilfe ihres Wissens im Bereich der Kunststoffchemie Verhaltensweisen für das eigene Handeln ableiten und verschiedene Lösungsstrategien diskutieren.



V1 Herstellung von Nylon

Beobachtungen:**Aufgabe 1**

Alle Feststoffe lösten sich in den entsprechenden Lösemitteln vollständig auf. Bei der Zugabe von Phenolphthalein zur Lösung in Becherglas 2 färbte sich die gesamte Lösung violett.

Bei dem Überschichten der Lösung kam es nicht zur Vermischung der Lösungen. Lösung 2 (violett) war hierbei unten und Lösung 1 (farblos) oben (vgl. Abb. 3). Zwischen den beiden Lösungen bildete sich eine feste Phasengrenzschicht, welche auf einen Glasstab aufgewickelt werden konnte. Dabei bildete sich die Grenzschicht immer wieder nach und es entstand ein langer, violetter Faden.

Auswertung:**Aufgabe 2**

Reaktionsgleichung:

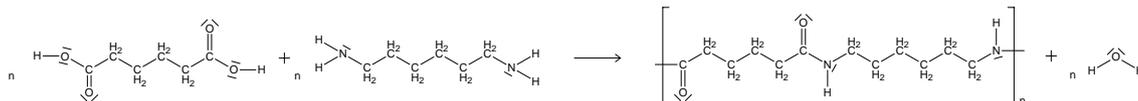


Abbildung 10 Reaktionsgleichung der Bildung von Polyamid 6.6

Die Ziffer 6.6 steht jeweils für die Anzahl an Kohlenstoffatomen, welche von den einzelnen Edukten „beigesteuert“ werden. Im Polyamid 6.6 finden sich diese Kohlenstoffatome zwischen den jeweiligen Amidbindungen wieder.

Aufgabe 3

Aus der Struktur lässt sich ableiten, dass sich langkettige Makromoleküle ohne Verzweigungen bilden. Von großer Bedeutung sind die intermolekularen Wechselwirkungen in Form von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Sauerstoffatomen und den Wasserstoffatomen zweier Amidgruppen unterschiedlicher Moleküle. Denkbar sind somit parallele Stränge von Polyamid 6.6-Molekülen, welche über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander vernetzt sind.

Diese besondere Struktur deutet auf eine gute Elastizität hin. Diese ist dadurch bedingt, dass bei mechanischer Belastung, die im Vergleich zu kovalenten Bindungen schwächeren Wasserstoffbrückenbindungen bereits überwunden werden. Wird die Krafteinwirkung wieder gestoppt, so kommt es erneut zur Bildung der Wasserstoffbrückenbindungen. Ebenfalls wichtig ist die Reißfestigkeit. Diese begründet sich durch die starken kovalenten Bindungen in den einzelnen Molekülen und zusätzlich dadurch, dass viele Fasern miteinander versponnen werden.

Die Verwendung in Kleidung, vor allem Sportbekleidung und Damenstrümpfen, liegt hier nahe. Beim Sport ist Bekleidung hohen Belastungen ausgesetzt, gleichzeitig soll eine optimale Bewegungsfreiheit





gegeben sein. Als Beispiel dient hier ein Funktionsshirt. Die Verwendung von Polyamid 6.6 ist somit naheliegend, da es sowohl elastisch (Bewegungsfreiheit) als auch reißfest (hohe Belastung) ist. Beide Eigenschaften können auch im Kontext des Damenstrumpfes diskutiert werden. Hierbei soll der Strumpf möglichst eng am Fuß und am Bein anliegen, was durch einen elastischen Stoff gewährleistet werden kann. Auch hier muss das verwendete Material reißfest sein. Einerseits um der Belastung beim Anziehen und andererseits um anderen unvorhergesehenen Einwirkungen Stand zu halten (Prävention der Bildung von Löchern und Laufmaschen).

Das Nutzen von Nylon bei Gitarrensaiten veranschaulicht die Reißfestigkeit. Die Gitarrensaiten sind mit einer äußerst hohen Zugkraft gespannt, um dann durch Schwingung einen Ton zu erzeugen.

Didaktischer Kommentar:

Im Versuch *Herstellung von Nylon* führen die Lernenden die Herstellung von Polyamid 6.6 durch. Dabei wird einerseits auf die Reaktion und die experimentelle Durchführung, andererseits auf den zu bewertenden Alltagsgebrauch hoher Wert gelegt. Es ergeben sich die folgenden Lernziele:

- Die Lernenden können im Experiment Polyamid 6.6 (Nylon) herstellen und entsprechende Reaktionsgleichungen zur Polykondensation aufstellen. (Sachkompetenz)
- Die Lernenden können Eigenschaften aus der Struktur des Polyamid 6.6 ableiten und die Verwendung bezugnehmend auf die Eigenschaften bewerten. (Sachkompetenz, Selbst- und Sozialkompetenz)

Praktisch-experimentelle Beurteilung

Die Durchführung des Versuchs ist prinzipiell einfacher Natur und sollte für im Chemieunterricht und Experimentieren fortgeschrittene Lernende zügig durchführbar sein. Die Chemikalien sowie die Materialien finden sich in der Grundausstattung der meisten Schulen. Zwar muss für die Verwendung von Hexamethyldiamin eine Ersatzstoffprüfung durchgeführt werden, jedoch ist die Chemikalie in Hinblick auf diesen Versuch nicht ersetzbar. Ebenfalls ist das Abwiegen von Natriumhydroxid in Form von Kugeln teilweise schwer, da die Kugeln häufig vom Spatel rutschen. Aufgrund der damit verbundenen Gefahr sollte entweder ein tiefer Löffel bereitgestellt werden oder die Lehrkraft bereitet die Einwaage an Natriumhydroxid für die Lernenden vor.

Dies hätte ebenfalls den Vorteil, dass, falls nur eine Feinwaage vorhanden ist, weniger Zeit für das Abwiegen der Chemikalien benötigt wird.





Das Aufwickeln des Fadens (Produkt) klappt in den meisten Fällen problemlos, jedoch kann anstelle eines Glasstabs ein hohes Becherglas verwendet werden. Das Produkt kann nun von links nach rechts gewickelt, besser untersucht werden und besser trocknen.

Didaktische Beurteilung

Der Versuch ist explizit im Thüringer Lehrplan für Chemie an Gymnasien von 2012 in der Klassenstufe 12 (EA) erwähnt. Hierbei ist der Versuch als Schülerexperiment durchzuführen. Die Durchführung des Versuchs eignet sich für eine Partner- oder Gruppenarbeit. Aufgrund des deutlichen Effekts ist auch die Durchführung als Lehrerdemonstrationsexperiment im Kontext einer Projektwoche in anderen Klassenstufen denkbar. Aufgrund des benötigten Vorwissens zur selbstständigen Bearbeitung der Aufgaben eignet sich der Versuch eher als Bestätigungsexperiment (im Sinne von: Bildung synthetischer makromolekularer Stoffe durch Polykondensation) und nicht als Einstiegsexperiment. Wird der Versuch losgelöst von den Aufgaben betrachtet, so kann dieser auch als Einstiegsexperiment verwendet werden.

Im Falle der Nutzung als Bestätigungsexperiment benötigen die Lernenden Vorwissen über die Zusammenhänge von Struktur und Eigenschaften von Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren und die damit zusammenhängende Unterscheidung dieser Kunststoffarten. Des Weiteren sollten die Lernenden Polykondensationen und typische Eigenschaften anhand der Struktur erklären können.

Als Anschluss zu diesem Versuch eignen sich weitere Versuche zur Herstellung von Kunststoffen. Ebenfalls eignet sich die Eingliederung in den Kontext der Umweltchemie (Thema: Plastik in der Umwelt). Über einen theoretischen Input zum Eintrag von Plastik in die Umwelt kann zu den anderen Experimenten dieser Serie übergeleitet werden.





V2 Dichtebestimmung von Kunststoffen

Beobachtungen:**Aufgabe 1**

Reihenfolge des Auftauchens der Proben mit vorgeschlagenen Messergebnissen des Aräometers:

- Polyethylen (PE) schwimmt bereits im Leitungswasser
- Polystyrol (PS) 1,05 g/cm³
- Polymethylmethacrylat (PMMA)
- Polyvinylchlorid (PVC)
- Phenoplast
- Polyester

Da der Versuch nicht im Labor im Präsenzformat durchgeführt werden konnte, können keine detaillierten Messwerte eines Aräometers aufgezählt werden.

Auswertung:**Aufgabe 2**

Bis auf das Polyethylen schwimmt keine der Kunststoffproben in Süßwasser. Somit werden diese Kunststoffe in der Natur am Grund von Flüssen transportiert und sind damit für das menschliche Auge nicht sichtbar. Der Plastikmüll wird nun in den Flüssen in Richtung der Ozeane transportiert. In diesen finden wir in der Regel Wasser mit einem erhöhten Salzgehalt. Dieser hat zur Folge, dass nun auch dichtere Kunststoffe wie Polyvinylchlorid schwimmfähig werden und nun an der Oberfläche auftauchen. Die nun an der Oberfläche befindlichen Kunststoffe treiben mit den Strömungen über die Ozeane und bilden nach und nach die sogenannten Müllinseln.

Aufgabe 3

Rettungswesten sollten unabhängig vom Einsatzgebiet (Salz- oder Süßwasser) ausreichend Auftrieb bieten. Somit sollte ein Kunststoff gewählt werden, welcher bereits im Süßwasser eine gute Schwimmfähigkeit aufweist. Aus den vorliegenden Proben eignet sich Polyethylen am besten.

Didaktischer Kommentar:

In diesem Versuch untersuchen die Lernenden verschiedene Kunststoffe hinsichtlich deren Dichte. Dies geschieht im direkten Vergleich der Dichte der Kunststoffe zu der Dichte einer Salzlösung. Hierbei wird die Konzentration der Salzlösung stetig erhöht. Die Lernenden sollen im Anschluss die Ergebnisse verwenden, um verschiedene alltagbezogene Problemstellung zu erklären. Es ergeben sich die folgenden Lernziele:





- Die Lernenden können im Experiment verschiedene Kunststoffe auf ihre Dichte untersuchen und mit den Ergebnissen der Untersuchungen Alltagsprobleme (z.B.: die Bildung von Müllinseln) erklären.
- Die Lernenden können aus den Eigenschaften Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten. (Selbst- und Sozialkompetenz)

Praktisch-experimentelle Beurteilung

Die verschiedenen Dichten der jeweiligen Kunststoffproben lassen sich in diesem Versuch mit einfachen Mitteln sehr gut beobachten. Ebenfalls werden im Experiment ausschließlich ungefährliche Alltagschemikalien wie Salz, Wasser und Spülmittel verwendet und es muss somit nur der Sicherheitshinweis für die Vermeidung des Herunterfallens von Glasgeräten ausgesprochen werden.

Bei der Auswahl der Kunststoffproben muss darauf geachtet werden, dass diese ein möglichst großes Spektrum an verschiedenen Dichten abbilden, um den optischen Effekt des Versuchs zu vergrößern.

Didaktische Beurteilung

Der Lehrplan für das Fach Chemie in der Qualifikationsphase der Thüringer Oberstufe sieht für die Untersuchung der Dichte von Kunststoffen im Vergleich mit der Dichte des Wassers im Punkt 4.5 „Natürliche und künstliche Makromolekulare“ ein explizites Schülerexperiment zur Untersuchung der Dichte von Kunststoffen im Vergleich zu der von Wasser vor. Weiterhin werden hier die Untersuchung von Kunststoffen auf Hitzeeinwirkungen sowie auf die Löslichkeit und Beständigkeit gegenüber verschiedenen Chemikalien genannt. Somit wird dem hier diskutierten Experiment zur Dichtebestimmung im Lehrplan eine besondere Rolle zugeschrieben.

Die Lernenden müssen für diesen Versuch einerseits das Wissen zur physikalischen Größe Dichte aus dem Physikunterricht der Klassenstufe 7/8 mitbringen und andererseits das Wissen zur Dichteänderung von Salzlösungen bei verschiedenen Konzentrationen. Für die Bearbeitung der Zusatzaufgabe, dem Messen der Dichte mittels Aräometer, benötigen die Lernenden kein weiteres Vorwissen, da in der Versuchsanleitung der Umgang mit einem solchen Messgerät erklärt wird. Neben diesen Sachkompetenzen benötigen die Lernenden Kompetenzen im gewissenhaften wissenschaftlichen Experimentieren sowie im Protokollieren von Beobachtungen.

Der hier diskutierte Versuch eignet sich aus der Perspektive der Größe des Erkenntnisgewinns sowie aus der Perspektive des Lehrplans vor allem als Schülerexperiment. Somit sollte das Experiment in einer Erarbeitungsphase im Unterricht eingeordnet werden und kann in Partner- oder Gruppenarbeit





durchgeführt werden. Der Versuch eignet sich nicht als Einstiegs- oder Abschlussexperiment, da er, losgelöst von den Aufgaben, keinen besonderen kognitiven Konflikt auslöst, sowie auch keinen sehr beeindruckenden Effekt zeigt. Durch die Aufgabenstellung wird jedoch ein kognitiver Konflikt erzeugt (Plastik schwimmt in Flüssen nicht an der Oberfläche, aber in Ozeanen schon) und das Experiment wird zur Erklärung der Aussage verwendet. Neben der expliziten Erwähnung im Lehrplan wird die Durchführung des Experiments auch von der Einfachheit und dem geringen Zeitaufwand unterstützt.

Als Anschluss an das Experiment eignet sich die weitere Einordnung in den Kontext der Umweltchemie (Plastik in der Umwelt). Insbesondere eignet sich das Thema Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen (siehe V3). Dieser Ablauf folgt dem Weg, welcher Plastik im Gesamtkontext als Gefahr für die Umwelt darstellt und ist deshalb logisch.



V3 Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen

Beobachtungen:

Aufgabe 1 und Aufgabe 2

Da der Versuch nicht im Labor im Präsenzformat durchgeführt werden konnte, können keine detaillierten Beobachtungen aufgezählt werden.

Jedoch ist zu vermuten, dass sich die Oberflächen der Kunststoffe durch die Einwirkung der Chemikalien nur wenig bis gar nicht verändern.

Auswertung:

Aufgabe 3

Aus den Beobachtungen kann abgeleitet werden, dass die verwendeten Kunststoffe sehr chemikalienbeständig sind. Dieser Punkt ist äußerst relevant für die Umwelt. Gelangen Kunststoffe in die Umwelt, kann es sehr lange dauern bis sich diese zersetzen oder auflösen. Aufgrund dieser langen Zeit, die die Kunststoffe in der Umwelt verbleiben, haben sie großes Potential Schaden anzurichten (z.B.: Verhungern von Tieren oder Eingeschränkte Jagd- und Fressfähigkeiten durch Verfangen in z.B. Netzen) und umweltverschmutzend zu wirken. Beispiele sind Plastikteppiche auf den Ozeanen, die Anlagerung und Anreicherung von gesundheitsschädlichen Chemikalien und Schwermetallen an den Kunststoffen. Durch Bioakkumulation können zum Beispiel Kunststoffe in Form von Mikroplastik



in den menschlichen Körper gelangen oder sich schon vorher in der Nahrungskette negativ auf das Wohlergehen der Tiere auswirken.

Aufgabe 4

- fachgerechte Entsorgung von Plastikmüll
 - Mülltrennung muss beachtet werden, damit Plastik tatsächlich recycelt werden kann
 - keine Entsorgung von Plastik im Wald, Fluss und an sonstigen Orten in der Natur (Littering). Ist man in der Natur, kann beispielsweise eine kleine Mülltüte mitgenommen werden, um einerseits den eigenen Müll, andererseits aber auch den liegengelassenen Müll anderer einzusammeln.
- Kaufverhalten anpassen, um (für sich) weniger Plastik in den Müllkreislauf zu bringen
 - Einwegprodukte (und auch Mehrwegprodukte) aus Plastik vermeiden, Alternativen nutzen: Kaffeebecher aus Emaille oder Bambus, Bambuszahnbürsten etc.
 - mikroplastikfreie Kosmetik kaufen
 - Obst und Gemüse in wiederverwendbaren (plastikfreien) Netzen kaufen (nicht Einwegbeutel), loses Obst und Gemüse kaufen
 - Unverpackt-Läden nutzen

Didaktischer Kommentar:

Dieser Versuch soll die Beständigkeit von Kunststoffen und die Bedeutung und Folgen dieser Beständigkeit für die Umwelt betonen. Die Lernenden sollen anhand der Beobachtungen Rückschlüsse für ihr eigenes Handeln ziehen. Es ergibt sich das folgende Lernziel:

- Die Lernenden können die Gefährlichkeit von Kunststoffen in Bezug auf die Beständigkeit erklären und daraus Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten. (Selbst- und Sozialkompetenz)

Um die Wichtigkeit der gewonnenen Erkenntnisse für das eigene Handeln weiter zu unterstreichen, bietet es sich an, die Auswirkungen von Plastik auf die Umwelt in theoretischer Hinsicht weiter auszubauen. Es eignet sich auch ein Anschluss über die Problematik des schweren Herausfilterns von (Mikro-)Plastik aus der Umwelt und das Aufzeigen weiterer Auswirkungen, wie zum Beispiel die Bioakkumulation und das Anlagern gesundheitsschädlicher Stoffe für Mensch und Tier.

Praktisch-experimentelle Beurteilung

Die Durchführung des Versuchs ist sehr einfacher Natur, wodurch sie von jedem Lernenden mit etwas Erfahrung im Bereich des Experimentierens durchgeführt werden kann. Die benötigten Materialien und Chemikalien finden sich in jeder Grundausstattung von Schulen. Verschiedene





Plastikproben können von den Lernenden selbst mitgebracht werden. Es ist äußerst wichtig die Lernenden vor dem Experimentieren auf die Gefahren beim Umgang mit den verschiedenen Säuren und Basen hinzuweisen.

Der Versuch zeigt prinzipiell und aufgrund seiner einfachen Durchführbarkeit keine Fehlerquellen auf. Eine denkbare Fehlerquelle liegt jedoch bei den Lernenden, welche bei der Beobachtung davon ausgehen könnten, dass sie beim Experimentieren etwas falsch gemacht haben, da es ja im optimalen Fall zu keiner Reaktion der Lösungen mit den Kunststoffen kommen soll. In Verbindung mit einer geschickten Einleitung zur Chemikalienbeständigkeit von Kunststoffen und den gestellten Aufgaben kann dieser Zweifel minimiert werden.

Um sicherzustellen, dass es tatsächlich nur zu minimalen oder gar keinen Veränderungen an der Oberfläche der Kunststoffe kommt, sollte darauf geachtet werden, dass Chemikalien auch über circa drei Minuten auf der Oberfläche des Kunststoffes verbleiben.

Didaktische Beurteilung

Dieser Versuch lässt sich, wie auch die vorangegangenen Versuche, in den Thüringer Lehrplan für Chemie an Gymnasien von 2012 in der Klassenstufe 12 (EA) in das Themengebiet der Kunststoffe einordnen. Wie in V2 erwähnt eignet sich der Versuch als Anschluss und somit als Erarbeitungs- und Bestätigungsexperiment. Aufgrund der Einfachheit und der zeitlich schnellen Durchführbarkeit eignet sich das Experiment jedoch auch als Einstiegsexperiment in das Themengebiet der Kunststoffe. Zusätzlich kann, mit Hilfe des Versuchs, die besondere Bedeutung der Chemikalienbeständigkeit, ohne tiefgründige Betrachtung der molekularen Ebene der Kunststoffe, erarbeitet werden und dadurch die Relevanz des Themas Kunststoffe und deren Einwirkung und Auswirkung auf die Umwelt erörtert werden.

Das benötigte Vorwissen beschränkt sich hierbei auf alltägliches Wissen über Kunststoffe. Es ist somit wichtig zu wissen, dass Kunststoffe uns täglich in großer Menge begleiten. Des Weiteren ist es wichtig, dass die Lernenden Vorwissen über die Reaktionen der verwendeten Chemikalien haben. Wissen darüber, dass die verwendeten Chemikalien mit vielen Materialien stark reagieren verstärkt den beobachtbaren Effekt.

Das Experiment eignet sich aufgrund der eben genannten Punkte vor allem als Schülerexperiment. Wichtig ist dabei, auf die Gefahren der verwendeten Chemikalien hinzuweisen (insbesondere, wenn konzentrierte Säuren verwendet werden). Nichtsdestotrotz kann das Experiment auch problemlos als Lehrerdemonstrationsexperiment durchgeführt werden. Hierbei muss aber einerseits auf eine gute Sichtbarkeit für alle Lernenden geachtet werden. Andererseits kann aufgrund des





„fehlenden“ optischen Effekts und einer Wartezeit von circa drei Minuten das Experiment als Lehrerdemonstrationsexperiment schnell Langeweile hervorrufen. Es ist zu überlegen, in der verfügbaren Zeit dann Reaktionen (gerne Extremfälle, welche einen gut sichtbaren Effekt haben) der einzelnen Chemikalien durchzuführen. Dies unterstreicht die Chemikalienbeständigkeit der Kunststoffe.

Im Anschluss eignen sich weitere Eigenschaftsuntersuchungen von Kunststoffen. Ein Beispiel (Dichte) findet sich in Versuch 2. Des Weiteren kann man sich, nach dem Einstieg in die Kunststoffchemie, am Lehrplan orientieren. Das Experiment hat einen Bezug zum Lehrplan im Unterpunkt der Eigenschaften von Kunststoffen.



V4 Wir untersuchen Quellen von Mikroplastik

Beobachtungen:

Aufgabe 1

Während der Teefilter mit Wasser durchgespült wurde, wurde das Wasser, welches aus dem Teebeutel kam, mit zunehmender Zeit immer klarer. In allen vier Proben konnten kleine, pulverartige Partikel gefunden werden. Im Waschpulver war ein Teil dieser Partikel blau und kugelförmig und ein anderer Teil weiß und ähnelte Sandkörnern. Die Partikel in den Peeling-Cremes sind weiß gefärbt und haben eine flache Form mit vielen Ecken. Die Partikel in der Zahnpasta sind weiß, blau oder rot gefärbt. Die Form ist hier ebenfalls flach und vieleckig.

Auswertung:

Aufgabe 2

Die Probenmasse betrug jeweils 10 g.

Das Filtrat der Waschmittelprobe weist eine Masse von 3 g auf. Wird dieser Wert nun auf die gesamte Packung ($m = 6,5 \text{ kg}$) hochgerechnet, sind in einer Packung dieses Waschmittels etwa 1,9 kg Mikroplastik enthalten. Das Filtrat der ersten Peeling-Creme wiegt 1 g. Da die Gesamtmasse an Creme in der Dose 50 g beträgt, sind darin etwa 5 g Mikroplastik enthalten. Das Filtrat der zweiten Peeling-Creme wiegt 2 g. Da die Gesamtmasse der Creme 100 g beträgt, sind darin etwa 20 g Mikroplastik enthalten. Im letzten Filtrat (Zahnpasta) konnten Partikel mit einer Masse von 0,5 g gefunden werden. Da die Masse der Zahnpasta 75 g beträgt, sind 3,75 g Mikroplastik enthalten.

Aufgabe 3





Auf der einen Seite hat Mikroplastik in Alltagsprodukten viele Funktionen. So bringt Mikroplastik Duschgel zum stärkeren Schäumen und Glänzen oder funktioniert als „Schleifmittel“ in Peeling-Cremes. Im Vergleich zu biologisch abbaubaren Ersatzstoffen ist die Herstellung kostengünstiger. Des Weiteren kann Mikroplastik maßgeschneidert an die gewünschten Funktionen angepasst werden. Auf der anderen Seite gibt es aber sehr viele Nachteile von Mikroplastik. Einer der relevantesten Punkt ist, dass durch die Entsorgung der Produkte nach Gebrauch eine große Menge an Mikroplastik in das Abwasser gelangt. Dies kann bei Cremes zum Beispiel durch das Abwaschen geschehen oder durch den Waschvorgang von Kleidung mit mikroplastikhaltigem Waschmittel. Bei der Klärung wird Mikroplastik nur schlecht ausfiltriert und gelangt anschließend in die Umwelt. Da viele Arten von Plastik sehr beständig sind, lassen sie sich schlecht abbauen und reichern sich folglich immer mehr an (Bsp.: Bioakkumulation). Ebenfalls ist Mikroplastik aufgrund seiner Struktur ein guter Träger für organische Schadstoffe, welche dann über die eben erwähnte Bioakkumulation in hoher Konzentration in die Nahrungskette gelangen. Weiterhin sind Additive verarbeitet, die im Plastik für die Langlebigkeit sorgen. Diese führen teilweise zu negativen Reaktionen bei vielen Lebewesen, da sie in das Blut oder in die Organe gelangen können. Mögliche Folgen sind physiologische Störungen oder Entzündungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das verarbeitete Mikroplastik in verschiedenen Alltagsprodukten zwar viele Vorteile hinsichtlich der Funktion und niedrigeren Preise hat, jedoch die negativen, schädlichen Punkte für die Umwelt überwiegen. Da es mittlerweile viele gute Alternativprodukte gibt, welche ähnliche Wirkungen erzielen und zusätzlich biologisch abbaubar sind, sollte darauf geachtet werden, mikroplastikfreie Produkte zu verwenden.

Didaktischer Kommentar:

Im Versuch sollen Lernende erkennen, dass sich Mikroplastik tatsächlich in verschiedenen Alltagsprodukten wiederfindet und es einfach ist, dieses von den anderen Chemikalien zu trennen und somit nachzuweisen. Den Lernenden wird verdeutlicht, dass die Masse an Mikroplastik in Alltagsprodukten nicht zu vernachlässigen ist. Durch den gut sichtbaren Effekt kann die Relevanz des Themas „(Mikro)Plastik in der Umwelt“ betont werden und kritische Denkprozesse angeregt werden. Es ergeben sich die folgenden Lernziele:

- Die Lernenden können im Schülerexperiment Mikroplastik in alltäglichen Substanzen nachweisen. (Sachkompetenz)
- Die Lernenden können Verhaltensweisen für das eigene Handeln (Umgang mit und Entsorgung von Plastik) ableiten. (Selbst- und Sozialkompetenz)



**Praktisch-experimentelle Beurteilung**

Das oben beschriebene Experiment lässt sich einfach und zügig durchführen. Hierbei werden keine besonderen experimentellen Fähigkeiten benötigt und es bestehen keine Gefahren für die Lernenden.

Es können sich beim Experimentieren einige Schwierigkeiten ergeben: es sollte vermieden werden, dass der Filter Löcher oder Risse besitzt, da sonst beim Durchspülen die zu untersuchenden Partikel austreten können. Weiterhin muss darauf geachtet werden, dass nur Produkte verwendet werden, welche Mikroplastik in fester Form enthalten. Werden Produkte mit flüssigen Kunststoffen verwendet, werden diese mit ausgespült, wodurch die gewünschte Beobachtung ausgeschlossen ist. Eine mögliche Fehlerquelle während des Versuchs liegt weiterhin darin, dass Partikel im Teefilter aufgrund der Farbe (weiß) nicht gesehen werden. Dies kann vermieden werden, indem die Lernenden vor Beginn des Versuchs darauf hingewiesen werden, dass auch ein weißer Feststoff als Produkt anfallen kann. Ebenfalls kann dieser Fehler vermieden werden, indem nur Produkte verwendet werden, die farbige Partikel enthalten.

Zum Ausspülen werden Waschbecken benötigt. Der Versuch eignet sich daher als Gruppenarbeit. Es ist auch möglich die Proben in der Klasse aufzuteilen, um anschließend einen gemeinsamen Vergleich durchzuführen.

Didaktische Beurteilung

Da für die Auswertung des Versuchs viel Vorwissen in den Bereichen der Auswirkungen, der Quellen in Alltagsprodukten und der Eintrags- und Verbreitungsmöglichkeiten vorausgesetzt wird, kann der Versuch am Ende der Unterrichtsreihe „Kunststoffe“ (EA Jahrgangsstufe 12) durchgeführt werden. Mit einer reduzierten Form der Auswertung ist es denkbar, den Versuch im MNT-Unterricht (Modul 5: „Das Leben in einem Lebensraum - Auswirkungen von Veränderungen.“ [10]) und NAWUT-Unterricht (siehe III.) durchzuführen. Insbesondere im MNT-Unterricht soll „der Sachgerechte Umgang mit Lupe und Mikroskop geübt werden“ [10]. Ebenfalls benötigen die Lernenden ein breites Vorwissen an Funktionen und Verwendung von Plastik und vor allem Mikroplastik für diesen Versuch.

In Verbindung mit den vorgeschlagenen Aufgaben dient der Versuch hierbei also hauptsächlich als Bestätigungsversuch. Aufgrund der schlechten Sichtbarkeit des Mikroplastiks sollte der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt werden. Jedoch kann die Lehrkraft weitere anschauliche Proben und Nachweise von Mikroplastik vorbereiten und in Verbindung mit dem Versuch zeigen (z. B.: aus einer gesamten Packung Waschpulver/Creme das Mikroplastik filtrieren (Referenz)). Je nach





Klassengröße und vor allem zur Verfügung stehenden Waschbecken eignet sich das Experiment als Einzel- oder Gruppenarbeit (siehe oben).

Der optische Effekt des Versuchs ist sehr deutlich und klar erkennbar. Ein „Aha-Effekt“ wird dadurch erzeugt, dass die Lernenden nach dem Spülen und Trocknen nur das Mikroplastik sehen. Ein kognitiver Konflikt kann bei den folgenden Fragen, welche in den Aufgaben geklärt werden (und bei noch nicht verknüpftem Wissen), entstehen: „Warum ist Mikroplastik in unsere Alltagsprodukten? Überwiegen die Vorteile gegenüber den Nachteilen?“

Das Experiment kann alternativ auch als Modellexperiment von der Lehrkraft durchgeführt werden. Dabei zeigt der Lehrende den Prozess des Filtrierens und gibt anschließend die Proben von Mikroplastik durch die Klasse. Es bietet sich hier an, nicht nur 10 g der Probe zu filtrieren, sondern das gesamte Volumen. Dadurch wird die Sichtbarkeit verbessert. Ebenfalls eignet sich als Anschluss die Untersuchung des Mikroplastiks auf die Chemikalienbeständigkeit (vgl. V3), falls das Experiment vorher noch nicht durchgeführt wurde.



IV. Referenzen

- [1] GESAMP (2010, IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection); Bowmer, T. and Kershaw, P.J., 2010 (Eds.), Proceedings of the GESAMP International Workshop on plastic particles as a vector in transporting persistent, bio-accumulating and toxic substances in the oceans. GESAMP Rep. Stud. No. 82, 68pp.
- [2] Imhof, H.K., Ivleva, N.P., Schmid, J., Niessner, R. & Laforsch, C. (2013). Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. *Current Biology* 23 (19): 867–868.
- [3] Liebmann, B., Brielmann, H., Heinfellner, H., Hohenblum, P., Köppel, S., Schaden, S. & Uhl, M. (2015). Mikroplastik in der Umwelt - Vorkommen, Nachweis und Handlungsbedarf. Umweltbundesamt GmbH: Wien.
- [4] Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. (G. M. IUCN, Hrsg.) Gland, Schweiz.
- [5] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2021). Einweg-Plastik wird verboten. Abgerufen: 24. Februar 2021, von <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/einwegplastik-wird-verboden-1763390>.
- [6] Verband der Chemischen Industrie e.V. (2012). Textilchemie-Versuche. Abgerufen: 22. Februar 2021, von <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/textilchemie-versuche.pdf>.
- [7] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife – Chemie.
- [8] Bundeszentrale für politische Bildung (2011). Beutelsbacher Konsens. Abgerufen: 24. Februar 2021, von <https://www.bpb.de/die-bpb/51310/beutelsbacher-konsens>.
- [9] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2018). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife – Wahlpflichtfach Naturwissenschaften und Technik.
- [10] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2015). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife – Mensch-Natur-Technik.

Quellenverzeichnis der Abbildungen

- Seite 8: A. Hirth, D. Wöhrle, Schülerlabor Chemie – Kunststoffe, <https://www.yumpu.com/de/document/view/22008859/kunststoffe-chemie-und-ihre-didaktik-universitat-wuppertal/3> (24.02.2021).
- Seite 9: Wikipedia Aräometer, <https://de.wikipedia.org/wiki/Aräometer#/media/Datei:Aräometer-thermometer.jpg> (24.02.2021).
- Seite 10: Chemieexperimente.de, http://www.chemieexperimente.de/exp-19_04.html (verändert) (27.01.2021).
- Seite 12: Colourbox, <https://www.colourbox.de/vektor/wasserhahn-vektor-5815200> (verändert) (27.01.2021).
- Seite 12: Pinterest, <https://www.pinterest.de/pin/466263367669234768/> (27.01.2021).



6. Müllverbrennung/ Recycling (Maximilian Köthe, Johannes Mittag)

I. Sachinformation

1. Müllverbrennung und Recycling

Bei Kunststoffen handelt es sich um Werkstoffe, welche zum größten Teil aus Makromolekülen bestehen. Diese können in natürliche und synthetische makromolekulare Stoffe unterteilt werden. Der Begriff Kunststoffe umfasst dabei die synthetisch erzeugten Polymere. Da diese in der modernen Gesellschaft in großem Stil und in praktisch allen Bereichen genutzt werden, fällt eine entsprechend große Menge Müll an. Aufgrund der Knappheit von Ressourcen und der mit den Kunststoffen verbundenen Umweltproblematik kommt der Verwertung der Abfälle und damit vor allem dem Recycling, eine wichtige Rolle zu. Ziel dieser stofflichen Wiederverwertung ist es, durch die Trennung und Aufbereitung von Kunststoffmüll diesen wieder nutzbar zu machen. So kann einerseits die Masse an Müll, die durch unsachgemäßen Umgang oft in der Umwelt endet und dort verschiedenste Ökosysteme bedroht, reduziert werden. Andererseits schont die Wiederverwendung von Kunststoffen Ressourcen wie Erdöl, was der zentrale Rohstoff für deren Produktion ist. Sie kann sowohl durch das Umsetzen der Abfälle in Rohstoffe oder durch eine direkte Aufarbeitung dieser zu neuen Produkten erfolgen. Neben dem Recycling als Rückführung von Abfällen in den Stoffkreislauf spielt auch die Verbrennung von Kunststoffmüll eine Rolle in der Entsorgung. Diese wird als energetische Wiederverwertung bezeichnet, da hier nicht die erneute Verwendung der Stoffe, sondern ihre Umsetzung in elektrischen Strom angestrebt wird. Die Reduzierung des Mülls steht auch hier im Vordergrund. [1]

1.1 Klassifizierung von Kunststoffen

Die Unterteilung von Kunststoffen findet anhand ihrer makroskopischen Strukturen statt. Von diesen leiten sich für die jeweiligen Gruppen charakteristische Eigenschaften ab. Aufgrund dieser finden sie unterschiedliche Anwendungen. Auf diesem Weg lassen sich Kunststoffe in drei Gruppen unterteilen: Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere.

Die Klasse der Thermoplaste ist gekennzeichnet durch eine Struktur von verzweigten fadenförmigen Molekülen. Diese können sowohl als nichtkristalline Makromoleküle vorliegen, wobei sie eine verknäulte Struktur aufweisen, als auch als kristalline. In letzterer Form liegen sie regelmäßig und parallel vor. Erhitzt man Thermoplaste, werden die Moleküle beweglicher und können aneinander vorbeigleiten. So

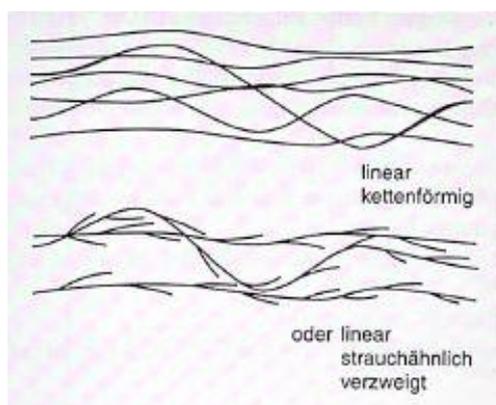
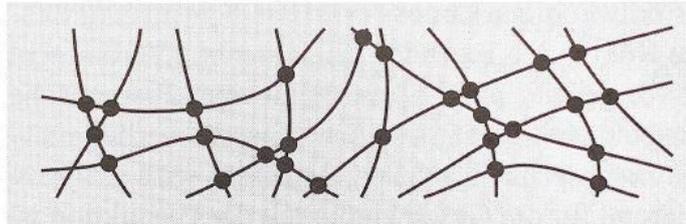


Abb.1: Struktur der Thermoplaste

werden sie beim Erwärmen erst weich und gehen dann bei weiterer Temperaturerhöhung in eine Schmelze über. Danach können sie in eine gewünschte Form gebracht werden und behalten diese nach dem Abkühlen. Die bekanntesten Beispiele dieser Stoffgruppe sind die Polymere Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polystyrol (PS). Außerdem gehören ihr auch kettenförmige Polyester, Polyamide und einige Polyurethane an. Für ihr Recycling ist von Bedeutung, dass bei jedem Erwärmen Abbaureaktionen in den Polymeren stattfinden, die sich negativ auf die mechanische Festigkeit der Werkstoffe auswirken. Sie verlieren deshalb nach der werkstofflichen Wiederverwendung an Qualität.



Duroplaste weisen eine räumlich stark vernetzte Struktur auf. Daraus resultiert, dass durch Erwärmen der Makromoleküle die Beweglichkeit der Einzelmoleküle gesteigert wird, was bei größerer Energiezufuhr zu einem Bruch der Bindungen führt. Durch diese Zersetzung können Duroplaste, im Gegensatz zu Thermoplasten, nicht durch Erhitzen in Form gebracht werden. Das hat zur Folge, dass die endgültige Form eines Produktes schon zum Zeitpunkt der Reaktion der Einzelkomponenten vorgegeben werden muss. Die bekanntesten Vertreter sind Phenol-Formaldehyd-Polykondensate, aus denen Stecker und Steckdosen hergestellt werden, sowie Polyurethane und quervernetzte Polyester, die Einsatz als Isolierschäume finden.

Elastomere sind strukturell durch ungeordnete Makromoleküle gekennzeichnet, die an einigen Stellen miteinander verknüpft sind. Daraus resultiert die Eigenschaft, dass sie durch mechanische Krafteinwirkungen gedehnt und gestaucht werden können, jedoch nicht in der Lage sind, aneinander vorbeizugleiten. Lässt die mechanische Belastung nach, bewegen sich die Makromoleküle zurück in die für sie energetisch günstigere Position. Prominente Beispiele sind Gummi, Polyurethanschäume und Siliconkautschuke. Gummi und Polyurethanschäume müssen, wie die Duroplaste, während der chemischen Reaktion zum Makromolekül ihre Form erhalten, da auch sie sich bei großer Wärmezufuhr zersetzen.

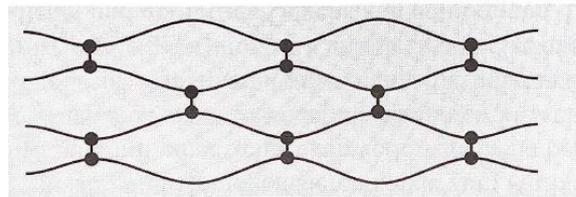


Abb.3: Struktur der Elastomere

Die Polymerlegierungen stellen Verbindungen verschiedener Kunststoffe dar, die je nach Auswahl der Edukte verbesserte Eigenschaften im Vergleich zu den Einzelkomponenten besitzen. So lassen sich beispielsweise Werkstoffe erzeugen, die die elastischen Eigenschaften von Gummi mit thermoplastischer Formbarkeit verbinden. [1]

1.2. Entsorgung von Kunststoffen

Da das Recycling eine sortenreine Trennung der verschiedenen Kunststoffarten voraussetzt, werden diese durch ein Recyclingsymbol in Kombination mit einer Nummer sowie einer Buchstabenkombination gekennzeichnet. Dadurch wird einerseits dem Konsumenten signalisiert, wie er ein Produkt zu entsorgen hat (z.B. gelbe oder blaue Tonne). Gleichmaßen erleichtert der verwendete Code das nachträgliche Sortieren des Mülls und seine Rückführung in den Stoffkreislauf. Das Hauptsymbol besteht aus drei Pfeilen, welche zu einem Dreieck angeordnet sind.

Verpackungsmaterialien aus Kunststoff werden mit den Nummern 01 bis 07 ausgewiesen. Zur Kunststoffgruppe 01 gehört unter anderem PET (Polyethylenterephthalat) und PE (Polyethylen). Typische Vertreter sind PET-Flaschen, Folien, Planen, Tüten oder Haushaltswaren. Diese können über die gelbe Tonne entsorgt und für neue Kunststoffe weiterverarbeitet werden. Weiter wird mit Nummer 02 und 04 zwischen Polyethylen mit hoher oder niedriger Dichte unterschieden (HDPE/LDPE). Der Recyclingcode von PVC (Polyvinylchlorid) ist 03. Dieses verfügt über ein breites Einsatzspektrum und wird beispielsweise zur Herstellung von Bodenbelägen, Fensterrahmen oder Garten- und Campingmöbeln verwendet.

PLASTIC RESIN IDENTIFICATION CODES						
PETE	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTHER
Polyethylene Terephthalate	High Density Polyethylene	Polyvinyl Chloride	Low Density Polyethylene	Polypropylene	Polystyrene	Other
Recyclable	Recyclable	Recyclable at specialist points	Recyclable at specialist points	Recyclable	Recyclable at specialist points	Not easily recyclable

* Check with your local recycling program to confirm which materials are accepted in the recycling bin or at a special drop-off or collection program.

Abb.4: Recycling-Codes der Kunststoffe

Nach der Entsorgung kann es entweder verbrannt werden, um Energie zu gewinnen oder wird durch werk- oder rohstoffliches Recycling in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Mit dem Recyclingcode 05 wird Polypropylen (PP) gekennzeichnet. Es findet am häufigsten Einsatz in der Automobil- und Möbelbranche. Im Vergleich zu Polyethylen ist es fester und wärmebeständiger. Polypropylen wird weiterhin als Kabelummantelung und bei Produkten im Bauwesen verwendet. Vor der Entsorgung eines Produktes in der gelben Tonne sollten Verpackungen von etwaigen Verschmutzungen befreit und entleert werden, um ein einfacheres Recycling zu gewährleisten. Polystyrol (PS) ist mit dem Code 06 gekennzeichnet und wird überwiegend in der Lebensmittelindustrie als Verpackungsmaterial eingesetzt (z.B. Joghurtbecher, Kaffeesahne, etc.). Weiterhin ist es ein bedeutender Kunststoff für Gebäudeisierungen, z. B. als Schaumstoff zur Dämmung von Gebäuden. Der private Endverbraucher kann es über die gelbe Tonne oder über Wertstoffhöfe

entsorgen. Auf den letzten Recyclingbereich verweist die Nummer 07, welche sich auf andere, meist schwer zu recycelnde Kunststoffe bezieht. [5]

1.3. Recycling von Kunststoffen

Zur Wiederverwendung von Kunststoffen wurden, den unterschiedlichen Eigenschaften der Untergruppen geschuldet, verschiedenste Methoden entwickelt. Diese teilen sich in werk- und rohstoffliches Recycling, sowie energetische Verwertung von Kunststoffabfällen. Zum Werkstofflichen Recycling gehören überwiegend geschlossene Stoffkreisläufe ohne stoffliche Umwandlung, d.h. es kommen lediglich physikalische Verfahren zum Einsatz, wobei die Altmaterialien aufgereinigt bzw. neue Produkte hergestellt werden. Da es im Materialkreislauf zum Verlust von Substanz kommt, müssen dem Kreislauf stets neue Rohstoffe zugeführt werden (z. B. Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffabfälle). Der Nachteil dieser Recyclingmethode besteht in der verminderten Qualität der Recyclingprodukte, gegenüber neu hergestellten. Eine weitere Gruppe von Verfahren betrifft geschlossene Stoffkreisläufen mit stofflicher Umwandlung. Hierbei werden Kunststoffabfälle mithilfe chemischer Reaktionen in Monomere oder noch kleinere Einheiten zerlegt. Diese können dann wiederum zur Herstellung von Produkten genutzt werden, die sich in ihrer Qualität nicht von Neuwaren unterscheiden. Letztlich besteht noch die Möglichkeit der energetischen Verwertung, wobei die Kunststoffabfälle verbrannt werden und so Energie in Form von elektrischem Strom oder Dampf gewonnen werden kann. [1]



II. Schülermaterial

Thema: Kunststoffe - Müllverbrennung und Recycling

Versuch 1: Recycling von Thermoplasten durch Zusammensintern

- ➔ Kurzbeschreibung: Thermoplasten werden oberflächlich angeschmolzen und zusammengesst. Es können Kunststoffe recycelt werden, deren äußeres Erscheinungsbild keine Rolle für die weitere Verwendung spielt. [1]
- ➔ Lernziel:
 - Die SuS können wichtige Vertreter und Eigenschaften der Thermoplaste nennen und diese anhand ihres Recyclingsymbols identifizieren.
 - Die SuS können den Prozess des Zusammensinterns erklären und diesen als Prozess des werkstofflichen Recyclings einordnen.

Versuch 2: Pyrolyse von Polymethacrylsäuremethylester

- ➔ Kurzbeschreibung: Polymethacrylsäuremethylester (z.B. Plexiglas) wird durch Pyrolyse in einzelne Monomere zerlegt. [1]
- ➔ Lernziel:
 - Die SuS können den Prozess der Pyrolyse erklären und wissen, dass dieses Verfahren beim rohstofflichen Recycling angewendet werden kann.

Versuch 3: Recycling von Styropor

- ➔ Kurzbeschreibung: Die bekannte Struktur des Styropors (Polystyrol) wird durch ein lösemittelbasiertes Verfahren zerstört. Anschließend wird das Lösungsmittel (Aceton) entfernt und das Styropor wieder in Form gebracht. [2]
- ➔ Lernziel:
 - Die SuS können das Recycling von Styropor unter Zuhilfenahme von Lösungsmitteln erläutern und als werkstoffliches Recycling charakterisieren.





V1 Recycling von Thermoplasten durch Zusammensintern

Informationen

Einleitung

Beim Recycling von Kunststoffen spielt die sortenreine Trennung der Abfälle eine große Rolle für die Qualität der Recyclingprodukte. Da ein großer Arbeitsaufwand nötig ist, um die Kunststoffe zu trennen und das vollständige Schmelzen der Thermoplaste sehr energieaufwendig ist, stellt der Prozess des Zusammensinterns eine günstige Alternative dar. Es kommt dann zum Einsatz, wenn das äußere Erscheinungsbild der Produkte keine große Rolle spielt, wie z. B. bei Halterungen von Baustellenabsperrungen.

Aufgabenstellung

- Führe den Versuch durch und notiere deine Beobachtungen!**
- Erkläre anhand der Struktur der Thermoplaste, warum dieses Verfahren anwendbar ist! Welche Kunststoffe eignen sich dafür?**
- Vergleiche die Struktur der Thermoplaste mit den Strukturen der Elastomere und Duroplaste, Überlege, ob das Verfahren des Zusammensinterns auch mit ihnen durchführbar ist. Begründe deine Aussage!**

Das Experiment

Materialien

- 1 Bunsenbrenner
- Keramikplatte mit Dreifuß
- Aluminiumfolie
- Deckel einer Farb- oder Cremedose

Chemikalien

- 1 Tiegelzange
- 1 Becherglas (Größe auf Deckel abstimmen)
- Thermoplastische Abfälle
- Rapsöl

Durchführung

- Bedecke die Fläche deines Deckels mit Aluminiumfolie und befülle ihn anschließend mit deinen gesammelten und zerkleinerten Abfällen
- Fette den Boden des Becherglases mit dem bereitgestellten Rapsöl etwas ein. Stelle dann den Deckel auf die Keramikplatte mit Dreifuß und erhitze die Abfälle mit mittelstarker Flamme, bis sie glasig werden und beginnen zusammenzuschmelzen.
- Presse das Becherglas nun zwei bis dreimal auf den Deckelinhalt. Stelle den Brenner nach dem Zusammenschmelzen der oberen Schicht der Abfälle aus. (Der Kunststoff darf dabei nicht komplett flüssig werden)





4. Nimm deinen Deckel mit Hilfe der Tiegelzange von der Keramikplatte herunter und kühle ihn unter kaltem Wasser ab.
5. Vergleiche die Qualität deines recycelten Kunststoffs mit einem frischen (nicht recycelt)!





V2 Pyrolyse von Polymethacrylsäuremethylester

Informationen

Einleitung

Neben einer Wiederverwertung von Kunststoffen durch Aufreinigung und neues In-Form-bringen spielt beim Recycling auch die Zerlegung von Polymeren in ihre Monomere oder noch kleinere Bausteine eine Rolle. Dies kann zum Beispiel durch Pyrolyse geschehen, wobei die Polymere durch Erhitzen gespalten werden. Aus den Produkten können dann neue Kunststoffe entstehen. Nach Aufreinigung der Monomere, können aus ihnen Produkte ohne Qualitätsverlust, im Vergleich zu Neuerzeugnissen, hergestellt werden. Dieses Verfahren wird anhand eines Versuchs mit Polymethacrylsäuremethylester (z. B. Plexiglas) veranschaulicht.

Aufgabenstellung

1. **Sieh dir den Versuch an und notieren deine Beobachtungen!**
2. **Stelle eine Reaktionsgleichung für die Zerlegung des Polymers in einzelne Monomere auf!**
3. **Erkläre, wie die Monomere im Nachgang der Pyrolyse aufgearbeitet und wieder zu Polymeren überführt werden können!**
4. **Erläutere die Vor- und Nachteile dieses Recyclingverfahrens im Vergleich zur Herstellung aus Rohstoffen (z. B. Erdöl)!**

Das Experiment

Materialien

- 1 Bunsenbrenner
- 2 Reagenzgläser
- Ein passender durchbohrter Stopfen mit rechtwinklig gebogenem Glasrohr

- 1 Becherglas (500 mL)
- 1 Stativ
- Muffen
- Klemmen

Chemikalien

- Polymethacrylsäuremethylester-Abfälle (z. B. Plexiglas)
- Wasser

Durchführung

1. Befülle das Becherglas mit kaltem Wasser und stelle das leere Reagenzglas hinein. Befülle nun das zweite Reagenzglas zu 1/3 mit den PMMA-Abfällen und befestige den Stopfen mit dem gewinkelten Glasrohr darauf.
2. Spanne das befüllte Reagenzglas so in das Stativ ein, dass das andere Ende des Glasrohrs in das leere Reagenzglas mündet. Achte darauf, dass das Glas so befestigt ist, dass die Abfälle am Boden des Glases liegen bleiben und nicht zum Stopfen fließen können, wenn die Substanz schmilzt.





3. Erhitze das befüllte Reagenzglas erst leicht, bis sich eine blasige Schmelze bildet und dann stärker, bis das meiste der Abfälle umgesetzt wurde. Die Produkte werden in flüssiger Form im gekühlten Reagenzglas aufgefangen.

Erklärung/ Information

Nutze zur Auswertung und zum Aufstellen der Reaktionsgleichung die folgende Strukturformel von Polymethacrylsäuremethylester!

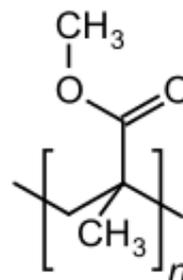


Abb. 5: Stuktur PMMA



V3 Recycling von Styropor

Informationen

Einleitung

Eine weitere Möglichkeit Kunststoffe zu recyceln, besteht in der Verwendung von Lösungsmitteln. Mit deren Hilfe können chemische Bindungen in Polymeren aufgebrochen werden, um diese später wieder zu knüpfen. Das Verfahren wird als Solvolyse bezeichnet. Es kann z. B. zur Wiederverwertung von Styropor verwendet werden. Dieses ist den meisten in seiner aufgeschäumten Struktur geläufig. Durch das folgende Verfahren wird es in eine flüssige Form überführt, wodurch gleichzeitig Verunreinigungen entfernt werden können. Anschließend kann es erneut aufgeschäumt werden.

Aufgabenstellung

- 1. Führe den Versuch durch und notiere deine Beobachtungen!**
- 2. Informiere dich über die Eigenschaften des Polystyrols und nenne alternative Recyclingmöglichkeiten!**
- 3. Vergleiche deine Produkte miteinander. Leite anhand ihrer Beschaffenheit unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten ab!**

Das Experiment

Materialien

- 1 Glasstab
- 2 Bechergläser (500 mL)
- Heizplatte

Chemikalien

- Schere
- 1 Pipette
- 1 Petrischale
- Styropor
- Aceton
- Wasser

Durchführung

- Gib zunächst 5 ml Aceton in dein Becherglas. Gib nun so viel Styropor in dein Glas, bis deine Flüssigkeit zähflüssig geworden ist. Rühre während der Zugabe um.
- Gib etwa die Hälfte der zähflüssigen Masse auf eine Petrischale und stelle sie unter den Abzug.
- Erhitze auf der Heizplatte Wasser in einem zweiten Becherglas, bis es siedet. Gib anschließend den Rest der Flüssigkeit in das siedende Wasserbad.
- Betrachte nach ein paar Minuten dein Becherglas unter dem Abzug. Untersuche, ob sich in diesem etwas verändert hat.



III. Didaktische Hinweise

Das Thema des Recyclings und der Müllverbrennung spielt in der modernen Gesellschaft eine entscheidende Rolle. Gerade im Bereich der Makromoleküle, genauer den Kunststoffen, gibt es viele persistente Stoffe, welche die Umwelt bei nicht sachgemäßer Entsorgung belasten und schädigen. Viele dieser Kunststoffe können in der Umwelt über hunderte bis tausende Jahre verbleiben, bevor sie vollständig abgebaut sind. Um dies zu vermeiden, soll schon den SchülerInnen ein Verständnis für die sachgemäße Entsorgung von Kunststoffen vermittelt werden. Zudem sollen sie verschiedene Möglichkeiten des Recyclings kennenlernen und diese als Stoffkreislauf identifizieren können. Dabei knüpft das Themenfeld der „Struktur und Reaktionen der Kunststoffe“ an das in der 10. Klasse vermittelte Wissen zu Kohlenstoff und Kohlenstoffverbindungen an, in dem auch die Themen Klimawandel und Nutzung von Erdöl als Teilgebiete der Umweltchemie aufgegriffen werden. Auch im Fach Sozialkunde werden in der 10. Klasse die Komplexe Ressourcenknappheit und Nachhaltigkeit behandelt. [4]

Der Themenbereich der Kunststoffe und ihres Recyclings ist jedoch kein verbindlicher Teil des Lehrplans. Er wird nur im erhöhten Anforderungsniveau der Klassenstufe 12 vermittelt, wenn die Lehrkraft sich dafür entscheidet. Alternativ dazu kann Wissen zu „Struktur und Reaktionen von Kohlenhydraten und Proteinen“ gelehrt werden.

Grundlegende Sach- und Methodenkompetenzen sind die Erläuterungen des Struktur-Eigenschafts-Prinzips anhand der Stoffklassen der Thermo- und Duroplaste und Elastomere, sowie die Ableitung von Verwendungen anhand ihrer jeweiligen Eigenschaften. Auch sollen die SchülerInnen in der Lage sein, werk- und rohstoffliches Recycling, sowie die energetische Verwertung von Kunststoffabfällen zu erläutern. Neben der Nennung verschiedener Verfahren des Kunststoffrecyclings, sollen sie Vor- und Nachteile dieser gegenüberstellen können. Darüber hinaus sollen sie ökologische und ökonomische Aspekte des Recyclings bewerten können. Im Schülerexperiment können sie die Eigenschaften von Kunststoffen untersuchen (z. B. Hitzebeständigkeit, Löslichkeit, Dichte), sowie Modellexperimente zum Kunststoffrecycling durchführen. Neben diesen Sach- und Methodenkompetenzen sollen den SchülerInnen die Selbstkompetenzen vermittelt werden, diese fachlichen und naturwissenschaftlichen Kenntnisse anzuwenden, um die praktische Anwendung chemischer Erkenntnisse zu bewerten und im Alltag sachgerechte Entscheidungen zu treffen. Dies bezieht sich vor allem auf den alltäglichen Umgang der SchülerInnen mit Müll und dessen Entsorgung. [3]

Die Auswahl der vermittelten Kompetenzen dient der Verwirklichung von übergeordneten Lernzielen.

So sollen die SchülerInnen ...

...die Bedeutung des Recyclings erläutern und anhand von Beispielen erklären, weshalb Kunststoffe recycelt werden,

...die Kunststoffe in die Kategorien Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere einteilen können und diese anhand ihrer Eigenschaften beschreiben

Und

...verschiedene Recyclingverfahren sowie die Müllverbrennung nennen und erklären können.



V1 Recycling von Thermoplasten durch Zusammensintern

Beobachtungen:

Beim Erhitzen werden die Kunststoffe glasig und fangen an zusammenzuschmelzen. Durch das Pressen mittels Becherglases wurde der angeschmolzene Kunststoff in eine neue Form gebracht. Das Produkt behält nach Erkalten seine Form und verfügt nahezu über gleiche mechanische Eigenschaften, wie der Ausgangsstoff (Härte, Elastizität). Lediglich die Ästhetik des Produkts entspricht nicht der neuwertiger Artikel.

Auswertung:

Das Experiment zeigt, dass Thermoplaste mit geringem Energieaufwand durch Zusammensintern in eine neue Form gebracht werden können. Erhitzt man Thermoplaste, werden die Moleküle beweglicher und können aneinander vorbeigleiten. Erwärmt man diese, so werden sie erst weich und gehen dann bei weiterer Temperaturerhöhung in eine Schmelze über. Auch durch bloßes Anschmelzen können sie in eine gewünschte Form gebracht werden und behalten diese nach dem Abkühlen. Da Duroplaste und Elastomere nicht über eine Struktur verfügen, die bei Temperaturerhöhung die Beweglichkeit der Molekülketten vergrößert, können diese Kunststoffgruppen nicht zusammengesintert werden. Die Polymere dieser Kunststoffe würden sich bei großer Temperaturzufuhr zersetzen. [1]

Didaktischer Kommentar:

Ziel des Versuches ist es, Schülerinnen und Schüler an das Themengebiet der Kunststoffe heranzuführen. Dabei soll Wissen über die Kategorisierung von Kunststoffen in die drei Stoffgruppen Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere vermittelt werden. Dies schließt die Betrachtung ihrer jeweiligen Strukturen und der aus diesen ableitbaren Eigenschaften und Verwendungen ein. Gleichzeitig soll dabei ein erstes Recyclingverfahren für die Gruppe der Thermoplaste veranschaulicht werden. Das Experiment kann als Einstiegsversuch in die Thematik der Kunststoffe eingesetzt werden. Da für den Versuch nur wenige Materialien benötigt, sowie keine gefährlichen Chemikalien verwendet werden, ist der Versuch als Schülerexperiment durchführbar. Die Schülerinnen und Schüler benötigen für den Versuch lediglich Vorwissen über den Umgang mit dem Bunsenbrenner, sowie Wissen über das Verhalten von Thermoplasten beim Erhitzen. Alternativ wäre ein Versuch denkbar, bei dem der Thermoplast eingeschmolzen und neu gegossen wird. Im Anschluss an das Experiment könnte es nochmal mit einem Duroplast oder Elastomer durchgeführt werden, um die strukturellen Unterschiede zwischen den Kunststoffen zu verdeutlichen.



Da es sich hierbei um einen sehr simplen Versuch mit wenigen Geräten und Chemikalien handelt, sollten keine Schwierigkeiten beim Experimentieren auftreten. Es ist lediglich darauf zu achten, dass der Thermoplast nicht flüssig wird, da er sich sonst weniger gut in Form pressen lässt. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Kunststoffabfälle vor dem Erhitzen ausreichend zerkleinert wurden, da sie so leichter sintern lassen.



V2 Pyrolyse von Polymethacrylsäuremethylester

Beobachtungen:

Es ist zu beobachten, dass beim Erhitzen des Polymethacrylsäuremethylester-Abfalls eine blasige Schmelze entsteht. Im zweiten Reagenzglas kann eine farblose Flüssigkeit aufgefangen werden.

Auswertung:

Der Polymethacrylsäuremethylester-Abfall wird erhitzt, bis er schmilzt. Durch hohe Energiezufuhr brechen die Bindungen im Polymer auf und es entstehen die Monomere, die dann in einem gekühlten Reagenzglas aufgefangen werden. Der veränderte Aggregatzustand indiziert, dass eine chemische Reaktion stattgefunden hat.

Reaktionsgleichung:

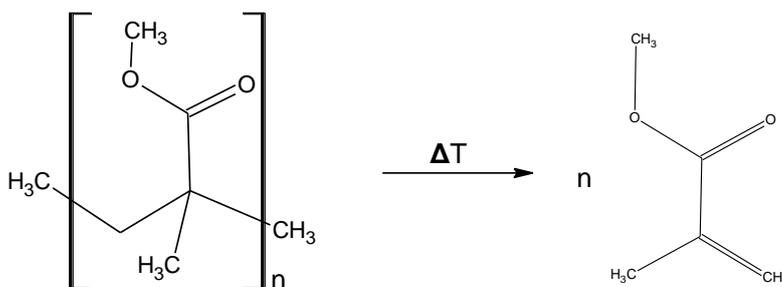


Abb. 6: Pyrolyse von PMMA

Im Nachgang an die Reaktion können die Methacrylsäuremethylester-Moleküle wieder Repolymerisiert werden. Dies kann durch eine radikalische Polymerisation erneut zu Polymethacrylsäuremethylester umgesetzt werden. Als Radikal kann für die Reaktion ein Benzol-Radikal verwendet werden. Die Reaktion von Methacrylsäuremethylester mit dem Benzol-Radikal ist der Kettenstart, wobei ein neues größeres Radikal entsteht. An diesem Radikal können weitere Kettenwachstumsreaktionen stattfinden. Der Kettenabbruch kann zuletzt durch Rekombination zweier Radikale erfolgen.



Zuletzt sollen Vor- und Nachteile dieses Recyclingverfahrens im Vergleich zur Herstellung von Kunststoffen aus Rohstoffen gegenübergestellt werden.

Vorteil dieser Methode Kunststoffe zu recyceln ist zunächst die Müllbeseitigung, d. h. bevor neue Kunststoffe aus Rohstoffen hergestellt werden müssen, kann zunächst anfallender Müll beseitigt und aufgearbeitet werden. Außerdem können auf diesem Weg knappe Ressourcen eingespart werden. Als Nachteil der Methode ist zunächst der hohe Aufwand des Verfahrens zu nennen. Neben hohem Energieaufwand müssen die zu recycelnden Abfälle zunächst sortiert, gereinigt und chemisch oder physikalisch zersetzt werden. Weiterhin haben wir auch wie bei der Herstellung aus den Rohstoffen die aufwendige Reaktion zum Polymer. [1]

Didaktischer Kommentar:

Dieser Versuch dient dem Ziel, den Schülerinnen und Schülern ein Verfahren des Kunststoffrecyclings, die Pyrolyse, durch praktisches Arbeiten zu vermitteln. Er zielt weiterhin auf eine Vertiefung und Festigung des Wissens über die Chemie der Makromoleküle ab. Das Polymer Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) soll durch Zuführen thermischer Energie in sein Monomer, Methacrylsäuremethylester, zerlegt werden. Da die Schüler zum Zeitpunkt des Experiments PMMA bereits als Polymer identifizieren können sollten, stellt die Reaktion für sie die Umkehr der Polymerisation dar. In den Aufgaben zum Experiment wird zudem auf Vor- und Nachteile dieses Verfahrens im Vergleich zur Herstellung des Stoffes Ressourcen wie Erdöl eingegangen, was dem Ziel dient, das Recycling allgemein zu betrachten. Auch soll ein Einblick in den weiteren Recyclingprozess gewährt werden, indem die nachfolgende Repolymerisation im Rahmen einer Aufgabe erklärt werden soll.

Aufgrund dieser Lernziele wird bei den Schülern grundlegendes Wissen über Polymerchemie vorausgesetzt. Dies schließt die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen der Kunststoffe, wie auch die (De-)Polymerisationsreaktionen ein. Auch kann eine vorherige Behandlung des Themenkomplexes des Chemischen Gleichgewichtes zum Verständnis beitragen, da die Schülerinnen und Schüler den Versuch nur so als Umkehrung einer chemischen Reaktion durch Veränderung der äußeren Bedingungen wahrnehmen können. Diesem Vorwissen ist es geschuldet, dass sich das Experiment nicht als Einstiegsversuch eignet. Stattdessen sollte es als Erarbeitungsversuch zum Kennenlernen eines Recyclingverfahrens im Kontext des Themas der Makromoleküle eingesetzt werden. Dabei ist es möglich, das Experiment sowohl als Lehrer- oder als Schülerversuch durchzuführen. Letzteres empfiehlt sich in unseren Augen in besonderem Maße, da der Aufbau der Geräte simpel ist und die Durchführung wenig experimentelle Fähigkeiten verlangt. Gegen ein solches Vorgehen würde einzig die Notwendigkeit der Beschaffung größerer Mengen PMMA sprechen. Dieses ist beispielsweise in Form von





Plexiglas erhältlich, müsste aber höchstwahrscheinlich vom Lehrer selbst organisiert werden, da es nicht zum Chemikalien-sortiment einer Schule zählt.

Beim Experimentieren ist lediglich darauf zu achten, dass die Stoffprobe vollständig geschmolzen und erst danach stark erhitzt wird. Auch sollte die Lehrkraft bei der Anwendung als Schülerexperiment den sachgemäßen Aufbau des Stativmaterials kontrollieren, da das eingespannte Reagenzglas sehr heiß wird und eine Nachbesserung während des Versuches deshalb kaum praktikabel ist.

Eine Möglichkeit den Versuch zu erweitern besteht darin, der Pyrolyse eine (Re-)Polymerisation folgen zu lassen. Dies wäre durch einen radikalischen Kettenstarter (z.B. N,N-Dimethylanilin und Dibenzoylperoxid) möglich. Da es sich bei diesen jedoch um giftige und explosive Gefahrenstoffe handelt, wäre hier ein Lehrereperiment die sinnvollere Lösung. Nichtsdestotrotz würde dieser nächste Schritt den Versuch zum Thema Recycling abrunden, indem ein neues Polymer aus den Produkten des Ursprungsversuches hergestellt wurde. [1]

Alternativ zur Pyrolyse von PMMA kann diese auch mit diversen anderen Kunststoffen durchgeführt. Gummi, wie beispielsweise das von Autoreifen, oder Polystyrol wären als Ersatz gut geeignet.



V3 Recycling von Styropor

Beobachtungen:

Bei der Zugabe von Styropor in das Becherglas mit dem Aceton, fällt das Styropor in sich zusammen und es entsteht am Boden eine feste, zähflüssige Masse. Nachdem ein Teil der zähflüssigen Masse in das siedende Wasserbad gegeben wurde, entsteht ein harter Schaum. Nach einiger Zeit unter dem Abzug, hat sich in der Petrischale eine harte Masse gebildet.

Auswertung:

Das im Versuch verwendete Styropor besteht aus aufgeschäumtem Polystyrol. Durch die Zugabe von Aceton können die intermolekularen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Polystyrol-Molekülen gebrochen werden. Aceton ist, im Gegensatz zu reinen polaren Lösungsmitteln wie Wasser, auch in der Lage unpolare Stoffe wie z.B. Polystyrol zu lösen. Somit wird die aufgeschäumte Struktur des Styropors zerstört und es bildet sich eine zähflüssige Masse. Nach Zugabe der Masse in ein siedendes Wasserbad, bilden sich Blasen, welche mit Wasserdampf gefüllt sind. Dadurch kann



Polystyrol erneut aufgeschäumt werden und erhält eine Struktur, die dem verwendeten Ausgangsstoff ähnelt.

Die Petrischale musste so lange unter dem Abzug stehen gelassen werden, bis das verwendete Aceton vollständig verdampft war. Durch das Verdampfen des Acetons ziehen sich die Polystyrol-Moleküle wieder an und nehmen somit eine neue Form an. Das Polystyrol liegt hier nun als harte Masse vor.

Je nachdem, ob es in aufgeschäumter Form vorliegt oder nicht, ergeben sich unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten. In aufgeschäumter Form kann es als Kunststoff für Gebäudeisolierungen verwendet werden, z.B. in Form von Schaumstoff, welcher zur Dämmung eingesetzt wird. Besitzt es keine aufgeschäumte Form, so findet es z. B. Verwendung in der Lebensmittelindustrie als Verpackungsmaterial (Joghurtbecher, etc.).

Da es sich bei Polystyrol um einen Kunststoff aus der Klasse der Thermoplaste handelt, wäre es möglich es durch Zufuhr von Wärme umzuformen. Auch Pyrolyse, also der thermische Abbau des Kunststoffs unter Sauerstoffausschluss bei ca. 600 – 900 °C, bei dem das Polymer in seine Kettenbruchstücke zerlegt und anschließend weiterverarbeitet werden kann, stellt eine Möglichkeit des Recyclings dar. [2]

Didaktischer Kommentar:

Ziel des Versuchs ist es, den Schülerinnen und Schülern ein Lösungsmittelbasiertes Recyclingverfahren näherzubringen. Dabei sollen sie Informationen über die Eigenschaften des Polystyrols erhalten und daran alternative Recyclingmöglichkeiten nennen können. Weiterhin sollen sie unterscheiden können zwischen der aufgeschäumten, sowie nicht aufgeschäumten Struktur des Polymers und anhand deren Beschaffenheit verschiedene Verwendungsmöglichkeiten ableiten.

Das Experiment kann als Erarbeitungsversuch eingesetzt werden, wobei die Schülerinnen und Schüler das lösemittelbasierte Recyclingverfahren mit Hilfe des Experiments kennenlernen. Um sowohl die Sach-, Methoden- und Selbstkompetenz der SchülerInnen zu festigen, kann es als Schülerexperiment durchgeführt werden. Die im Versuch benötigten Materialien und Chemikalien bieten gute Voraussetzungen, um das Experiment in kleinen Gruppen durchzuführen. Als Einstiegsversuch ist das Experiment weniger geeignet, da der Versuch Vorwissen über die Struktur-Eigenschafts-Beziehung der Kunststoffklassen voraussetzt, sowie der Vergleich mit anderen Recyclingverfahren erwartet wird. Als Alternativversuche könnte auch eine Solvolyse von PET oder Polyurethan erfolgen, welche mit Hilfe von Wasser oder Alkoholen in ihre Monomere gespalten werden können. Diese könnten auch im Anschluss wieder zu einem Polymer überführt werden.





Da die Schülerinnen und Schüler im Versuch mit Aceton experimentieren, können diese während des Versuchs mit Einweghandschuhen arbeiten, da das Aceton Hautreizungen verursachen kann. Weiterhin ist beim Umgang mit Aceton darauf zu achten, dass es von eventuellen Wärmequellen (z. B. Bunsenbrenner) ferngehalten wird, da es sich um einen leicht entzündbaren Stoff handelt. Will die Lehrkraft den direkten Kontakt des Acetons mit den Schülern vermeiden, könnte sie alternativ auch die benötigte Menge in jeder Schülergruppe dazugeben, so dass diese nur das Styropor zugeben müssen. Sollten nicht für jede Gruppe Heizplatten zur Verfügung stehen, könnte auch der Lehrer Wasserbäder für die einzelnen Gruppen vorbereiten, und die SchülerInnen schäumen nach und nach ihre Produkte in den vorbereiteten Wasserbädern auf. Die Petrischalen der einzelnen Gruppen können mit Klebezetteln versehen werden, auf denen die Namen der Experimenteure stehen, so dass jeder sein Ergebnis am Ende des Versuchs identifizieren kann.

Damit der Versuch auch gelingt, ist darauf zu achten, dass das Verhältnis von Aceton und Styropor stimmt. Wird z. B. zu viel Aceton zugegeben, benötigt es dementsprechend mehr Zeit, bevor das gesamte Aceton unter dem Abzug verdampft und sich das harte Styropor bildet. Außerdem ist darauf zu achten, nicht zu viel des Styropors in das Gefäß mit Aceton zu geben, vielmehr sollten kleine Stücken nach und nach dazugegeben und dabei gelegentlich umgerührt werden.



IV. Referenzen

- [1] Bader, H.-J., Blume, R., Horn, S. et. al (1997). Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich II: Band 12: Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln: S. 103ff.
- [2] Schöneich, H. (2017). Schulversuchspraktikum. Umweltschutz und Recycling. Letzter Zugriff am 11.01.2021 unter: <http://unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/material/5-6/V5-634.pdf>
- [3] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Chemie. S. 40f.
- [4] Thüringer Lehrplan für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Sozialkunde. S. 16.
- [5] Freytag, M., Müller-Drexel, M. (2020). Recycling-Zeichen auf Verpackungen. Die wichtigsten Codes im Überblick. Letzter Zugriff am 02.02.2021 unter: <https://www.lizenzero.de/blog/recycling-zeichen-auf-verpackungen-die-wichtigsten-codes-im-ueberblick/>

Quellenverzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1: Bader, H.-J., Blume, R., Horn, S. et. al (1997). Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich II: Band 12: Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln: S. 4
- Abb. 2: Bader, H.-J., Blume, R., Horn, S. et. al (1997). Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich II: Band 12: Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln: S. 6
- Abb. 3: Bader, H.-J., Blume, R., Horn, S. et. al (1997). Handbuch der experimentellen Chemie, Sekundarbereich II: Band 12: Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln: S. 6
- Abb. 4: Recycling-Codes Kunststoffe. Letzter Zugriff am 02.02.2021 unter: <https://www.ats-tanner.com/de/news-anwendungen/was-bedeutendie-symbole-auf-plastikverpackungen-2408>
- Abb. 5: Struktur PMMA: Letzter Zugriff am 02.02.2021 unter: <https://www.seilnacht.com/Lexikon/k Plexi.html>
- Abb. 6: Pyrolyse von PMMA. Eigene Darstellung, erstellt mit ChemSketch.

7. Biobasierte Kunststoffe (Alexander Dehne, Paula Kittel, Carolin Leibelt)

I. Sachdarstellung

1. Definition

Biobasierte Polymere wurden von der IUPAC^[1] folgendermaßen definiert: Ein biobasiertes Polymer besteht ganz oder teilweise aus biologischen Produkten, die aus der Biomasse einschließlich pflanzlicher, tierischer und mariner oder forstwirtschaftlicher Materialien stammen. Dabei müssen die biobasierten Polymere nicht notwendigerweise umweltfreundlich, biokompatibel oder biologisch abbaubar sein, insbesondere wenn es sie einem petrobasierten (ölbasierten) Polymer ähnlich ist. Nicht zu verwechseln sind diese Polymere mit Biomakromolekül. Dabei handelt es sich um Makromoleküle (einschließlich Proteine, Nucleinsäuren und Polysaccharide), die von lebenden Organismen gebildet werden.

2. Vor- und Nachteile

Die Vorteile der Nutzung von biobasierten Materialien liegen in der Reduzierung der Abhängigkeit von petrochemischen Ressourcen (wobei nur 5%^[2] der Ölreserven für die Herstellung von Kunststoffen verwendet werden), der Verringerung der CO₂-Emissionen und der geringen bis nicht vorhandene Toxizität und Gesundheitsgefährdung. Außerdem können Abfälle aus Land- und Forstwirtschaft in neue Kunststoffe umgewandelt werden und somit verwertet werden. Allerdings sind nachwachsende Rohstoffe nicht unbegrenzt vorhanden. Sie konkurrieren mit Anwendungen wie Biokraftstoff, Wärme und Elektrizität und der Produktion von Nahrungsmitteln. Biobasierte Polymere sind aufwendig und sehr teuer in der Herstellung^[3], weswegen sie gegenüber der konventionellen Herstellung noch nicht wettbewerbsfähig sind.

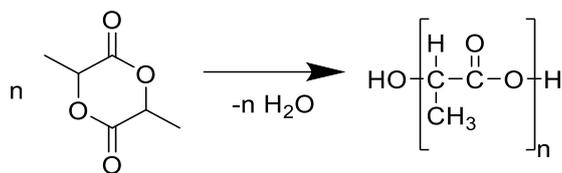
3. Klassifizierung

Biobasierte Polymere werden klassifiziert nach:

- Polymere aus biobasierten Monomeren
- Direkt aus der Biomasse gewonnene Polymere
- Durch Mikroorganismen hergestellte Polymere

3.1 Biobasierte Monomere

Wichtige Monomere hierbei sind 1,4-Butandiol, Adipinsäure, Bernsteinsäure, Ethanol und Milchsäure. Diese Monomere werden aus Zuckern, z.B. Glucose, welche sich in Lebensmitteln wie Mais, Kartoffeln oder Sojabohnen befinden, gewonnen. So können Polylactide aus Stärke und anderen Zuckern gewonnen werden. Dazu werden die Zucker fermentiert. Aus den Produkten wird die Milchsäure isoliert^[4] und anschließend kondensiert. Die dabei entstehenden Lactide werden schließlich zu Polylactiden durch eine ringöffnende, kationische Polymerisation polymerisiert.^[5]



Schema 1: Polykondensation von Lactid zu Polylactiden.

Polyamide, wie Nylon 6.10, lassen sich aus Rizinusöl gewinnen. Dazu wird das Rizinusöl hydrolysiert und gecrackt. Die dabei entstehende Sebacinsäure kann durch eine Polykondensation mit Hexamethyldiamin zu Nylon 6.10 verarbeitet werden.^[5]

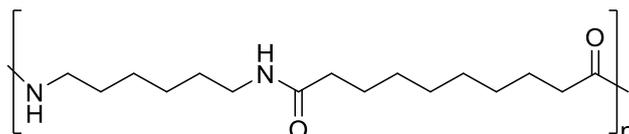


Abbildung 1: Strukturformel Nylon 6.10.

3.2 Direkt aus der Biomasse gewonnene Polymere

Hauptvertreter der Polymere, die direkt aus der Biomasse gewonnen werden können, ist modifizierte Cellulose. Cellulose ist ein Polysaccharid, welches aus D-Glucoseeinheiten, die β -glycosidisch verknüpft sind, besteht (siehe Abbildung 2).

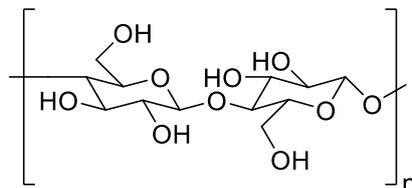


Abbildung 2: Strukturformel Cellulose.

Die Cellulose wird meist durch Veresterung oder Veretherung der Hydroxygruppe bzw. der Hydroxylgruppen der Glucoseeinheiten modifiziert. Durch Veresterung entstehen beispielsweise Cellulosenitrat, Celluloseacetat und Cellulosexanthogenat. Cellulosenitrat dient unter anderem als Lack, als Sprengstoff oder als Klebstoff. Celluloseacetate werden für die Herstellung von Fasern benötigt.^[5]

3.3 Durch Mikroorganismen hergestellte Polymere

Mikroorganismen synthetisieren ein breites Spektrum verschiedener Polyhydroxybuttersäure-Derivate (PHA).^[7] In den Bakterien handelt es sich um wasserunlösliche Einschlüsse im Zytoplasma zur Speicherung von Kohlenstoff und Energie. Attraktiv als Kohlenstoffquelle sind beispielsweise Belebtschlämme aus verschiedenen Abwässern.^[8] Dies ist vor allem interessant, da sich in diesen Abwässern sehr viel ungenutzte Energie befindet. Außerdem ist das entstehende Polymer biologisch abbaubar.

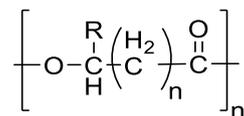


Abbildung 3: Strukturformel von Polyhydroxybuttersäure.

4. Entsorgung und Umweltfreundlichkeit

Taucht das Wort „Bio“ in einem Wort auf, so ist es leicht zu glauben, dass all diese Materialien leicht verrotten. Doch bereits die IUPAC-Definition zeigt, dass dies hier nicht der Fall ist. Entscheidend ist, dass biobasierte und biologisch abbaubare Kunststoffe unterschieden werden müssen, da es hierbei sehr leicht zu Verwechslungen kommen kann.

Unter biologisch abbaubaren Kunststoffen werden biobasierte Polymere verstanden, die sich innerhalb mehrerer Monate vollständig abbauen. Während der Zersetzung durch Mikroorganismen dürfen dabei keine Zerfallsprodukte entstehen, die sich nachteilig auf die Kompostqualität auswirken. Wichtige Beispiele für synthetische Polymere sind Poly- ϵ -caprolacton, Polymilchsäure oder Polyvinylalkohol, für natürliche Polymere Zellulose, Proteine oder bakteriell hergestellte Polyester und modifizierte natürliche Polymere wie modifizierte Stärke.^[5]

Als nächstes stellt sich die Frage des Recyclings. Biobasierte Kunststoffe können eine ähnliche chemische Struktur aufweisen, wie Kunststoffe auf Basis von Erdöl. Entsprechend werden diese genauso durch Verbrennung recycelt.

Ähnelt die Struktur der biobasierten Kunststoffe nicht der der erdölbasierten, so wird das Recycling erschwert, denn herkömmliche Sortieranlagen sind nicht auf jene Kunststoffe ausgelegt.^[9]

Damit sind biobasierte Kunststoffe nicht zwingend nachhaltiger als petrochemische Kunststoffe. Das verdeutlicht, dass biobasierte Kunststoffe nicht in die Biomülltonne gehören. Werden Biomüllbeutel genutzt, die aus biobasierten Kunststoffen hergestellt werden, müssen diese auch biologisch abbaubar sein (nach EN 13432, EN 14995), um im regulären Bioabfall entsorgt zu werden. Alle anderen Müllbeutel müssen im gelben Sack bzw. der gelben Tonne entsorgt werden.^[9]

II. Schülermaterial

Übergeordnete Lernziele der Broschüre und Versuche

Die Schülerinnen und Schüler...

- ... können eine eigene Definition für biobasierte Kunststoffe formulieren.
- ... können Vor- und Nachteile biobasierter Kunststoffe abwägen und erklären.
- ... können anhand ausgewählter Experimente erklären, was eine Polymerisation ist.
- ... können selbstständig (digital und analog) Recherchen zu beobachteten Phänomenen anstellen
- ... können selbstständig unter Zuhilfenahme der Experimentieranleitungen die Versuche allein oder in einer Kleingruppe durchführen.

V1 Kunststoff aus Stärke⁹

Informationen

Einleitung

Stärke hast du vermutlich schon als Polysaccharid oder als Alltagslebensmittel kennengelernt. Glucose löst sich gut in Wasser, Stärke hingegen nicht immer. Da langkettige Kohlenwasserstoffe dringend für die Herstellung von Kunststoffen benötigt werden, aber ihr Vorkommen begrenzt und der Abbau quasi unmöglich ist, machen wir uns auf eine kleine Reise in die Welt der Kunststoffe. Dabei werden wir speziell die Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen genauer betrachten und erproben, ob wir aus einfachen Haushaltsmitteln, selbst Kunststoffe herstellen können. Anschließend wollen wir überprüfen, ob sie eine umweltfreundlichere Option zu den erdölbasierten Kunststoffen darstellen könnten.

Aufgabenstellung

1. Führe den Versuch V1 durch und notiere deine Beobachtungen!
2. Lege ein Stück der Folie in Wasser in ein Becherglas und löse zwei Spatelspitzen Stärke in einem zweiten Becherglas Wasser auf. Vergleiche deine Beobachtung und erkläre sie.
3. Begründe unter Zuhilfenahme von externen Quellen, warum hierbei Glycerin zugegeben wurde.
4. Stelle Vermutungen auf, um welche Bindungsarten es sich im hergestellten Polymer handelt und begründe deine Vermutung.
5. Stelle die Bindungen zwischen der Stärke und dem Glycerin schematisch dar. Nutze dazu dein Wissen aus den vorherigen Aufgaben.

Das Experiment

Materialien

- Heizplatte mit integriertem Magnetrührer
- Laborwaage
- Becherglas 400 mL
- Becherglas 250 mL
- Messzylinder

- Folie
- Glasstab
- Spatel
- Trockenschrank
- Pipette

Chemikalien

- 10 g Stärke (Kartoffel- und Maisstärke)
- 84 mL entionisiertes Wasser
- 4 mL Glycerin (100%ig)
- Lebensmittelfarbe

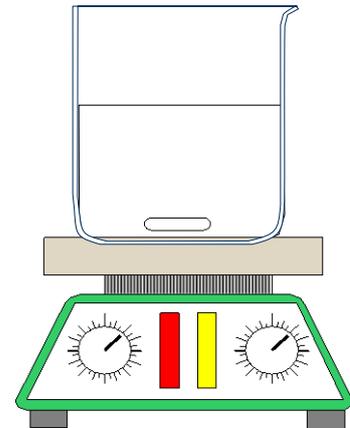
Durchführung

1. Fülle zuerst 84 mL Wasser in ein 400 mL Becherglas.

⁹ Experiment angelehnt an [14]



2. Gib anschließend 10 g Stärke und entionisiertes Wasser in das 250 mL Becherglas. Das Becherglas wird auf die Heizplatte gestellt und unter Rühren erhitzt. (80 °C, 800-1000 Umdrehungen)
3. Füge 1-2 Tropfen Lebensmittelfarbe hinzu.
4. Erhitze die Mischung 5 Minuten lang unter ständigem Rühren, bis eine gelartige, homogene Masse entsteht.
5. Gib nun die entstandene, noch heiße Masse auf eine Folie und verteile sie mit einem Glasstab gleichmäßig. Stelle dein Endprodukt anschließend für eine Stunde bei 80 °C in den Trockenschrank und lasse es danach über Nacht bei Raumtemperatur trocknen.
➤ Löse zuletzt die entstandene Stärkefolie von der Folie.



Erklärung/ Information

Bei der Durchführung kann je nach Ausstattung der Räumlichkeiten auch auf die Heizplatte mit integriertem Magnetrührer verzichtet werden. Stattdessen kann ein Dreifuß mit Brenner verwendet werden. Das Rühren der Substanz durch einen Magnetrührer kann alternativ auch mit Hilfe eines Glasstabs erfolgen. Dabei ist es unbedingt notwendig, auf einen stabilen Stand des Becherglases zu achten. Ein Trockenschrank kann durch einen Ofen ersetzt werden, wobei die Temperaturmessung mit einem Bratenthermometer oder Ähnlichem erfolge sollte.

V2 Galalith¹⁰

Informationen

Einleitung

Handelsübliche Milch enthält neben Wasser und Lactose auch Caseine. Casein oder Kasein stellen dabei den Proteinanteil der Milch dar. Für den Menschen sind Caseine insofern relevant, als dass sie der Speicherung und dem Transport von Protein, Calcium und Phosphat bei Neugeborenen dienen. Casein macht zudem auch den Großteil der Proteine in Quark und Käse aus, die durch Gerinnung des Caseins ihre feste Konsistenz erhalten. Darüber hinaus kann Casein auch als Bindemittel und pharmazeutischer Hilfsstoff sowie als Ausgangsstoff für den duroplastischen Galalith-Kunststoff verwendet. Ein solcher Kunststoff soll nun im Schülerexperiment selbst hergestellt werden.

Aufgabenstellung

1. **Führe den Versuch durch und notiere deine Beobachtungen!**
2. **Vergleiche die beiden selbst hergestellten Kunststoffe (Aussehen, Brüchigkeit, Brennbarkeit).**
3. **Löse in zwei verschiedenen Bechergläsern je einen selbst hergestellten Kunststoff und notiere deine Beobachtung. Begründe deine Beobachtungen.**

Das Experiment

Materialien

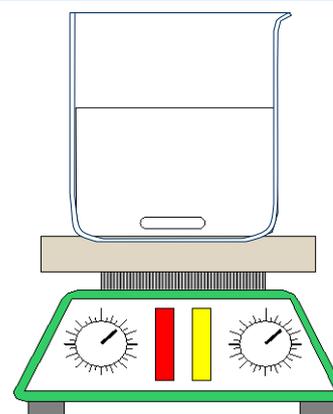
- Heizplatte mit integriertem Magnetrührer
- Rührfisch
- 1 L Becherglas
- 250 mL Becherglas

Chemikalien

- Sieb
- Messzylinder
- Folie
- Trockenschrank
- 500 mL frische Vollmilch (3,5% Fettgehalt)
- 50 mL Tafelessig
- entionisiertes Wasser

Durchführung

1. Fülle 500 mL Milch in ein 1 L Becherglas und erwärme die Milch unter Rühren.
2. Wenn das Gemisch zu sieden beginnt (Achtung: kocht schnell über), gib 50 mL Essig zu der Milch und rühre die Mischung eine Minute lang.
3. Siebe schließlich die entstandene Masse über einem feinmaschigen Sieb ab und spüle den Rückstand gründlich mit Wasser.
4. Knete anschließend das entstandene Produkt zu einer homogenen Masse und rolle es auf einer dünnen Folie aus.

¹⁰ Experiment angelehnt an [14]



5. Gib die Masse anschließend für eine Stunde bei 80 °C zum Trocknen in den Trockenschrank. Du kannst die Folie mit der Masse auch bei danach bei Raumtemperatur resttrocknen.

Erklärung/ Information

Auch hier kann statt der Heizplatte mit integriertem Magnetrührer ein Dreifuß mit Brenner genutzt werden. Es ist dabei jedoch darauf zu achten, dass das Becherglas stabil steht, sodass es nicht umfallen kann. Statt des Magnetrührers kann erneut ein Glasstab genutzt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Milch nicht überkocht.

Statt eines feinen Siebs kann ein feinmaschiges Stofftuch genutzt werden (kein Frottee!).

Wie oben bereits genannt, kann statt des Trockenschanks auch hier alternativ ein Ofen verwendet werden, die genaue Temperatur ist dabei mit einem Thermometer zu überwachen.





V3 Langzeitexperiment: Abbau von biobasierten/biologisch abbaubaren Kunststoffen¹¹

Einleitung

In unserer heutigen Alltagswelt sind Kunststoffe nicht mehr wegzudenken. Die hygienische Verpackung von Lebensmitteln und Konsumgütern beansprucht jährlich tausende Tonnen an Plastikverpackungen. Doch mit dem steigenden Konsum an Plastik, nimmt auch die Problematik der Umweltverschmutzung und der sachgemäßen Entsorgung zu, da immer mehr Plastik unachtsam entsorgt wird und so in unsere Umwelt gelangt. Aufgrund dieser Thematik rücken auch zunehmend biologisch abbaubare Kunststoffe in den Fokus der Forschung und der Industrie. Inwiefern biobasierte Kunststoffe im Vergleich zu herkömmlichen Kunststoffen eine echte Alternative darstellen, soll im folgenden Langzeitexperiment herausgefunden werden.

Aufgabenstellung

1. Führe die Versuche 1 und 2 durch.
2. Unter Verwendung deiner selbst hergestellten Kunststoffe kannst du nun den Versuch nach entsprechend der Versuchsanleitung durchführen. Kontrolliere über einen Zeitraum von 4 Wochen wöchentlich den Zustand der Proben. Notiere dazu deine Beobachtungen. (Tabelle empfohlen)
3. Erkläre, warum bestimmte Proben abgebaut werden und im Gegensatz dazu auch manche Proben keine Veränderung zeigen.
4. Definiere in eigenen Worten, was unter einem "biobasierten Kunststoff" und "biologisch abbaubarer Kunststoff" zu verstehen ist. Hebe dabei hervor, worin der Unterschied konkret besteht.
5. Leite unter Zuhilfenahme deines erworbenen Wissens Verhaltensweisen für den Umgang mit Kunststoffen ab.

¹¹ Experiment angelehnt an [14]



**Materialien**

- Glasbehälter/ ein größeres Gefäß
- Becherglas
- Kleine Schaufel oder Gabel

Chemikalien

- selbst hergestellte Kunststoffe aus Versuch 1 und 2
- eine Kunststoff-/Plastikprobe aus deinem Haushalt
- Wasser
- Komposterde

Durchführung

1. Führe die Versuche 1 und 2 durch. Schneide alle Proben in etwa gleich große Stücke (ungefähr 3cm x 5cm).
2. Fülle ein großes Gefäß mit Komposterde. Hebe mit der kleinen Schaufel (oder einem Löffel) Löcher aus und lege die Kunststoffproben hinein und schließe das Loch. Benetze die Erde gleichmäßig mit Wasser.
3. Kontrolliere wöchentlich die Entwicklung der Proben.

Erklärung/ Information

Bei diesem Experiment sollte Komposterde verwendet werden, da diese genug Nährstoffe enthält, um den Zersetzungsprozess zu starten. Der Topf mit der Erde sollte an einem wärmeren Ort (im Winter: Zimmertemperatur, im Sommer: drinnen oder draußen, bevorzugt an einem sonnigen Ort) platziert werden und zusätzlich wöchentlich mit etwas Wasser befeuchtet haben. Ein Blumenkasten eignet sich dazu gut. Es ist weiterhin hilfreich, zu markieren, wo welche Probe platziert wurde, damit es bei den wöchentlichen Kontrollen nicht zu Verwechslungen kommt. Alternativ können die Proben auch in separate, kleinere Gefäße gegeben werden.



III. Didaktische Hinweise

Das Thema biobasierte Kunststoffe lässt sich dem Themenbereich Makromoleküle zuordnen, wodurch der gesamte Themenkomplex im Bereich der Polymerchemie anzusiedeln ist. Wird dieses Thema nun in Bezug auf seine schulische Relevanz überprüft, so finden sich mehrere Anhaltspunkte. Wird so beispielsweise der Thüringer Lehrplan für das Fach Chemie zur Betrachtung herangezogen, so lässt sich für die Klassenstufe 11/12 dort der Themenkomplex "Natürliche und Künstliche Makromolekulare" finden. Aus diesem Themenbereich werden entweder „Struktur und Reaktionen der Kohlenhydrate und Proteine“ oder „Struktur und Reaktionen der Kunststoffe“ ausgewählt.^[10] Speziell im erhöhten Anforderungsniveau der Oberstufe wird auch das Thema Kunststoffe explizit angeführt. Hier bieten sich vielseitige Ansatzmöglichkeiten für das Thema der biobasierten Kunststoffe. Einerseits könnten im Zuge der Polymerisationsreaktion die Bildungsreaktion eines biobasierten Kunststoffes thematisiert und beleuchtet werden. Alternativ bietet es sich an, im Zuge der Recyclingdebatte auch die Problematik der biobasierten Kunststoffe zu beleuchten und hier den Fokus auf die biologische Abbaubarkeit und die Unterscheidung von biobasiert und biologisch abbaubar zu legen. Ein weiterer Anknüpfungspunkt findet sich in der Doppelklassenstufe 9/10 im Rahmen des Themas Erdgas und Erdöl. Hier wird ebenfalls die Recyclingthematik angesprochen, wobei sich hier besonders das Vergleichsexperiment der unterschiedlichen Kunststoffe und deren Abbau einbauen ließe. Generell ist jedoch zu vermerken, dass die Experimente als Versuchsreihe konzipiert wurden und somit in Bezug zueinanderstehen. Sie können aber dennoch auch losgelöst voneinander durchgeführt werden.^[10] Im Rahmen dieser Thematik, könnte zusätzlich auf das Struktur-Eigenschaftsmodell zurückgegriffen werden, wobei aus dem Bau der Moleküle auf die typischen Eigenschaften und anschließend auf die Verwendung geschlussfolgert werden kann.

Aufgrund der immer stärker, auch in das Blickfeld der Medien, rückende Fokus auf die Umweltthematik ist es zudem möglich, dieses Thema im Rahmen einer Projektwoche zu beleuchten. Hierbei muss allerdings vermerkt werden, dass das Vergleichsexperiment eher ungeeignet erscheint, da es bei diesem Versuch um ein Langzeitexperiment handelt. Eine Integration in Projektwochen, die sich an das Thema Umweltschutz oder Nachhaltigkeit bzw. auch chemischen Themen anlehnen, ist durchaus vorstellbar. Wichtig dabei ist die Abstimmung auf die Klassenstufen. Für SuS bis Klasse 9 sollten Experimente ausgewählt werden, die kein tieferes Wissen über Polymere voraussetzen. In höheren Klassenstufen kann auch eine intensivere Auseinandersetzung angestrebt werden. Es bleibt anzumerken, dass sich das Thema der biobasierten Kunststoffe jedoch primär an die Zielgruppe der oberen Jahrgänge richtet, da auch erst in diesen Klassen über Makromoleküle oder Kunststoffe gesprochen wird und somit hier auch erst ein gewisser Kontext aufgebaut wird, der für dieses Thema unablässig ist.

Anknüpfungspunkte finden sich ebenso im Thüringer Lehrplan für das Wahlpflichtmodul "Naturwissenschaften und Technik" für Gymnasien, welches ein Modul "Kunststoffe im Alltag" vorschlägt. Dabei wird die Einteilung der Kunststoffe vorgenommen, die Polymerisation thematisiert und die Recyclingdebatte angesprochen. Es werden Experimente für Schülerinnen und Schüler vorgeschlagen, bei denen es möglich wäre, ein biobasiertes Polymer herzustellen und dabei die Thematik der biobasierten Kunststoffe parallel zu besprechen. Demnach bietet sich auch hier der Einsatz der Experimentier- bzw. Versuchsreihe an. Ein ähnliches Modul findet sich im Curriculum der Regelschule nicht. Eine Integration in den MNT-Unterricht in Gymnasium und Regelschule kann diskutiert werden (Modul 5, Rohstoff zum Endprodukt). Dabei ist jedoch zu vermerken, dass hier natürlich eine didaktische Reduktion vorgenommen werden muss, um vor allem das Thema Polymere für die entsprechende Klassenstufe anzupassen.^[11]



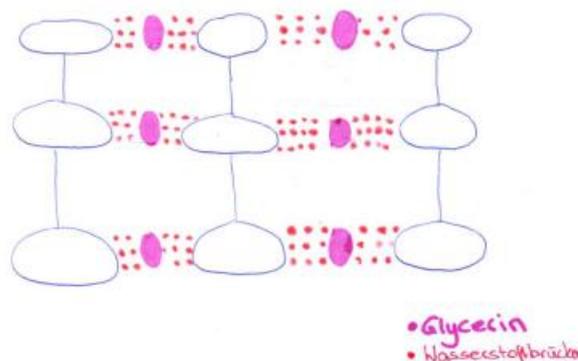
V1 Kunststoff aus Stärke

Beobachtungen:

- Stärke löst sich nicht gut im Wasser auf, beim Erhitzen entsteht eine gelartige weißliche-trübe Flüssigkeit
- Nach Zugabe des Glycerins und Rühren: gelartige Masse
- Aussehen auf Folie: durchsichtig
- Nach Trocknung: durchsichtige Folie

Auswertung:

2. Stärke kann unter Rühren in Wasser gelöst werden, die hergestellte Folie löst sich nicht. Stärke besteht primär aus den polymeren Molekülen Amylose und Amylopektin. Indem die Stärke mit Wasser vermischt und anschließend erwärmt wird, wird die Struktur der Amylose- und Amylopektinmoleküle zerstört, wodurch sich auch keine Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Molekülen mehr ausbilden können. Dadurch können sich nun einzelne Wassermoleküle zwischen die Amylose- und Amylopektinmoleküle einlagern, wodurch schließlich der sogenannte „Stärkekleister“ entsteht. Dieser Stärkekleister unterscheidet sich hinsichtlich seiner Eigenschaften zu herkömmlicher Stärke, was das unterschiedliche Lösungsverhalten erklärt.
3. Glycerin wird zugegeben, um den biobasierten Kunststoff elastisch zu machen, da Stärke brüchige Moleküle bildet. Das Erhitzen bewirkt einen Aufbruch der Stärkekettten. Das Glycerin wird beim Kochvorgang mit den Stärkemolekülen vermischt, die sich zwischen die Stärkekettten einlagern und zu diesen Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden. Während des Trocknungsvorgangs verhindern diese die Auskristallisierung der Stärkemoleküle, was den Kunststoff deutlich elastischer macht.
4. Zwischen den Baueinheiten der Stärke befinden sich kovalente Bindungen, zwischen den Stärkebausteinen und dem Glycerin bestehen Wasserstoffbrückenbindungen.
5. Die Abbildung zeigt die schematische Darstellung der Bindungen:



**Didaktischer Kommentar:****Lernziele:**

Die Schülerinnen und Schüler können...

... das Experiment selbstständig nach der Anleitung durchführen und dokumentieren.

... Vermutungen über das Löslichkeitsverhalten anstellen und mit bekannten Modellen argumentieren.

... mit eigenen Worten formulieren, dass eine Polymerisation stattgefunden hat und die Eigenschaften der Stärkefolie und die Zugabe des Glycerins damit begründen.

Dieser Versuch soll den ersten Versuch einer Experimentierreihe darstellen. Vorausgesetzt ist hierbei, dass die Schülerinnen und Schüler bereits Erfahrung beim Experimentieren besitzen. Sollte dies nicht der Fall sein, bietet es sich an, die Reihenfolge der Versuche 1 und 2 zu tauschen, da sich der zweite Versuch hinsichtlich der Durchführung etwas einfacher erweist. Ist grundlegende Experimentiererfahrung vorhanden, gibt es wenig potentielle Fehler. Eine mögliche Fehlerquelle ist jedoch eine nicht ausreichende Durchmischung der Lösung beim Erhitzen.

Um in die Thematik der biobasierten Kunststoffe einzusteigen, eignet sich die Einbettung des Versuchs in den Unterricht als Erarbeitungsversuch. Eine Alternative dazu bietet die Herstellung eines anderen Polymers. Als mögliche Erweiterung wäre eine vertiefte Thematisierung der Löslichkeit denkbar. (weitere Optionen wurden unsererseits nicht gefunden). Eine vorangegangene Thematisierung konventioneller Kunststoffe ist empfehlenswert, denn an dieser Stelle kann die Frage, was genau Kunststoffe sind, besprochen und eingeordnet werden.

Die Schülerinnen und Schüler können dieses Experiment selbstständig als Schülerexperiment durchführen, denn alle Chemikalien sind ungefährlich und Versuchsaufbau und Durchführung sind einfach. Um einen großen Verbrauch an Chemikalien zu vermeiden, bietet es sich an, die Menge der Chemikalien zu halbieren. Am Ende der Trocknung ist ein schöner visueller Effekt sichtbar, welcher durch die Einfärbung der Folie noch verstärkt werden kann. Nach dem Abziehen der hergestellten farbigen Folie von der Aluminiumfolie kann das Endprodukt zudem haptisch erkundet werden, was die Wirkung des Experiments verstärkt.

Für eine erfolgreiche Durchführung sollten die Schülerinnen und Schüler bereits den Aufbau von Stärkemolekülen und Glycerin kennen. Weiterhin sollten die verschiedenen Bindungsarten (Intermolekulare wie die van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen und ebenso die Anziehungskräfte im Molekül) bekannt sein, um die Aufgaben entsprechend zu lösen. Gleichzeitig wäre ein Vorwissen bezüglich der Baueinheiten von Stärke (beispielsweise Glucose) wünschenswert, da dieser Themenkomplex thematisch an die Einheit „Kohlenhydrate“ bindet.





Die Experimentierzeit wird mit etwa 20 Minuten, exklusiv Instruktion, angesetzt. Ein unbedingt zu nennendem Faktor, den es zu beachten gilt, ist die Trocknungszeit, die im Ofen und ggf. über Nacht stattfindet. Vorteilhaft wären demnach zwei separate Chemiestunden oder eine Projektwoche. Alternativ kann die Betrachtung des fertigen Produkts auch auf die folgende Woche verlegt und in der dortigen Anschlussstunde als Einstieg oder Anknüpfung genutzt werden.



V2 Galalith

Beobachtungen:

- Bei Zugabe der Essigsäure: weiße Lösung verfärbt sich leicht gelblich; es fällt ein weißer Feststoff aus
- erkennbare Flocken verklumpen nach einigen Sekunden
- Nach dem Absieben: weiße, grobkörnige Masse
- durch Kneten und Spülen entsteht eine homogene Masse

Auswertung:

2.

	Stärkefolie	Galalith
Brüchigkeit	flexibel	Fest, bricht bei stärkerer Kraftaufwendung
Aussehen	Weißlich-trüb, lichtdurchscheinend	weiß
Dichte vs Wasser	Schwimmt auf dem Wasser	Sinkt nach unten
Verbrennung	Schmilzt zuerst und "klumpt" zusammen, süßlicher Geruch	"komische" Geruchsentwicklung, Galalith verfärbt sich dunkel

3. Durch Zugabe der Essigsäure denaturieren die Proteine in der Milch und fallen aus, wodurch es zu einem weißen Niederschlag kommt. Durch Entfernung der flüssigen Bestandteile wird das Material hart und spröde.

Didaktischer Kommentar:

Lernziele

Die SuS können...

... das Experiment selbstständig nach der Anleitung durchführen und dokumentieren.



... die veränderten Eigenschaften zwischen Milch und Galalith begründen (oder z.B., weshalb Galalith spröder ist als die Stärkefolie).

... selbstständig die Historie des Kunststoffs recherchieren und seine heutige Bedeutung beurteilen. Wie auch die beiden vorangegangenen Experimente ist auch dieser Versuch Teil der Versuchsreihe zum Thema der biobasierten Kunststoffe. Schülerinnen und Schüler können in diesem Versuch, wie auch im Versuch 1 (und der ganzen Versuchsreihe), die Erkenntnis gewinnen, dass sich Kunststoffe sehr leicht aus "einfachen" Chemikalien (Alltagschemikalien) herstellen lassen. Hier wird aus Milch und Essig ein biobasierter Kunststoff hergestellt, wobei die Molke ein Abfallprodukt darstellt. Um dies zu vermeiden, würde es sich anbieten, mit der Molke Polymilchsäure herzustellen. Aus dem Casein lässt sich zudem auch ein biobasierter Klebstoff herstellen. Dies alternative Möglichkeit bietet sich vorrangig in den unteren Klassenstufen an. Jedoch soll hier nicht weiter auf diese Variation eingegangen werden. Um dieses Experiment als Erarbeitungsversuch einsetzen zu können, sollten die Schülerinnen und Schüler bereits Eiweiße kennengelernt und Wissen über Denaturierungsvorgänge erworben haben. Sollte das nicht der Fall sein, könnte man dies anhand dieses Experiments zeigen (Einstiegsexperiment).

Auch dieses Experiment ist aufgrund der einfachen und ungefährlichen Chemikalien und des einfachen Aufbaus einfach als SE durchführbar. An dieser Stelle sollte abgewogen werden, wie viel Kunststoff hergestellt werden soll. Je nachdem muss anschließend die Chemikalienmenge angepasst oder das Experiment in Kleingruppen durchgeführt werden.

Um eine gute Visualisierung zu erzeugen, kann der Galalith zusätzlich mit Lebensmittelfarbe eingefärbt werden. Auch hier kann der biobasierte Kunststoff nach der Trocknung haptisch erkundet und auf seine Eigenschaften getestet werden.

Bei diesem Versuch sollten 20 Minuten veranschlagt werden, die Aufheizzeit der Heizplatten und die Experimentiererfahrung der Schülerinnen und Schüler ist weiterhin einzubeziehen. Weiterhin ist die Trocknungszeit wieder ein erheblicher Zeitfaktor, da sie erneut im Ofen und über Nacht erfolgt. Die Schülerinnen und Schüler sollten bereits Wissen über anorganische Substanzen erworben haben. Weiterhin wird in diesem Versuch eine Denaturierung beobachtet, wodurch dieses Phänomen und die dazugehörigen Mechanismen bereits behandelt worden sein sollten. Es ist davon auszugehen, dass die Schülerinnen und Schüler bereits Erfahrungen bei der Erkundung von chemischen Stoffen haben und ebenso von einer Grundkompetenz bezüglich des Experimentierens besitzen. Sie kennen demnach auch verschiedene Kriterien, um Stoffe vergleichend zu untersuchen.



V3 Langzeitexperiment

Beobachtungen:

- der normale Kunststoff zeigt keine Veränderung nach 4 Wochen
- die Stärkefolie beginnt zu schimmeln und dann sich zu zersetzen. Nach 4 Wochen ist er zersetzt
- der Galalith zeigt zunächst keine Veränderung, zeigt dann eine Geruchsentwicklung und wird schließlich weicher. Nach 4 Wochen ist er noch nicht zersetzt.

Auswertung:

3. Damit Stoffe verrotten können, bedarf es Mikroorganismen, die diese verarbeiten und zersetzen. Für (erdölbasierte) Kunststoffe gibt es diese Mikroorganismen nicht [12]. Die Stärkefolie besteht aus organischen Molekülketten. Diese können von aeroben Bakterien abgebaut werden. Im Vergleich besteht der Galalith auch aus anorganischen Verbindungen (Calciumverbindungen), die weniger schnell abgebaut werden können.
4. Biobasierte Kunststoffe sind Kunststoffe, die teilweise oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, aber nicht zwangsläufig abgebaut werden.
Biologisch abbaubare Kunststoffe sind Kunststoffe, die aus nachwachsenden oder nicht nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können und sich unter bestimmten Bedingungen in Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut werden.

Didaktischer Kommentar:

Lernziele:

Die Schülerinnen und Schüler können...

... anhand ihres Wissens Vermutungen aufstellen/erklären, weshalb sich die Proben unterschiedlich zersetzen.

... biobasierte von biologisch abbaubaren Kunststoffen unterscheiden.

... die daraus resultierende Umweltproblematik erläutern und beurteilen.

Dieses Experiment kann als Teil der Experimentierreihe eingesetzt werden, um den Zersetzungsprozess von (biobasierten) Kunststoffen zu untersuchen. Es kann, sofern die Experimentierreihe am Anfang der Stoffeinheit durchgeführt, als Begleitexperiment durchgeführt werden. Es sollte lediglich eine viertel Stunde veranschlagt werden, um die Proben in der Erde zu platzieren. Die Schülerinnen und Schüler sollten dabei unbedingt vorher über Zersetzungsprozesse informiert sein oder sich diese parallel zum Experiment anhand passender Aufgaben oder Informationstexte erarbeiten.





Die Lerneinheit kann dann beispielsweise von der Umweltthematik auf Kunststoffe und Nachhaltigkeit gelenkt werden und somit die Experimentierreihe als Einstiegs-/Erkundungsexperiment dienen, die Kontrolle über die Zersetzung kann je nach gebildeter Hypothese als Verifizierungsversuch dienen. Es können leicht verschiedene Vergleichsproben gewählt werden (wir schlugen hier Polyesterol vor) und so kann ein Vergleich mit Duo-Thermopasten gezogen werden und diese parallel zum Langzeitexperiment behandeln. Vor oder nach jeder neuen Unterrichtseinheit können die Lernenden gemeinsam den Fortschritt des Langzeitexperiments untersuchen. Da dieses Experiment mit einer Laufzeit von 4 Wochen sehr lang dauert, ist diese Integration im Unterricht nicht immer möglich. Jedoch kann es auch in ein Experiment zuhause umgewandelt werden, dabei darf es nur nicht aus den Augen gelassen werden, sonst verliert dieses Experiment den didaktischen Nutzen. (Ebenso könnte als alternatives Experiment auch Nylon selbst hergestellt werden und als dritte selbst hergestellte Probe untersucht werden. Da dieses Experiment sich aber eher als Lehrerdemonstrationsexperiment oder Lehrvideo eignet und nicht auch als „Home-Experiment“ umsetzbar ist, wurde der Versuch nicht für die Versuchsreihe ausgewählt.)

Um eine angemessene Auswertung zu gewährleisten, sollten die ersten beiden Experimente behandelt worden sein. So kann aufgrund des Aufbaus der hergestellten biobasierten Kunststoffe überlegt werden, wie die Beobachtungen zustande kommen. Dass Gesteine nicht verrotten, sondern verwittern, kann bereits bei der Behandlung von Salzen oder aus dem Geographieunterricht bekannt sein. Anderenfalls kann auf diesen Umstand im Zuge des Experiments erneut eingegangen werden. Organische Stoffe wie Stärke und Glycerin, die auch in Lebensmitteln vorkommen, können leichter von Bodenorganismen abgebaut werden.



IV. Referenzen

- [1] M. Vert, Y. Doi, K.-H. Hellwich, M. Hess, P. Hodge, P. Kubisa, M. Rinaudo, F. Schué, *Pure and Applied Chemistry* 2012, 84, 377.
- [2] Autor unbekannt, "Verbrauch von Mineralöl nach Mineralölprodukten in Deutschland in den Jahren 2018 und 2019", zu finden unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36559/umfrage/verbrauch-von-mineraloel-in-deutschland-seit-2008/>, 2020.
- [3] Helanto, Karoliina Emilia et al., *BioResources*, 2019, 4902.
- [4] G. Reddy, M. Altaf, B. J. Naveena, M. Venkateshwar, E. V. Kumar, *Biotechnology advances* 2008, 22.
- [5] Bernd Tieke, *Makromolekulare Chemie. Eine Einführung*, 3. Aufl., WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2014.
- [6] P. L. NAYAK, *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews* 1999, 39, 481
- [7] A. Steinbüchel, T. Lütke-Eversloh, *Biochemical Engineering Journal* 2003, 16, 81.
- [8] S. Yan, R. D. Tyagi, R. Y. Surampalli, *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 2006, 53, 175.
- [9] Umweltbundesamt, erschienen am 04.02.2020: <https://www.umweltbundesamt.de/biobasierte-biologisch-abbaubare-kunststoffe#32-darf-ich-biologisch-abbaubare-sammelbeutel-fur-die-bioabfallsammlung-im-haushalt-verwenden>
- [10] Thüringer Lehrplan Gymnasium, zu finden unter: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=3702>, 28.01.2021.
- [11] Thüringer Lehrplan Realschule, zu finden unter: <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2282>, 28.01.2021.
- [12] <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/verrottet-plastik-gar-nicht-nur-sehr-langsam>, 28.01.2021
- [13] <https://unipub.uni-graz.at/obvugrhs/download/pdf/5215271?originalFilename=true>, 10.01.2021
- [14] <https://projektbiokunststoff.wordpress.com/2017/02/07/kunststoff-aus-staerke/>, 10.01.2021



Verantwortliche Redaktion und Kontakt



Prof. Dr. Timm Wilke

Arbeitsgruppenleiter der AGCD

Timm Wilke wurde in Brüssel geboren. Aufgewachsen in Norddeutschland legte er das Abitur in Leer in Ostfriesland ab. Zum Studium der Chemie und Französisch auf Lehramt ging er nach Göttingen, wo er 2017 promovierte. Nach seiner Junior-Professur an der TU Braunschweig ist er seit dem Sommersemester 2020 Professor für Didaktik des Chemieunterrichts an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf der fachdidaktischen Rekonstruktion aktueller Forschungsthemen für Schule und Schülerlabor, der Entwicklung von digitalen Lehr-Lern-Werkzeugen (LabPi) mit begleitenden Lehr-Lern-Formaten, sowie der Erschließung von digitalen Lernumgebungen in Schüler- und Lehr-Lern-Laboren.



August-Bebel-Straße 2 | 07743 Jena
Raum E010



03641/9-48493



timw.wilke@uni-jena.de



<https://www.chemgeo.uni-jena.de/timmwilke>



Nicolai ter Horst

wissenschaftlicher Mitarbeiter AGCD

Nicolai ter Horst studierte Chemie und Latein auf Lehramt für das Gymnasium an der Georg-August-Universität Göttingen. Nach seinem Referendariat 2017 in Hameln und Springe arbeitete er als Studienrat am Ratsgymnasium Stadthagen. Seit April 2020 ist er Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Chemiedidaktik der Friedrich-Schiller-Universität Jena. In seinem Promotionsvorhaben beschäftigt er sich mit dem Aufbau eines digitalen Schülerlabors. In diesem sollen fachliche Aspekte aus den Experimenten vertieft und ein Einblick auf die Vorgänge auf Teilchenebene gegeben werden. Durch die Verknüpfung der Experimente mit e-learning Einheiten soll so die Lernwirksamkeit erhöht und Fehlvorstellungen entgegengewirkt werden.



August-Bebel-Straße 2 | 07743 Jena
Raum E011



03641/9-48496



nicolai.ter.horst@uni-jena.de



<https://www.chemgeo.uni-jena.de/nicolaiterhorst>

