

# Liebe Leserinnen!

# Liebe Leser!

Polymere sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Die langkettigen „Riesenmoleküle“ tauchen in den unterschiedlichsten Formen auf. Sie kommen sowohl in der Natur vor, wie z. B. die Polysaccharide und Proteine, und sie werden auch im großen Stil synthetisch hergestellt, z. B. Polyethylen und Polyvinylchlorid, um nur zwei von vielen Beispielen zu nennen. Synthetisch hergestellte Polymere sind als ‚Kunststoffe‘ oder alltagssprachlich als ‚Plastik‘ deutlich bekannter.

Polymere sind in vielen Produkten des täglichen Gebrauchs enthalten. Aufgrund ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten, der geringen Materialkosten und der Leichtigkeit der Materialien ersetzen sie seit Ende des 19. Jahrhunderts viele in der Industrie traditionell verwendete Stoffe, sei es beispielsweise in den Branchen Fahrzeugbau, Elektrotechnik, Bekleidung, Sport, Verpackung, Medizin, Kosmetik u.v.m. Die Anwendungsmöglichkeiten erscheinen unendlich und Kunststoffe haben eine viel größere Bedeutung erlangt als bloßer Materialersatz zu sein. Die Kunststoffbranche hat sich als einer der Wirtschaftszweige überhaupt etabliert.

Wir Verbraucher und Verbraucherinnen nutzen Polymere in ihrer natürlichen und künstlichen Form tagtäglich, teilweise wissentlich, häufiger jedoch unwissentlich. Insbesondere Schülerinnen und Schüler verwenden Produkte, ohne sich über deren Aufbau und Herkunft oder die Gründe für ihre besonderen Eigenschaften Gedanken zu machen. Kaum ein Schüler oder eine Schülerin weiß wahrscheinlich, dass er oder sie noch bis April 2015 beim täglichen Zähneputzen Kunststoffe zu sich genommen hat, bis dies offiziell in Österreich verboten wurde. Oder kaum jemandem ist sich bewusst, in welchem Maße Kunststoffe die Medizintechnik revolutioniert haben, bis man persönlich betroffen ist. Eher bekannt ist vielleicht, dass unsere Gewässer mittlerweile mit regelrechten ‚Plastikteppichen‘ belegt und durchzogen sind, die das Gleichgewicht unserer Umwelt massiv beeinflussen.

Aber ändert dieses Wissen unser Verhalten im Umgang mit Kunststoffabfällen? Zu einer naturwissenschaftlichen Grundbildung aufgeklärter Bürger und Bürgerinnen, die naturwissenschaftliche und technische Entwicklungen hinterfragen und verantwortungsbewusst mit ihrer Umwelt umgehen, gehört mehr als nur die bloße Anwendung



von Produkten. Und die Schule ist einer der Orte, wo über dieses Thema informiert und diskutiert werden kann, wo Schülerinnen und Schüler Zusammenhänge, Potentiale und Risiken selbständig entdecken und kritisch hinterfragen können.

Der Unwissenheit möchten wir mit diesem Heft begegnen. Wir möchten über ausgewählte fachwissenschaftliche Hintergründe informieren und Ihren Unterricht mit fachdidaktischen Vorschlägen inspirieren. Außerdem wollen wir zu einem reflektierteren und nachhaltigeren Umgang mit Polymeren anregen. Dafür haben wir Ihnen eine Reihe von kurzen Artikeln und Materialsammlungen zusammengestellt, die die Vielfalt und die Bandbreite des Themas widerspiegeln sollen. Dabei wechseln fachdidaktische mit fachwissenschaftlichen Fokussen.

Wir hoffen, dass Sie die Arbeit zum Thema Polymere in ihren Klassen als genauso anregend erleben wie wir und dass dieses Heft dazu seinen Teil beiträgt.

Gutes Gelingen und eine spannenden Lektüre wünschen stellvertretend für das AECC Chemie

Anja Lembens und Simone Abels

# Forschendes Lernen und das 5E-Modell

Elisabeth Hofer, Simone Abels, Anja Lembens

Als Forschendes Lernen (Inquiry-based Learning) wird ein Unterrichtskonzept bezeichnet, bei dem Wissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten bzw. Kompetenzen im Zuge naturwissenschaftlicher Untersuchungen aufgebaut, vertieft und gefestigt werden sollen. Neben der Erarbeitung fachlicher Inhalte ist beim Forschenden Lernen auch der Erwerb von Kompetenzen in Bezug auf das Experimentieren von großer Bedeutung: Fragen stellen, Hypothesen bilden, Untersuchungen planen und durchführen, Vorgänge beobachten, Beobachtungen und Ergebnisse protokollieren, Ergebnisse interpretieren usw. Durch diese Art des Lernens sollen die SchülerInnen außerdem erfahren, wie Untersuchungsergebnisse zu (wissenschaftlichen) Erkenntnissen führen können [1, 2].

Entsprechend der Kenntnisse und Erfahrungen der SchülerInnen in Bezug auf das Forschende Lernen bzw. in Abstimmung auf deren individuelle Bedürfnisse, kann Forschendes Lernen auf verschiedenen Stufen gestaltet werden. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, dass die SchülerInnen mit Unterstützung der Lehrperson die dazu erforderlichen Kompetenzen nach und nach erlangen und erweitern. In Abhängigkeit davon, welche Phasen der Untersuchung durch Vorgaben von der Lehrperson geprägt sind, wird beim Forschenden Lernen von verschiedenen Levels gesprochen (Tab. 1) [2, 3]. Außerdem ist es möglich, Einheiten zum Forschenden Lernen so zu gestalten, dass sie für SchülerInnen verschiedener Leistungsniveaus geeignet sind und entsprechend der individuellen Bedürfnisse bearbeitet werden können [4].

	Fragestellung	Untersuchungsmethode	Ergebnisinterpretation
Level 0: <b>bestätigend</b>	Lehrperson	Lehrperson	Lehrperson
Level 1: <b>strukturiert</b>	Lehrperson	Lehrperson	SchülerInnen
Level 2: <b>begleitet</b>	Lehrperson	SchülerInnen	SchülerInnen
Level 3: <b>offen</b>	SchülerInnen	SchülerInnen	SchülerInnen

Tab. 1: Level von Forschendem Lernen [2, S. 5; 3, S. 581]

Als Möglichkeit, eine Unterrichtseinheit nach dem Konzept des Forschenden Lernens aufzubauen, kann das 5E-Modell herangezogen werden. Es verläuft in vier aufeinander folgenden Phasen (Engage, Explore, Explain, Extend), welche jeweils von einer Evaluate-Phase begleitet werden (Abb. 1) [5].

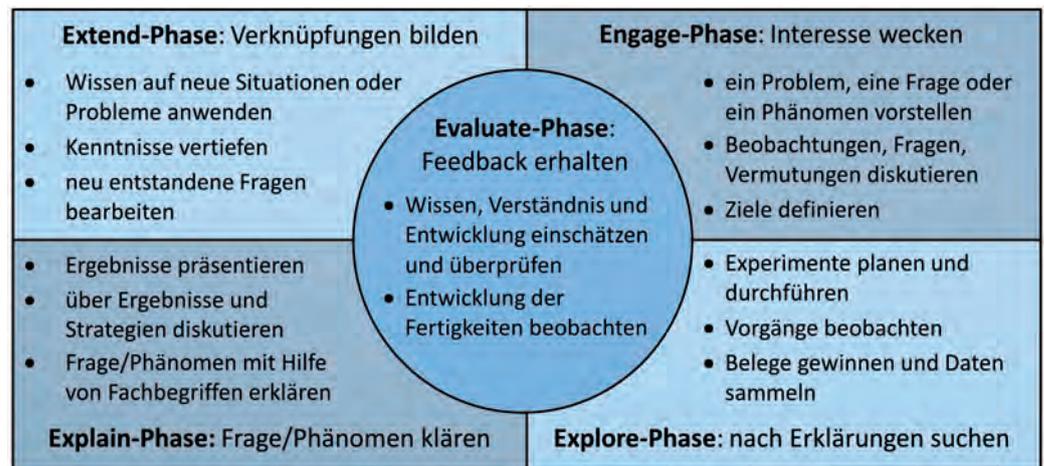


Abb. 1: 5E-Modell [5, 6]

## Literatur

[1] Abrams, E., et al.: Introduction: Inquiry in the Classroom: Identifying Necessary Components of a Useful Definition, in E. Abrams, et al. (Eds.) 2008: Inquiry in the Classroom: Realities and Opportunities, Charlotte, North Carolina, Information Age Publishing, Inc.  
 [2] Abels, S. und Lembens, A.: Mysteries als Einstieg ins Forschende Lernen im Chemieunterricht. Chemie & Schule, 2015. 30(1b): S. 3-5.

[3] Blanchard, M.R., et al., Is inquiry possible in light of accountability? Sci. Ed., 2010. 94(4): S. 577-616.  
 [4] Abels, S., Puddu, S., and Lembens, A.: Wann flockt die Milch im Kaffee? Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie, 2014. 25(142): S. 37-41.  
 [5] Bybee, R.W.: The BSCS 5E instructional model and 21st century skills. Colorado Springs, CO: BSCS, 2009.  
 [6] WISD 2015. The 5E Model of Instruction. <http://www.wisd.org/users/0001/docs/GVC/5E%20Model.pdf> [15.10.2015]

# Mit Concept Cartoons Fragen für den Unterrichtseinstieg ins Thema ‚Kunststoffe‘ entwickeln

Rosina Steininger

„Klug fragen können,  
ist die halbe Weisheit.“  
Sir Francis von Verulam Bacon  
(1561 – 1626)

Concept Cartoons sind Unterrichtswerkzeuge, die SchülerInnen zum Nachdenken und Diskutieren anregen sollen [1]. Sie zeigen eine Gruppe von Personen, die miteinander im Gespräch sind. Im Zentrum ihres Gesprächs steht eine implizit oder explizit gestellte Frage zu einem naturwissenschaftlichen Sachverhalt oder Thema. Die für einen Cartoon typischen Sprechblasen enthalten unterschiedliche Antworten auf die zentrale Frage.

Unter diesen Antworten sind sowohl wissenschaftlich angemessene Erklärungsansätze als auch alternative SchülerInnenvorstellungen. Die SchülerInnen werden dazu angehalten, zu den einzelnen Statements Stellung zu nehmen und selbst eine Antwort auf die Frage zu erarbeiten. Anders als bei Multiple-Choice-Aufgaben geht es nicht darum, die eine „richtige“ Antwort auszuwählen, sondern sich der eigenen

Vorstellungen bewusst zu werden, sie zu verbalisieren und zu konkretisieren und im Gespräch mit anderen weiterzuentwickeln. Dabei wird in der Regel deutlich, was man an Wissen noch in Erfahrung bringen muss.

Concept Cartoons eignen sich insbesondere für den Unterrichtseinstieg in ein neues Thema, weil sie bei vielen SchülerInnen eine fragende Haltung initiieren [2]. Sie können jedoch ebenso zum Wiederholen oder im Zuge einer Leistungsfeststellung eingesetzt werden. Die Arbeit kann dabei sowohl als Einzel-, Partner- oder Gruppenarbeit als auch im Plenum erfolgen. Die Arbeit in Kleingruppen hat den Vorteil, dass die SchülerInnen in der Regel rasch ins Diskutieren kommen, weil sie unterschiedliche Vorstellungen haben und diese ungehindert äußern können.

## Wie werden Kunststoffe hergestellt?



Abb. 1: Concept Cartoon zur Frage ‚Wie werden Kunststoffe hergestellt?‘

Im Folgenden soll gezeigt werden, wie der Einstieg ins Thema ‚Kunststoffe‘ mit Hilfe von Concept Cartoons gestaltet werden kann. Dieses Setting habe ich in einer 8. Klasse (12. Schulstufe) erfolgreich erprobt.

## Das Thema ‚Kunststoffe‘

Im Lehrplan der AHS für Chemie (Sekundarstufe 1 und 2) wird weder der Begriff ‚Kunststoffe‘ noch der Begriff ‚Polymere‘ explizit genannt. Dass dieses Thema dennoch von großer Relevanz ist, zeigt sich etwa daran, dass es geeignet ist, viele im Lehrplan angeführte Lehr-Lern-Ziele zu verfolgen. So ist beispielsweise im Lehrplan der Sekundarstufe 1 im Abschnitt ‚Lehrstoff‘ zu lesen, die SchülerInnen sollen *„Wissen um die Bedeutung, Gewinnung und Verarbeitung fossiler Rohstoffe, [...] um den Stellenwert von Altstoffen und deren Entsorgung oder Wiederverwertung (sowie) prinzipielles Verstehen von Umweltproblemen als Störung natürlicher Systeme“* erwerben [3]. Im Lehrplan der Sekundarstufe 2 lässt sich das Thema ‚Kunststoffe‘ sowohl im Lehrstoff unter den Stichworten *„Rohstoffe, Synthesen und Kreisläufe“* als auch in den Beiträgen zu den Bildungsbereichen und in den didaktischen Grundsätzen verorten. Als Beitrag zum Bildungsbereich *„Mensch und Gesellschaft“* ist *„Verantwortung für den nachhaltigen Umgang mit materiellen und energetischen Ressourcen über die Grenzen hinweg“* angeführt. Unter dem Bildungsbereich *„Natur und Technik“* ist *„Grundlegende Kenntnisse über Funktion und Vernetzung natürlicher und anthropogener Stoffkreisläufe; vertieftes Verständnis für die Beziehung von Struktur und Eigenschaften von Stoffen und deren gezielte Veränderungen“* als Ziel angegeben [4].

Aus den angeführten Lehr-Lern-Zielen ergeben sich sechs Leitfragen zur Erarbeitung des Themas ‚Kunststoffe‘:

- Woraus bestehen Kunststoffe?
- Wie werden Kunststoffe hergestellt?
- Welche Eigenschaften haben Kunststoffe?
- Sind Kunststoffe umweltschädlich?
- Was tun mit den Kunststoffen im Müll?
- Ist Kunststoffrecycling sinnvoll?

Jede dieser Leitfragen eignet sich als Einstieg und auch als Überschrift für einen Concept Cartoon. LehrerInnen und SchülerInnen, die einen fachsystematischen Zugang bevorzugen, werden eher mit den oberen Fragen der Liste beginnen wollen. LehrerInnen und SchülerInnen, für die die Alltagsrelevanz besonders wichtig ist, wählen wahrscheinlich bevorzugt eine der weiter unten angeführten Fragen. Es ist aber auch möglich, mit mehreren Fragen gleichzeitig einzusteigen, um von Anfang an die Vielschichtigkeit des Themas aufzuzeigen.

## Der konkrete Einstieg

Für eine 8. Klasse (12. Schulstufe) wählte ich folgenden Einstieg: Die SchülerInnen wurden zunächst in sechs Gruppen zu je drei bis vier SchülerInnen eingeteilt. Jede Gruppe erhielt einen Concept Cartoon. Graphisch waren alle sechs Concept Cartoons gleich gestaltet (Abb. 2), jeder enthielt jedoch eine andere Leitfrage und dementsprechend auch ein jeweils spezifisches Set an Sprechblasentexten. Aus Erfahrungen der vergangenen Jahre weiß ich, dass Gruppen oft intensiver arbeiten, wenn sie ihr „eigenes“ Thema bearbeiten können. Die Arbeit erfährt auf diese Weise mehr Bedeutung für die Gruppe, und die SchülerInnen können nicht einfach abwarten, welche Ergebnisse andere Gruppen in der Plenarphase präsentieren.

**Der Arbeitsauftrag an die SchülerInnen lautete wie folgt:**  
*„Diskutiert in der Kleingruppe, wie ihr die Leitfrage beantworten würdet! Nehmt dabei auch Stellung zu den Aussagen der abgebildeten Personen! Begründet, warum ihr manche der Aussagen für angemessen haltet und andere nicht! UND sammelt Fragen, die während der Diskussion aufgetaucht sind, und die ihr in der Gruppe nicht beantworten könnt!“*

Im Anschluss an die Diskussionsphase wurden die SchülerInnen gebeten, ihre vorläufigen Erklärungsansätze und die offenen Fragen in Einzelarbeit schriftlich festzuhalten. Diese Notizen waren die Grundlage für meine weitere Unterrichtsplanung. Sie gaben mir zum einen Einblick in die Vorstellungen und den Wissensstand der SchülerInnen, zum anderen wurde evident, welche Fragen für die SchülerInnen von Bedeutung waren.

### Beispiele von Fragen, die SchülerInnen formuliert haben:

- Welche Stoffe im Erdöl werden zur Herstellung von Kunststoffen verwendet?
- Was macht Kunststoffe so stabil?
- Warum verrotten Kunststoffe so langsam, obwohl sie organisch sind?
- Gibt es auch anorganische Kunststoffe?
- Schwimmen alle Kunststoffe?
- Können Kunststoffe von starken Säuren oder Basen zersetzt werden?
- Was genau versteht man unter „BIOLOGISCH abbaubar“?
- Sind Kunststoffe wasserlöslich?
- Fangen Kunststoffe irgendwann an, durch ihre ständige Verkleinerung mit dem Wasser doch zu reagieren?
- Besitzen Kunststoffe eine Halbwertszeit?
- Was passiert mit Plastik, wenn es verbrannt wird?
- Bei welchen Materialien lohnt es sich, den Müll zu trennen?

Die Fragen ließen erkennen, dass die SchülerInnen sich auf das Thema eingelassen hatten, und dass sie an bestimmten Aspekten, allen voran der Umweltproblematik, Interesse zeigten. Diese Sensibilität beruhte sowohl auf dem im Jahr 2009 erschienenen Film „Plastic Planet“ [5] und der dadurch verstärkten medialen Präsenz des Problems der schwimmenden Inseln aus Plastikmüll in den Weltmeeren als auch auf dem Problem der Kunststoff-Mikropartikel in Kosmetikprodukten (s. auch Abels & Lembens in diesem Heft).

Der Auftrag, Fragen zu formulieren, sollte bei den SchülerInnen nicht nur eine fragende Haltung initiieren und ihre Interessensschwerpunkte sichtbar machen, sondern ihnen auch die Lerngelegenheit eröffnen, das Fragenstellen an sich zu üben. Im fragend-entwickelnden Unterrichtsgespräch gibt die Lehrperson durch ihre Fragen den Unterrichtsverlauf vor. In der Regel bringen nur besonders leistungsstarke oder motivierte SchülerInnen dabei auch selbst Fragen ein. Sie verfügen bereits über überdurchschnittlich viel Vorwissen und haben meist auch mehr Interesse als ihre MitschülerInnen. Beides hilft ihnen dabei, anspruchsvolle Fragen zu stellen. Und sie können davon ausgehen, dass diese Fragen als konstruktiver Beitrag zum Unterricht willkommen geheißen werden. Leistungsschwächere SchülerInnen hingegen sind oft unsicher, ob ihre Fragen nicht eher als Zeichen ihrer eigenen Unzulänglichkeit denn als Zeichen ihres Interesses interpretiert werden. Sie haben sich das Fragenstellen häufig angewöhnt. Fragen regen jedoch zum Denken an, und zwar allen voran jene Fragen, die nicht von außen an eine Person herangetragen werden, sondern die sie sich selbst stellt. Sie weisen die Richtung, in der der eigene Horizont erweitert werden will. Deshalb ist es wichtig, alle SchülerInnen einzuladen und zu ermutigen, Fragen zu stellen und ihnen ausreichend Gelegenheit zu geben, das auch zu üben.

## Wie ging es weiter?

In der darauffolgenden Stunde erarbeiteten wir die Einteilung der Kunststoffe nach ihren physikalischen Eigenschaften (Thermoplaste – Elastomere – Duroplaste) und nach der Art der Verknüpfung ihrer Bausteine (Polymerisate – Polykondensate – Polyaddukte). Danach hatten die SchülerInnen die Wahl, eine Unterrichtseinheit lang entweder in Zweiergruppen praktisch zu arbeiten und Experimente nach vorgegebenen Anleitungen durchzuführen oder zu einem Thema ihrer Wahl aus dem Themenkreis der Kunststoffe in Einzelarbeit zu recherchieren. Die Recherchethemen reichten von ‚PVC‘ über ‚Epoxidharze‘ bis zu ‚Kunststoffe in der Medizin‘ und ‚Recycling von PET-Flaschen‘. In beiden Fällen sollten die SchülerInnen die Ergebnisse ihrer Arbeit auf ein bis zwei Seiten schriftlich festhalten.

Im Anschluss an diese beiden Stunden kam ich auf die Fragen der SchülerInnen, die sie nach den Gruppendiskussionen rund um die Concept Cartoons gestellt hatten, zurück. Ich hatte sie in der Zwischenzeit thematisch nach den sechs Leitfragen (s. oben) sortiert und mich fachlich vertieft. In einer ausführlichen Plenarphase machte ich die

sechs Concept Cartoons und die dazugehörigen Fragen der SchülerInnen mittels Power-Point-Präsentation nach und nach allen SchülerInnen zugänglich und diskutierte sie in der Klasse.

Dabei stellten die SchülerInnen fest, dass sie einige Fragen mittlerweile selbst beantworten konnten, wie beispielsweise die Fragen nach den Unterschieden zwischen den einzelnen Arten der Kunststoffe. Darüber hinaus konnten einzelne SchülerInnen aufgrund ihrer persönlichen Recherche oder der von ihnen durchgeführten Experimente ihr Expertenwissen einbringen. Sie erlebten, dass sie etwas dazugelernt hatten und dass ihr Tun, egal ob die Recherche oder das praktische Arbeiten, auch insofern von Bedeutung war, als sie nun ihre MitschülerInnen an ihrem neu erworbenen Wissen teilhaben lassen konnten.

Ich selbst lieferte weitere Informationen zur Beantwortung der noch offenen Fragen. Inspiriert von den Fragen der SchülerInnen hatte auch ich im Vorfeld ausgiebig recherchiert. Mit Hilfe möglichst aktueller Daten, Grafiken und einem kurzen Video [6] aus dem Internet, konnte ich so den SchülerInnen beispielsweise erklären, warum Bioplastik nicht gleich Bioplastik ist [6, 7], oder dass trotz Mülltrennung in Österreich im Jahr 2012 nur 25% der Kunststoffabfälle recycelt wurden [8]. Offenkundig wurde jedoch auch, dass meinem Bemühen, die Fragen der SchülerInnen zu beantworten, Grenzen gesetzt waren: Auf so manche simpel klingende SchülerInnenfrage gibt es keine einfache Antwort.

Das Thema ‚Kunststoffe‘ ist sowohl aufgrund der Vielzahl der unter einem Schlagwort zusammengefassten Stoffe als auch aufgrund der Vielschichtigkeit der mit ihrer Herstellung und Entsorgung verbundenen Probleme äußerst komplex. Die Arbeit mit den Concept Cartoons ermöglicht es, dieser Komplexität von Anfang an Raum zu geben und einen Rahmen zu gestalten, innerhalb dessen das Thema bearbeitet werden kann.

## Nachtrag

### Erfahrungen eines jungen Kollegen, ebenfalls in einer 8. Klasse AHS

*„Es kam gleich zu einer wirklich guten, produktiven Diskussion. Ich musste nur sehr wenig lenkend eingreifen. Es ist mir leichter als normal gefallen, schüchterne SchülerInnen anzusprechen und zur Beteiligung zu motivieren, da ich einmal selbst nicht so viel reden musste. Die Diskussion hat zwar relativ lange gedauert (letztlich hat der Input sicher 20 bis 30 Minuten gekostet).*

*Ich sehe es aber als eine gute Investition – die SchülerInnen wirkten motivierter als sonst und die gesammelten Fragen können nun im Verlauf des Themas beantwortet werden. Eine Frage, die immer wieder auftauchte, war „Was ist der Unterschied zwischen Plastik und Kunststoff? Ist es eh dasselbe, ist da ein Unterschied?“*

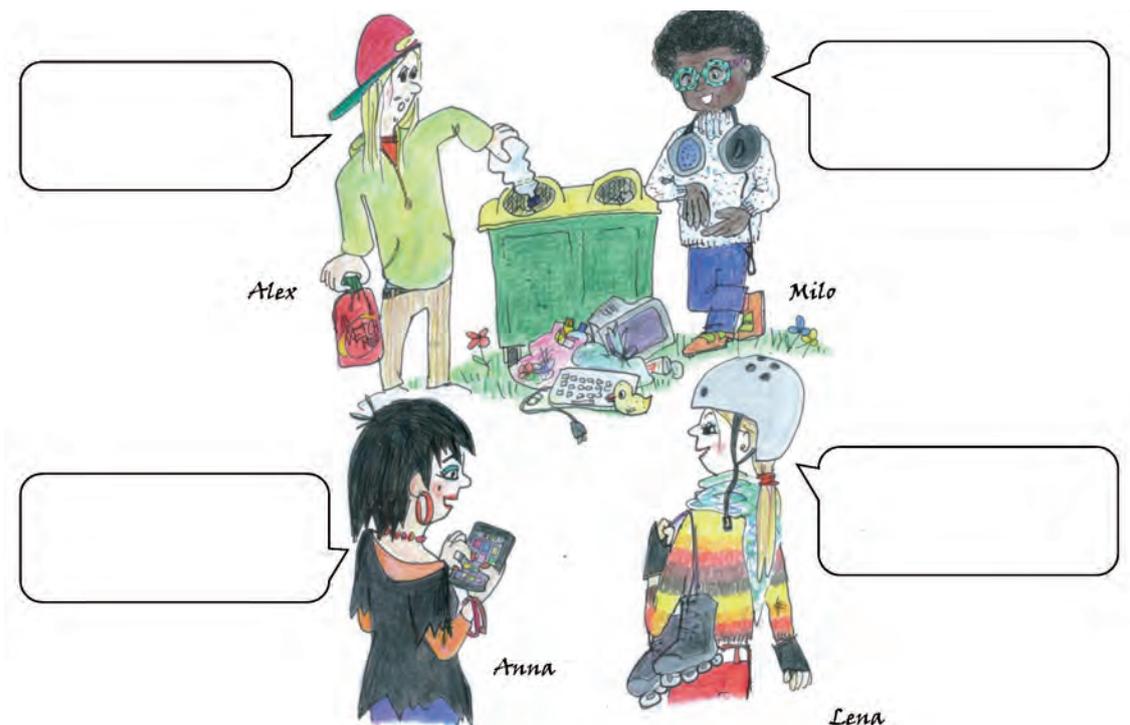


Abb. 2: Blankovorlage für einen Concept Cartoon zum Thema ‚Kunststoffe‘

## Leitfragen und Texte für die Sprechblasen

### Woraus bestehen Kunststoffe?

- aus Erdöl
- hauptsächlich aus Kohlenstoff und Wasserstoff
- aus Makromolekülen
- aus PVC und Weichmachern

### Wie werden Kunststoffe hergestellt? (vgl. Abb. 1)

- Erdöl und irgendwelche Pulver werden erhitzt und geformt.
- Die Rohstoffe werden miteinander verschmolzen und zusammengepresst.
- Atome schließen sich zusammen und bilden lange Ketten.
- Bestimmte Moleküle werden regelmäßig angeordnet und durch chemische Vorgänge „fest“ gemacht.

### Welche Eigenschaften haben Kunststoffe?

- Kunststoffe sind Isolatoren.
- Kunststoffe werden von Menschenhand künstlich hergestellt, sind biologisch nicht abbaubar.
- Plastik lässt sich leicht verformen.
- Kunststoffe sind wasser- und luftdicht und schwimmen.

### Sind Kunststoffe umweltschädlich?

- Ja, denn sie sind biologisch nicht abbaubar.
- Nein, denn bei ihrer Verbrennung entstehen nur unbedenkliche Gase.
- Ja, denn sie können als Mikropartikel ins Wasser gelangen.
- Nein, denn sie sind nicht wasserlöslich und verwittern ähnlich wie Gesteine.

### Was tun mit den Kunststoffen im Müll?

- Mit dem restlichen Hausmüll verbrennen.
- Getrennt sammeln und wiederverwerten.
- Das hängt davon ab, um welchen Kunststoff es sich

handelt und davon, wo man gerade ist.

- Klein zusammendrücken, damit er auf der Deponie möglichst wenig Platz braucht.

### Ist Kunststoffrecycling sinnvoll?

- Nein, weil daraus nur minderwertige Kunststoffe hergestellt werden können.
- Nein, weil die Trennung nach Sorten zu teuer ist.
- Ja, weil damit Energie und Rohstoffe gespart werden können.
- Ja, weil man sich so die Entsorgung erspart.

### Literatur

- [1] Stenzel, R. & Eilks, I. (2005). Gesprächsanlässe schaffen mit Concept Cartoons. Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule, 54(8), 44-47.
- [2] Steininger, R. (2011). Unterrichtseinstieg via Concept Cartoons. Chemie & Schule (4), 8-10.
- [3] [https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/ahs6\\_780.pdf?4dzgm2](https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/ahs6_780.pdf?4dzgm2) [Okt. 2015]
- [4] [https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp\\_neu\\_ahs\\_09\\_11861.pdf?4dzgm2](https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_neu_ahs_09_11861.pdf?4dzgm2) [Okt. 2015]
- [5] <http://www.plastic-planet.at/> [Okt. 2015]
- [6] <http://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/videos/bioplastik-alles-abbaubar-100.html> [Okt. 2015]
- [7] <http://www.engineering-igmetall.de/biokunststoffe-bio-ist-nicht-gleich-gr%C3%BCn> [Okt. 2015]
- [8] [http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final\\_plastics\\_the\\_facts\\_2014\\_2015\\_260215.pdf](http://www.plasticseurope.org/documents/document/20150227150049-final_plastics_the_facts_2014_2015_260215.pdf) [Okt. 2015]

# Eigenschaften von Kunststoffen – ein Stationenbetrieb

Simone Abels, Brigitte Koliander, Tanja Radinger

In diesem Artikel wird eine zweistündige Unterrichtseinheit zum Thema „Eigenschaften von Kunststoffen“ vorgestellt. Wir haben für diesen Artikel das Format eines Erfahrungsberichts gewählt, da die Einheit von fünf Studierenden in einer Klasse mit 20 SchülerInnen (9. Schulstufe) bereits erprobt wurde.

## Rahmenbedingungen

**Klassenstufe:** ab 4. Klasse NMS/AHS (8. Schulstufe) und höher

**Unterrichtsziel der ersten Einheit:** Die Schülerinnen und Schüler können Eigenschaften von Kunststoffen anhand verschiedener Experimente eruieren und den verschiedenen Kunststoffarten zuordnen.

**Unterrichtsziel der zweiten Einheit:** Die Schülerinnen und Schüler können die Kunststofftypen anhand ihrer Eigenschaften unterscheiden.

**Fachbezug:** Die SchülerInnen können Eigenschaften aufzählen, durch die man Kunststoffe unterscheiden kann. Sie ordnen die Abkürzungen „PP“, „PE“, „PVC“, „PS“ und „PET“ unterschiedlichen Kunststoffen zu.

**Handlungsdimension ‚Erkenntnisse gewinnen‘:** Die SchülerInnen können Versuchsanleitungen befolgen, Experimente planen und durchführen und ihre Ergebnisse so dokumentieren, dass sie auf dieser Basis Folgefragen nachgehen können.

**Handlungsdimension ‚Schlüsse ziehen‘:** Sie können die Bedeutung des Recyclings von Kunststoffen erklären und daraus Folgerungen für die Mülltrennung ableiten (und richten ihr eigenes Verhalten danach).

**Methode:** Stationenbetrieb und ExpertInnenpuzzle

**Dauer:** zwei bis drei Stunden

## Erprobung

Der Stationenbetrieb wurde im Sommersemester 2014 im Rahmen des Vertiefungsseminars der Chemiedidaktik, geleitet von Simone Abels und Brigitte Koliander, an der Universität Wien von Tanja Radinger, Bianca Traxler, Lydia Wölflingseder, Natalja Krendelsberger und Peter Grill ent-

wickelt und in einer 1. HAK Klasse (9. Schulstufe) mit zwei Lehrpersonen pro Schulstunde erprobt.

## Stundeneinstieg

Zu Beginn der Doppelstunde werden die SchülerInnen gefragt: Was in diesem Raum, an euch, in euren Schultaschen, ist aus Kunststoff?

Eine der Lehrpersonen sammelt die Vorschläge der SchülerInnen auf einem Flipchart: Tische, Sessel, Stifte, Flaschen, Becher, Taschen, Handy, Hefteinband, Brille, Haarspange, Kette, Uhrband, Gürtel, ... die SchülerInnen finden vieles! Manche Gegenstände können auf Hinweise/Beschriftungen untersucht werden, um festzustellen, um welchen Kunststoff es sich handelt: PET-Flaschen, Plastiksackerl oder Joghurtbecher haben einen Hinweis aufgedruckt. Anschließend wird den SchülerInnen ein kurzes Video zum Thema ‚Recycling von PET-Flaschen‘ [1] gezeigt. Um den SchülerInnen das Verständnis zu erleichtern bzw. sie auf wichtige Dinge zu fokussieren, bekommen sie zu dem Video einen Begleitbogen mit vier kurzen Fragen:

- Um welchen Kunststoff geht es hier?
- Welche Schritte gibt es beim Recycling?
- Was kann aus dem Recycling-Material hergestellt werden?
- Wie viel Prozent „altes“ PET ist in einer neuen Flasche enthalten?

In diesem Video lernen die SchülerInnen bereits eine Kunststoffsorte und (bei genauem Hinsehen) eine für den Recycling-Prozess entscheidende Eigenschaft (hier: Dichte) kennen. Die Fragen ermöglichen eine Fokussierung auf das Schaffen von Neuem aus alten PET-Flaschen und auf die Bedeutung des Recyclings. Nach dieser ersten Hinführung findet erneut ein Brainstorming mit freien Assoziationen zum Thema ‚Kunststoffe‘ statt. Diesmal soll das Vorwissen der SchülerInnen sichtbar werden. Die Antworten können in einem Mindmap auf der Tafel gesammelt werden und sollen die SchülerInnen zur Grundidee der Unterrichtseinheit führen – es gibt verschiedene Kunststoffe, die sich in ihren Eigenschaften unterscheiden. Gegebenenfalls kann diese Phase mit dem ersten Brainstorming der vorhandenen Kunststoffgegenstände zusammengefasst und ergänzt werden.

In der nächsten Unterrichtsphase sollen die SchülerInnen in Kleingruppen verschiedene Kunststoffe auf ihre Eigen-

schaften hin prüfen. Die SchülerInnen werden mittels Losverfahren in fünf Gruppen eingeteilt. Es gibt Lose in fünf verschiedenen Farben, jeweils von eins bis vier durchnummeriert. Die erste Gruppeneinteilung erfolgt nach den Farben: alle Blauen, alle Roten, alle Grünen, ... gehen in eine Gruppe (s. Abb. 1). Der Farbcode ist auch an den fünf Stationen zu finden (die Anleitungen zu den fünf Stationen sind als Anhang beigefügt). Jeder Schüler, jede Schülerin geht zu der zugelosten Station, um Experimente mit den Kunststoffen durchzuführen und sich als ExpertInnen auszubilden.



Abb. 1: Strukturierung der ExpertInnengruppen und Puzzleguppen (Darstellung verändert nach dem Entwurf von Lydia Wölflingseder)

## Tipps aus der gemachten Erfahrung

- Erst zu Beginn der Stunde kann über die Anzahl der Lose und Stationen sowie Personen pro Gruppe entschieden werden, je nach anwesenden SchülerInnen. Es ist nicht klug, z. B. zwölf SchülerInnen auf fünf Stationen zu verteilen, da sind drei oder vier Stationen genug.
- Das Prinzip der ExpertInnengruppen sollte den SchülerInnen gut erklärt werden: Alle müssen die Station verstanden haben, da nachher die Gruppen gemischt werden und oft nur eine/r von dieser Station in der neuen Gruppe ist. Auch die Bedeutung des Protokollschreibens muss betont werden: Aus dem Protokoll muss ersichtlich sein, wie die Analyse durchgeführt wurde und welcher Kunststoff wie reagiert hat.
- Sicherheitsaspekte (Schutzbrille, Haare zusammenbinden, Umgang mit dem Brenner etc.) müssen eingeführt sein und zu Beginn der Einheit wiederholt werden.

## Methode des ExpertInnenpuzzles

Ziel der Methode ist es, sich für einen bestimmten Sachverhalt Wissen anzueignen, das man anderen im direkten Austausch mitteilen kann. Jede Kleingruppe (empfehlenswert: zwei bis vier Personen) erarbeitet sich den Lerninhalt entlang einer Aufgabenstellung mittels Texten, Experimenten o.ä., um zu ExpertInnen für einen Teilaspekt eines Themas zu werden. Aus jeder ExpertInnengruppe kommt dann je eine Person in eine neue Gruppe, die sog. Puzzlegruppe, in der das Wissen zusammengeführt wird (Abb. 1 oben). Die Methode eignet sich zur gemeinsamen Erarbeitung umfangreicher Gebiete, wenn dieses Wissensgebiet gut in Teilbereiche untergliedert werden kann [2].

## Erarbeitungsphase

Jede der fünf Gruppen erhält ein Arbeitsblatt (s. Anhang) mit dem Auftrag, sechs verschiedene Kunststoffe (Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC), Polystyrol (PS), Polyethylenterephthalat (PET) und Polycarbonat (PC)) auf eine bestimmte Eigenschaft zu prüfen. Die Kunststoffproben sind für alle Gruppen gleich, jede Gruppe prüft die Materialien aber auf eine andere Eigenschaft hin. Jede/r Schüler/in muss die Beobachtungen am Arbeitsblatt dokumentieren, um mit dem Protokoll dann in der nächsten Runde in einer anderen Gruppe weiterarbeiten zu können. Folgende Experimente könnten angeboten werden:

- Abschätzen der Dichte von Kunststoffen
- Chlornachweis in Kunststoffen
- Brennprobe von Kunststoffen
- Schmelzen von Kunststoffen
- Löslichkeit von Kunststoffen in Aceton



Abb. 2: Abschätzen der Dichte von Kunststoffen: PE-Granalien (grün) und PVC-Granalien (weiß) in Wasser. PE schwimmt, PVC sinkt zu Boden.



Abb. 3: Schmelzprobe von Kunststoffen: PS (farblos, links) und PVC (grau, rechts) vor dem Erhitzen (oben) und nach dem Erhitzen (unten) in einem Reagenzglas. PS schmilzt zu einer farblosen Flüssigkeit, PVC bläht sich auf und wird schwarz.

Die Arbeitsblätter wurden von den Studierenden nach Vorlagen von [3] weiterentwickelt. Sie sind auf Level 1 des Forschenden Lernens angelegt (d.h. Fragestellung und Durchführung sind vorgegeben, s. Einführungsartikel [4]).

Wenn alle Gruppen ihr Experiment abgeschlossen und Expertise erworben haben, beginnt die nächste Arbeitsphase.

### Tipp aus der gemachten Erfahrung

Da die Experimente unterschiedlich lang dauern, sollten Ergänzungsaufgaben bereit stehen: z. B. über die Kunststoffe, ihre Verwendung, ihre Herstellung o.ä. im Internet zu recherchieren; weitere Filme bereit stellen, die man auf einem Laptop ansehen kann; Biokunststoffe mit Lugolscher Lösung auf Stärke testen etc.

### Vertiefungsphase

Nun sollen sich die SchülerInnen entsprechend der auf den Losen aufgedruckten Nummern (s. Abb. 1) neu gruppieren. In jeder neuen Gruppe sollte von jeder der ursprünglichen ExpertInnengruppen mindestens eine Person vertreten sein. Eventuell können manche Themen auch von zwei Personen besetzt sein.

Die neuen Puzzlegruppen erhalten eine unbekannte Kunststoffprobe. Diese soll natürlich von einem anderen Gegenstand stammen, damit nicht von Form und Farbe schon auf die Kunststoffart geschlossen werden kann (Tab. 1).

Jetzt wird es anspruchsvoll, und das haben die SchülerInnen auch bemerkt. Manche Gruppe sitzt etwas hilflos da und die SchülerInnen wissen nicht, wo sie jetzt anfangen könnten. Da sie auf der Basis ihres zuvor erworbenen Wissens das genaue Vorgehen planen müssen, ist diese Aufgabe auf Level 2 des Forschenden Lernens angesiedelt (s. Einführungsartikel in diesem Heft). Die Lehrpersonen gehen zu den Gruppen, die gar nicht weiter kommen, und versuchen, die SchülerInnen mit Nachfragen auf Ideen zu bringen. Es rächt sich jetzt auch, wenn SchülerInnen in den ExpertInnengruppen nicht gut mitgemacht haben. Dann können sie ihrer neuen Gruppe nicht helfen, die Analyse durchzuführen, oder sie wissen nicht mehr, welcher Kunststoff wie reagiert hat.

Kunststoff	Gegenstände
Polyethylen (PE)	Flaschenverschlüsse, Müllsäcke, Ketchupflasche
Polypropylen (PP)	Rohre, Getränkeboxen, Behälter
Polyvinylchlorid (PVC)	Rohre, Folien, Schallplatten
Polystyrol (PS)	Kaffeebecher, Joghurtbecher
Polyethylenterephthalat (PET)	Trinkflaschen
Polycarbonat (PC)	CDs

Tabelle 1. Gegenstände aus verschiedenen Kunststoffen

Je öfter die Methode des ExpertInnenpuzzles angewandt wurde, desto besser können die SchülerInnen umsetzen, worauf es dabei ankommt.

Sobald die Gruppen durch Ergebnisse aus den selbst geplanten Analysen eine begründete Vermutung haben, um welchen Kunststoff es sich handelt, melden sie dies an eine der beiden Lehrpersonen. Die SchülerInnen sind gespannt: Stimmt unsere Vermutung? Es kann überprüft werden, ob die Zuordnung stimmt. Wenn ja, und noch ausreichend Zeit bleibt, bietet man an, noch einen Kunststoff zu bestimmen. Wenn der Kunststoff nicht richtig bestimmt wird, dann gibt es die Aufforderung, weitere Belege an den Stationen zu sammeln. Vielleicht gibt es von der Lehrperson auch den einen oder anderen Tipp, welche Analyse die Gruppe noch einmal machen sollte.

### Ergebnissicherung und Abschluss

Zur Ergebnissicherung sollten die Gruppen sich noch einmal gegenseitig vorstellen, was sie getan haben, welche Ergebnisse sie bei den Analysen erhalten haben und auf welchen Kunststoff sie daher geschlossen haben. Aber sie wirken schon sehr müde, es ist 17:00 Uhr vorbei. Sie bekommen jetzt noch Zeit, ihr Protokoll zu schreiben, in dem sie die Vorgehensweise und ihre Schlussfolgerungen beschreiben. Und erst nächstes Mal gibt es eine Präsentation.

Als Abschluss wird „Die Verwandlung eines Bechers“ durchgeführt, und damit der Weg zurück zum Recycling eingeschlagen. Peter Grill präsentiert eine Tiefzugapparatur (Abb. 4), mit der er einen Polystyrolbecher schmilzt und in einen ganz anders geformten kleinen Joghurtbecher verwandelt. Kunststoffe kann man wiederverwerten – sie sind zu schade dazu, auf einer Deponie hunderte Jahre herumzuliegen und die Umwelt zu verschmutzen. Recycling ist einfach – wenn die Kunststoffe sortenrein gesammelt werden. Dies ist die Botschaft, die die SchülerInnen nun auch mit ihrem Fachwissen über Kunststoffe und deren Eigenschaften belegen können.

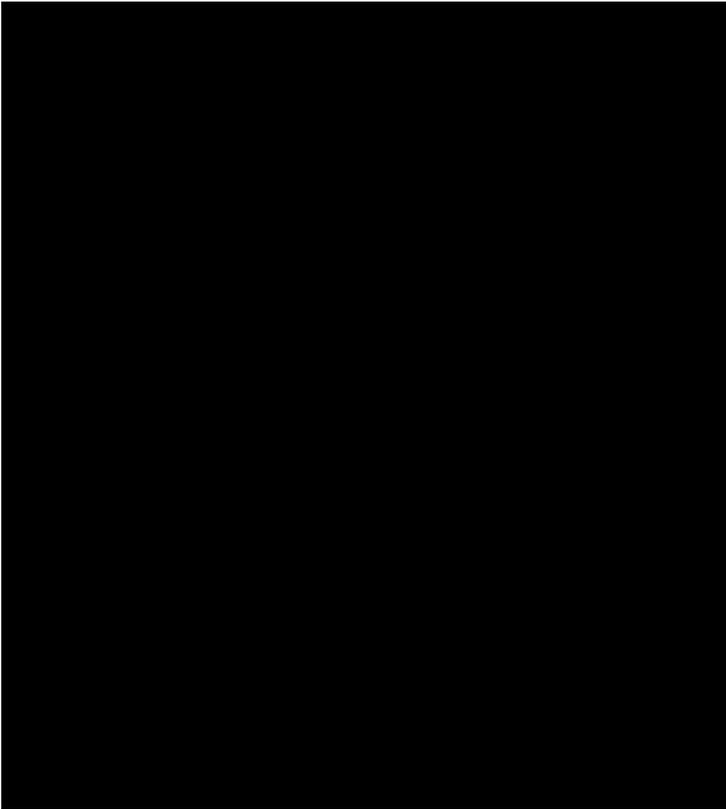


Abb. 4: Tiefzugapparatur: Rückführung auf Recycling (von Peter Grill)

## Ausblick

Nach dieser praktischen Einführung in die Thematik ‚Kunststoffe‘ kann man im folgenden Unterricht auf verschiedenen Ebenen anknüpfen. Der Kunststoffbegriff kann chemisch vertieft werden, die kennengelernten Kunststoffe hinsichtlich ihrer Herstellungsverfahren oder Art (Thermoplast, Duroplast, Elastomer) klassifiziert werden. Auch das Thema ‚Recycling‘ kann sowohl chemisch als auch gesellschaftspolitisch näher diskutiert werden. Welche Eigenschaften von Kunststoffen werden tatsächlich für Recycling genutzt? Ist dies regional unterschiedlich? Welche Vor-/Nachteile hat die Verwendung von Biokunststoffen? Die Experimentiereinheit soll also den praktischen und persönlichen Bezug der SchülerInnen zu einem breiten Themenspektrum schaffen.

## Literatur

- [1] Video „Recycling von PET-Flaschen“ ([https://www.youtube.com/watch?v=dkg\\_ylT5-js](https://www.youtube.com/watch?v=dkg_ylT5-js) [1.11.2015])
- [2] Pädagogische Hochschule Heidelberg & Institut für Weiterbildung (2007). Methodenreader. Praxisorientierte Anregungen und Hilfen für Lehrende in Schule, Hochschule und Weiterbildung. Heidelberg.
- [3] Koliander, B. (2007). Chemie HAK I, Teacher`s Guide. Wien: MANZ Verlag Schulbuch.
- [4] E. Hofer, S. Abels, A. Lembens. Forschendes Lernen und das 5E-Modell, Plus Lucis 1/2016, 2

Abschätzen der Dichte						
	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
in Wasser	schwimmt	schwimmt	sinkt	sinkt	sinkt	sinkt
in NaCl- Lösung	schwimmt	schwimmt	sinkt	schwimmt	sinkt	sinkt (gerade noch)
Chlornachweis						
	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
			positiv			
Brennprobe						
	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
Brennt?	ja, Kerzenwachsgeruch	ja	erlischt außerhalb der Flamme	ja	ja	erlischt außerhalb der Flamme
Rußt?			Schwarz/ brauner Ruß	Viel Ruß!		Ruß
Schmelzprobe						
	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
	schmilzt, weißer Nebel	schmilzt, weißer Nebel	zersetzt sich, schmilzt nicht, wird braun	schmilzt	schmilzt, wenig Nebel	schmilzt
Löslichkeit in Aceton						
	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
	nein	nein	leichte Trübung?	„schlatzig“		

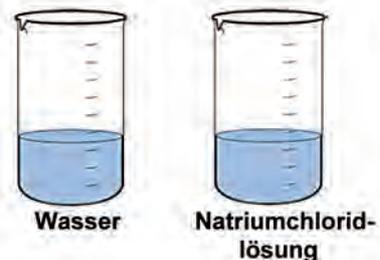
# ABSCHÄTZEN DER DICHTEN VON KUNSTSTOFFEN

**Aufgabenstellung:** Bestimme mit zwei einfachen Experimenten, ob die zu untersuchenden Kunststoffe schwimmen oder untergehen.

**Sicherheitshinweis:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille!**

**Materialien:**

- 2 Bechergläser
- Kunststoffstücke von **Polyethen (PE)**, **Polypropen (PP)**, **Polyvinylchlorid (PVC)**, **Polystyrol (PS)**, **Polyethenterephthalat (PET)**, **Polycarbonat (PC)**
- Wasser
- Natriumchloridlösung, gesättigt
- Pinzette



**Durchführung:**

- Fülle zunächst ein Becherglas zur Hälfte mit Wasser und das zweite mit einer Natriumchloridlösung.
- Achte auf die Kunststoffbezeichnungen und schneide dir von jeder zu untersuchenden Art ein kleines Stück ab, sodass es in das Becherglas passt.
- Schreibe die Kurzbezeichnung des Kunststoffs auf den abgeschnittenen Streifen.
- Gib nacheinander die verschiedenen Kunststoffe ins Wasser und beobachte, ob die Kunststoffe schwimmen oder untergehen. Fülle die untenstehende Tabelle aus.
- Wiederhole diese Schwimmprobe der verschiedenen Kunststoffe in der Natriumchloridlösung. Protokolliere auch diese Beobachtungen in der untenstehenden Tabelle.

**Beobachtungen:**

	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
im Wasser						
in der Natriumchlorid-lösung						

# CHLORNACHWEIS IN KUNSTSTOFFEN

**Aufgabenstellung:** Bestimme, ob in den zu untersuchenden Kunststoffen Chlor enthalten ist.

**Hinweis:** Bei Anwesenheit von Chlor färbt sich die Flamme grün.

**Sicherheitshinweis:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille!**

## Materialien:

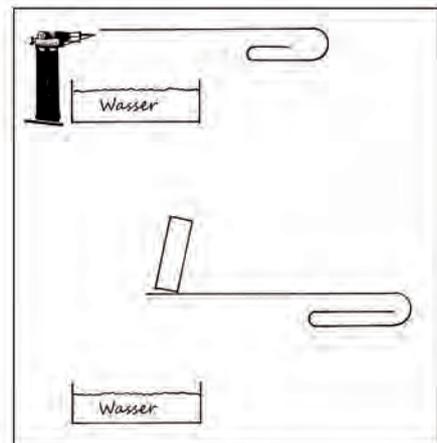
- Kupferdraht
- Kunststoffstücke von **Polyethen (PE)**, **Polyprom (PP)**, **Polyvinylchlorid (PVC)**, **Polystyrol (PS)**, **Polyethenterephthalat (PET)**, **Polycarbonat (PC)**
- Brenner
- Pinzette
- Schüssel mit Wasser
- Seitenschneider

## Durchführung:

- Achte auf die Kunststoffbezeichnungen und schneide dir von jeder zu untersuchenden Art einen kleinen Streifen ab.
- Schreibe die Kurzbezeichnung des Kunststoffs auf den abgeschnittenen Streifen.
- Fülle die Schüssel halbvoll mit Wasser.
- Führe die folgenden Arbeitsschritte mit allen Kunststoffsorten durch und notiere die

### Beobachtungen:

- Halte den Kupferdraht an dem gebogenen Ende und erhitze in der Flamme des Brenners das andere Ende.
- Schmelze mit dem heißen Draht etwas Kunststoff auf (ohne Flamme!).
- Reduziere evtl. die Luftzufuhr am Brenner etwa auf die Hälfte.
- Halte den Draht mit dem aufgeschmolzenen Kunststoff längere Zeit in die Flamme.
- Notiere deine Beobachtungen in der unten angeführten Tabelle.
- Schneide mit dem Seitenschneider den verunreinigten Kupferdraht ab.



### Beobachtungen:

	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
Beobachtungen						

# BRENNPROBE VON KUNSTSTOFFEN

**Aufgabenstellung:** Bestimme das Brennverhalten der zu untersuchenden Kunststoffe.

**Sicherheitshinweise:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille!**

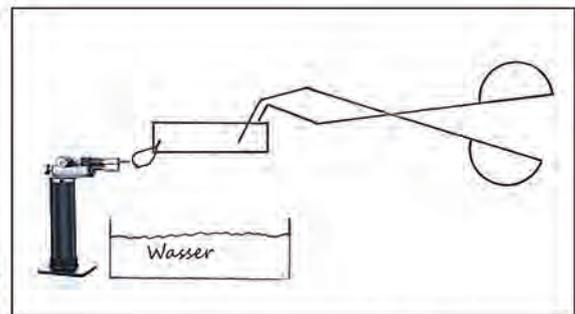
**Der Kunststoff darf nur kurz brennen! Lass ihn so bald wie möglich in die Schüssel fallen und tauche ihn unter die Wasseroberfläche! (BRANDGEFAHR!)**

**Materialien:**

- Schüssel mit Wasser
- Kunststoffstücke von **Polyethen (PE)**, **Polypropen (PP)**, **Polyvinylchlorid (PVC)**, **Polystyrol (PS)**, **Polyethenterephthalat (PET)**, **Polycarbonat (PC)**
- Brenner
- Tiegelzange

**Durchführung:**

- Achte auf die Kunststoffbezeichnungen und schneide dir von jeder zu untersuchenden Art einen kleinen Streifen ab.
- Schreibe die Kurzbezeichnung des Kunststoffes auf den abgeschnittenen Streifen.
- Fülle die Schüssel halbvoll mit Wasser und führe die folgenden Arbeitsschritte mit allen zu untersuchenden Kunststoffen durch:
  - Halte den Kunststoff an einem Ende mit der Tiegelzange.
  - Erhitze das andere Ende in der Brennerflamme.
  - Lösche den brennenden Kunststoff durch Eintauchen in das Wasser.
  - Protokolliere deine Beobachtungen in der unten angeführten Tabelle.



**Beobachtungen:**

		PE	PP	PVC	PS	PET	PC
Beobachtungen	brennt – welche Flamme?						
	rußt?						
	schmilzt?						
	tropft?						

# SCHMELZEN VON KUNSTSTOFFEN

**Aufgabenstellung:** Bestimme das Schmelzverhalten der zu untersuchenden Kunststoffe beim Erhitzen

**Sicherheitshinweise:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille!**

**Reagenzglas beim Erhitzen nicht in Richtung anderer Personen richten!**

## Materialien:

- 5 kleine Reagenzgläser
- 1 Reagenzglasklammer
- Kunststoffstücke von **Polyethen (PE)**, **Polypropen (PP)**, **Polyvinylchlorid (PVC)**, **Polystyrol (PS)**, **Polyethenterephthalat (PET)**, **Polycarbonat (PC)**
- Brenner
- Pinzette

## Durchführung:

- Achte auf die Kunststoffbezeichnungen und schneide dir von jeder zu untersuchenden Art einen kleinen Streifen ab, der in das Reagenzglas passt.
- Schreibe die Kurzbezeichnung des Kunststoffes auf den abgeschnittenen Streifen.
- Lege einen Kunststoffstreifen in je ein Reagenzglas.
- Halte das Reagenzglas mit der Reagenzglasklammer in die Flamme (siehe Abbildung).
- Erhitze das Röhrchen vorsichtig in der Brennerflamme.
- Protokolliere deine Beobachtungen in der untenstehenden Tabelle.



## Beobachtungen:

	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
Beobachtungen						

# LÖSLICHKEIT IN ACETON

**Aufgabenstellung:** Bestimme, ob die zu untersuchenden Kunststoffen in Aceton löslich sind.

**Sicherheitshinweis:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille! Nicht in der Nähe von offenen Flammen (Brenner) arbeiten!**

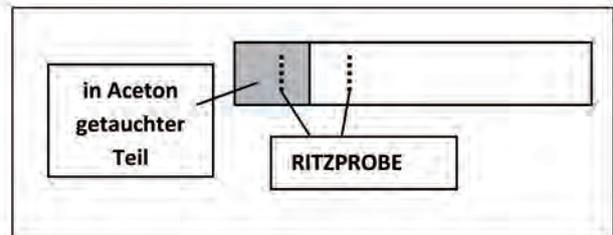
**Materialien:**

- Kunststoffstücke von **P**olyethylen (PE), **P**olypropylen (PP), **P**olyvinylchlorid (PVC), **P**olystyrol (PS), **P**olyethylenterephthalat (PET), **P**olycarbonat (PC)
- Becherglas mit Aceton
- Pinzette
- 1 Blatt Küchenrolle
- 1 Stahlnadel



**Durchführung:**

- Achte auf die Kunststoffbezeichnungen und schneide dir von jeder zu untersuchenden Art einen Streifen (ca. 7 cm Länge) ab.
- Schreibe die Kurzbezeichnung des Kunststoffes auf den abgeschnittenen Streifen.
- Tauche die Kunststoffe für mindestens 5 Minuten in das Becherglas mit Aceton
- Nimm die Kunststoffstreifen heraus und trockne sie mit der Küchenrolle ab.
- Untersuche die Kunststoffoberflächen der einzelnen Streifen.
- Führe am Kunststoffstreifen mit dem Stahlnagel zwei Ritzproben durch (siehe Abbildung!!!).
- Notiere deine Beobachtungen in der untenstehenden Tabelle.



**Anmerkung:** *Wenn ein Kunststoff in dem Lösungsmittel löslich ist, wird dessen Oberfläche meist matt.*

**Beobachtungen:**

	PE	PP	PVC	PS	PET	PC
Beobachtungen						

## EIGENE KUNSTSTOFFE – UNBEKANNTE PROBE

---

**Aufgabenstellung:** Identifiziere mit den gerade durchgenommenen Versuchen eine unbekannte Probe. Diese ist eine der sechs zuvor untersuchten Kunststoffe.

**Sicherheitshinweis:** **Arbeiten nur mit Schutzbrille!**

**Materialien:**

Unbekannte Probe von **Polyethen** (PE), **Polypropen** (PP), **Polyvinylchlorid** (PVC), **Polystyrol** (PS), **Polyethenterephthalat** (PET) oder **Polycarbonat** (PC)

**Durchführung:**

- Überlege dir welche Experimente du machen würdest, um die unbekannte Probe zu identifizieren.
- Führe nur die Versuche durch, die du für notwendig hältst, und begründe dein Vorgehen in Worten unter der Tabelle. (Achtung: Verwende für jeden Versuch einen neuen Kunststoffstreifen!!!)
- Protokolliere deine Beobachtungen in der untenstehenden Tabelle.

**Beobachtungen:**

	Unbekannte Probe
Dichte	
Chlornachweis	
Brennprobe	
Schmelzen	
Löslichkeit in Aceton	
Welcher Kunststoff könnte es sein?	

**Begründung für deine Vorgehensweise:**

---

---

Meine unbekannte Probe ist:

---

# Von Knete, Polymeren, Makromolekülen und nichtnewtonschen Systemen

Anja Lembens und Simone Abels

Was hat Knete mit Polymeren und Makromolekülen zu tun? Dieser Frage soll in diesem Artikel nachgegangen werden. Knete ist nicht gleich Knete, sie wird für verschiedene Zwecke verwendet, dient entweder dem Spiel, der Therapie, der Herstellung von mehr oder weniger überdauernden Figuren und Gegenständen, dem Abformen z. B. in der Zahnmedizin oder wird im Modellbau verwendet. Dementsprechend haben die verwendeten Knetmassen unterschiedliche Eigenschaften, aber auch eine wichtige Gemeinsamkeit: ihre Eigenschaften verdanken sie Makromolekülen und Polymeren. Die unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Knetmassen sind in der molekularen Struktur der verwendeten Makromoleküle und Polymere begründet. Die Bearbeitung dieser Zusammenhänge eignet sich hervorragend, um das Basiskonzept der Chemie *Struktur-Eigenschaftsbeziehung* im Chemieunterricht der Sekundarstufe zu bearbeiten. In diesem Artikel soll der Bogen von klassischen Spielkneten über den beliebten Slime bis zur ‚hüpfenden Knete‘ und ihren nichtnewtonschen Eigenschaften gespannt werden. Bestandteile und Eigenschaften der jeweiligen Knetmasse werden dabei in Beziehung zueinander gesetzt.

## Begriffsklärungen

Zu Beginn soll kurz geklärt, was man unter Makromolekülen und Polymeren versteht. Makromoleküle sind die Basis von Polymeren. Als untere Molmassengrenze für Makromoleküle werden ca. 10.000 g/mol angegeben. Herman Staudinger (1881–1965) führte den Begriff ein und bezeichnet damit kettenförmige „Moleküle, für die eine vielfache Wiederholung einer oder mehrerer Arten von meist kovalent verknüpften Atomen oder Atomgruppen charakteristisch ist“ [1]. Polymere sind nach IUPAC Substanzen, die sich aus einem Kollektiv chemisch einheitlich aufgebauter Makromoleküle zusammensetzen. Bei solchen Stoffen sind alle Makromoleküle gleich aufgebaut und unterscheiden sich nur durch die Länge ihrer Ketten [2].

Nun werfen wir noch einen Blick auf die Definition von **Knete**. Laut Wikipedia ist Knete (auch Knetmasse, Knetgummi oder Plastilin genannt) eine leicht verformbare, ton- oder wachsähnliche Masse, die zum Modellieren und Spielen verwendet wird [3]. Im Römpp Chemielexikon findet man folgende Definition von **Knetmasse**: *Knetgummi, Plastilin, Modelliermassen. Üblicherweise Bezeichnung für knetbare Massen, die sich aus Wachsen, Ölen, Kaolin, Zinkoxid, Kreide [...] und Pigmenten zusammensetzen. Auch andere Grundmaterialien wie z. B. Pappmaché*

[...], Holzmehl, Salzteig, weichmacherhaltige Modelliermassen aus PVC finden Verwendung [4, o. S.].

Hier wird schnell klar, dass wir es mit einem Sammelbegriff zu tun haben, unter dem sehr diverse Materialien zusammengefasst werden, die unterschiedlichen Zwecken dienen und daher auch unterschiedliche Eigenschaften aufweisen sollten. Im Folgenden möchten wir drei Gruppen von Knetmassen herausgreifen und ein wenig näher betrachten:

Knetmasse	Eigenschaften
Weizenmehlbasis	Ungiftig bei versehentlichem Verzehr Meist frei von synthetischen Zusatzstoffen Gummiartig elastisch Springt nicht beim Werfen auf den Boden Zerfließt kaum Beschränkt dehnbar Trocknet relativ schnell aus
Wachsbasis	Dauerplastisch Wird weicher beim Kneten Zerfließt bei Erwärmung Nicht dehnbar Relativ formstabil Springt nicht beim Werfen auf den Boden Trocknet kaum aus
Kunststoffbasis	Viskoelastisch Zerfließt beim Liegenlassen Zieht Fäden Wird fester beim Kneten Springt beim Werfen auf den Boden Trocknet mit der Zeit aus

Tab. 1: Ausgewählte Eigenschaften von Knetmassen auf der Basis von Weizenmehl, Wachsen und Kunststoffen

## Knetmasse auf der Basis von Weizenmehl

Zum Spielen verwendete Knetmasse unterliegt besonderen Anforderungen. Sie soll unschädlich sein und nicht auf die Haut abfärben; sie ist normalerweise nicht zum Verzehr geeignet. Wer möchte, kann sich sehr einfach Knetmasse selbst herstellen, die frei von synthetischen Zusätzen ist, indem Weizenmehl, Wasser, Pflanzenöl, Speisesalz und Lebensmittelfarbe zu einer Knetmasse verarbeitet werden (Rezept z. B. unter [5]). Diese Knetmasse ist bei versehentlichem Verzehr unbedenklich. Inzwischen gibt es auch käufliche essbare Knete, die ausschließlich aus Lebensmitteln, wie Weizenmehl, Stärke, Zucker, Eibestandteilen und

Lebensmittelfarben hergestellt wird und sowohl roh als auch gebacken verzehrt werden kann [6].

Bei diesen Knetmassen ist Weizenmehl der Hauptbestandteil. Wesentlich für die Eigenschaften des weizenmehlhaltigen Knetteiges ist Gluten, das auch als Klebereiweiß oder Kleberprotein bekannt ist. Gluten ist ein wasserunlösliches Stoffgemisch aus den Proteinen Gliadin und Glutenin, die in den Samen einiger Getreidearten als Speicherstoff vorkommen und dort die Stärkekörner umhüllen. Diese beiden Proteingruppen bilden mit rund 80% die größte Proteinfraction im Weizenmehl. Proteine sind klassische Polymere, da sie langkettige, aus Aminosäurebausteinen aufgebaute Moleküle sind. Gliadin z. B. besteht aus 266 Aminosäuren und hat eine Molekülmasse von <100.000 u. Als Antigen ist es für allergische Reaktionen bei manchen Menschen verantwortlich [7].

Bei Zugabe von Wasser zum Weizenmehl und unter kräftigem Kneten kommt es durch die Ausbildung von Disulfidbrücken, Wasserstoffbrücken und ionischen Wechselwirkungen zu einer irreversiblen Ausbildung von dreidimensionalen Strukturen zwischen den Proteinen (siehe Abb. 1) und es bildet sich eine gummiartige, elastische Masse. Bei diesem Vorgang, bei dem Wasser durch Quellung eingelagert wird, haben die beiden Proteingruppen unterschiedliche Aufgaben. Die Glutenine bilden ein durchgängiges Netzwerk strangartiger Kleber-Fibrillen, wodurch die elastischen Eigenschaften des Teiges begründet werden. Gliadine sind hingegen für die Quellung und Löslichkeit des Klebers verantwortlich, kommen zwischen den Fibrillen zuliegen und beeinflussen damit das plastische Verhalten des Knetteiges. Sie sind in gequollener (hydratisierter) Form weder elastisch noch kohäsiv und bestimmen deshalb als Weichmacher über die Viskosität (Fließbarkeit) und Dehnbarkeit der Masse (vgl. [8]).

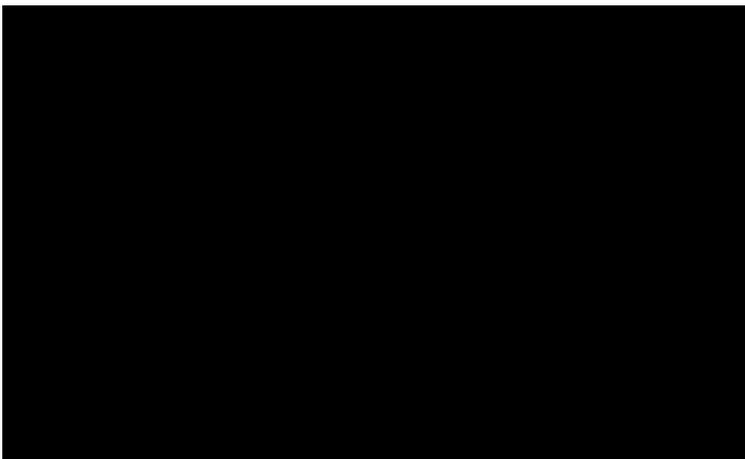


Abb. 1: Gliadin und Glutenin bilden mit Wasser unter Quellung den Kleber Gluten [9].

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Quellverhalten des Glutens hat die Zugabe von Kochsalz. Eine geringe Menge bewirkt eine Erhöhung der Dehnbarkeit des gequollenen Glutens. Übersteigt der Salzgehalt 1%, so steigt die Viskosität der Knetmasse, sie wird weicher und zerfließt leichter. Man kann also die Konsistenz und Eigenschaften der selbst hergestellten Knete durch die zugegebene Menge an Salz beeinflussen.

## Knetmasse auf der Basis von Wachsen

Viele dauerplastische (weich bleibende) Kneten aus dem Spiele- oder Bastelgeschäft bestehen zu einem großen Teil aus Wachsen. Sie sind mehr oder weniger leicht zu kneten und sind in verschiedenen Farben erhältlich. Bei Spielzeugknete müssen die Inhaltsstoffe nicht angegeben werden und so legen die wenigsten Hersteller eine aussagekräftige Inhaltsstoffliste bei (vgl. [10]).

Der Begriff Wachs ist eine Sammelbezeichnung für Ester langkettiger Fettsäuren (Wachssäuren; Kettenlänge C24 – C36) mit langkettigen Alkoholen (Fettalkohole; Kettenlänge C15 – C36). Damit sind sie genau genommen keine Polymere, aber es handelt sich um langkettige Moleküle zwischen denen Van der Waals-Kräfte wirken, die verantwortlich für die knetbaren Eigenschaften sind. Beim Kneten der Wachse gleiten die langen Molekülketten aneinander vorbei, wodurch sich ihr plastisches Verhalten erklärt. Wird keine Kraft oder Wärme auf sie ausgeübt, sind sie relativ formstabil. Warenkundlich schreibt man Wachsen folgende Eigenschaften zu: *„bei 20°C knetbar, fest bis brüchig hart, grob bis feinkristallin, durchscheinend bis opak, jedoch nicht glasartig; über 40°C ohne Zersetzung schmelzend, schon wenig oberhalb des Schmelzpunktes verhältnismäßig niedrigviskos und nicht fadenziehend, stark temperaturabhängige Konsistenz und Löslichkeit, unter leichtem Druck polierbar.“* [...] In der Regel gehen sie etwa zwischen 50°C und 90°C [...] in den schmelzflüssigen, niedrigviskosen Zustand über.“ [11, o. S.]

Wachse können wie folgt eingeteilt werden:

natürliche Wachse	z. B. Bienenwachs – tierischen Ursprungs Carnaubawachs – pflanzlichen Ursprungs Ceresin – mineralischen Ursprungs
chemisch modifizierte Wachse	z. B. Montanwachs
synthetische Wachse	z. B. Polyethylenwachse

Schon im alten Ägypten wurde Bienenwachs verwendet, womit es das älteste bekannte Wachs ist. Das in Brasilien von Palmblättern gewonnene Carnaubawachs fand um die Mitte des 17. Jahrhunderts seinen Weg nach Europa. Später begann man fossile Wachse zu nutzen und chemisch zu verändern, z. B. Montanwachs. Mit der Entwicklung der Petrochemie wurden später synthetische Wachse hergestellt.

Für die Herstellung von Modelliermassen wird u.a. **Ceresin** verwendet. Ceresin ist ein Gemisch aus einfachen, verzweigt-kettigen und ringförmigen gesättigten Kohlenwasserstoffketten, das durch Raffination von Erdwachs fossilen Ursprungs gewonnen wird. Wie alle Wachse ist es in Wasser unlöslich, aber in organischen, unpolaren Medien löslich.

Eine Besonderheit ist Knetmasse auf **Bienenwachsbasis**, die mit zunehmender Erwärmung beim Kneten leichter formbar wird und einen angenehmen Geruch verströmt. Bienenwachs ist laut Römpp *„das älteste vom Menschen genutzte*

Naturwachs und auch heute noch das bedeutendste Wachs tierischen Ursprungs. Beschrieben wird Bienenwachs als knetbare, feste Masse mit angenehm honigartigem Geruch, die aus einem Gemisch von komplexen Wachsester (ca. 70%), normalen Fettsäuren und Hydroxyfettsäuren (13–14%) sowie Kohlenwasserstoffverbindungen (10–14%) besteht.“ [11, o. S.]. Ein Hauptbestandteil des Bienenwachses ist der Wachsester Triacetylpalmitat. Wachsester sind Verbindungen aus langkettigen Fettsäuren und Fettalkoholen, daher enthalten sie eine Ester- und zwei Alkyl-Gruppen. Das Triacetylpalmitat (Abb. 3) ist ein Ester aus Palmitinsäure und Myricylalkohol mit der Summenformel  $C_{46}H_{92}O_2$ .



## Knetmasse auf der Basis von Kunststoffen

Eine sehr beliebte Knetmasse mit ungewöhnlichen viskoelastischen Eigenschaften ist **Slime**. Im Jahr 1976 wurde Slime, eine giftgrüne, zähflüssige schleimartige Masse, erstmals auf den Spielzeugmarkt gebracht. Slime wird beim Kneten fester und lässt sich zu einer springenden Kugel formen, die beim Liegenlassen wieder zerfließt und sich zu langen Fäden ziehen lässt. Verdunstet das enthaltene Wasser, so wird Slime irreversibel hart und spröde. In einer Szene des Films Ghostbusters II (1989) sollen etwa 40.000 Gallonen Slime zum Einsatz gekommen sein (eine Gallone entspricht ca. 3,8 L). (vgl. [13])

Slime wird aus einer wässrigen Polyvinylalkohollösung, Borax (Dinatriumtetraborat) und Farbstoffen hergestellt und kann sehr leicht auch selbst hergestellt werden (Anleitungen siehe unten). Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass Borax und Borsäure als gesundheitsgefährdende Stoffe eingestuft sind und damit nur in sehr niedriger Konzentration in der Schule verwendet werden dürfen. Zur Risikobewertung von Borsäure in Knetmassen siehe [14].

Der Hauptbestandteil von Slime ist Polyvinylalkohol, der farb- und geruchlos sowie nicht toxisch ist. Polyvinylalkohole sind Polymere des Vinylalkohols (siehe Abb. 4). Die Ausrichtung der Seitengruppen ist ataktisch, also unregelmäßig. Über die Hydroxylgruppen bilden sich kristalline Bereiche aus, wodurch sich die hohe Zugfestigkeit und Flexibilität erklärt. Polyvinylalkohol ist in der Lage, Wasser zu absorbieren, was seine Eigenschaften beeinflusst. Die Wasserlöslichkeit von Polyvinylalkoholen ist abhängig von ihrem Polymerisations- und Hydrolysegrad [15].



Abb. 4: Ausschnitte aus den Molekülen von Polyvinylalkohol (a), ca. 2% der Ketten sind vom Typ (b) [16]

Löst man Borax (Dinatriumtetraborat,  $Na_2[B_4O_5(OH)_4]$ ) in Wasser, so bilden sich Borsäure ( $B(OH)_3$ ) und Natronlauge. Borsäure verhält sich in Wasser trotz der drei Wasserstoff-

atome im Molekül wie eine einprotonige Säure und reagiert zu Tetrahydroxyborat-Anionen ( $B(OH)_4^-$ ). Damit verhält sie sich nicht wie eine Brønsted-Säure (Protonendonator), sondern wie eine Lewis-Säure als Elektronenpaarakzeptor:

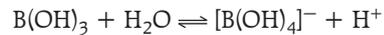


Abb. 5: Borsäure bildet in Wasser Tetrahydroxyborat-Anionen [17]

Wie lassen sich jetzt die Eigenschaften von Slime erklären, die sich so deutlich von denen der Knetmassen auf der Basis von Wachsen oder Weizenmehl unterscheiden? (siehe Tabelle 1). In einer Kondensationsreaktion verknüpft je ein Tetrahydroxyborat-Anion je zwei oder mehr Polyvinylalkoholmolekülketten mittels Sauerstoffbrücken miteinander, wobei jeweils ein Wassermolekül abgespalten wird. Durch fortgesetzte Vernetzung der Polyvinylalkoholketten bildet sich ein Gel und das Produkt wird immer zähflüssiger. Die Vernetzungsreaktion geht so lange weiter, bis die Borsäure in dissoziierter Form aufgebraucht ist.

**Hüpfende Knete** ist eine weitere Knetmasse mit ungewöhnlichen Eigenschaften, die man auch unter den Namen *Intelligente Knete*, *Bouncing Putty* etc. im Handel findet. Hüpfende Knete verhält sich je nach Krafteinwirkung entweder wie eine zähe Flüssigkeit, oder zeigt Eigenschaften eines Festkörpers – sie ist ein viskoelastischer Kunststoff und damit ein klassisches nichtnewtonsches System. Als nichtnewtonsche Systeme bezeichnet man Stoffsysteme, deren Verformungsverhalten sich nicht durch das Newtonsche Gesetz beschreiben lässt.

Chemisch gesehen ist hüpfende Knete ein Borsilikonkitt, der aus niedermolekularen kettenförmigen Polydimethylsiloxanmolekülen (PDMS) (Abb. 6) und Borsäure hergestellt wird. Die Borsäure kondensiert mit den endständigen Hydroxygruppen des Silikons und fungiert somit als Vernetzer und gleichzeitig als Kondensationskatalysator (Abb. 7).



Abb. 7: Vernetzung von Polysiloxanen mittels Borsäure [20]

In solchen borhaltigen Polysiloxanen ist jedes fünfte bis 100. Siliziumatom durch ein Boratom ersetzt. Es entstehen Silizium-Sauerstoff-Bor-Verknüpfungen (-Si-O-B-) zwischen den Siloxanketten. Die Boratome in den Molekülen tragen

eine positive elektrische Teilladung (Elektronenpaarlücke, Lewis-Säure), die Sauerstoffatome eine negative elektrische Teilladung (freie Elektronenpaare, Lewis-Base). Zwischen beiden können sich durch elektrostatische Anziehung temporäre Vernetzungen bilden. Diese zwischenmolekularen Vernetzungen sind schwach, sie können leicht gelöst und an anderer Stelle neu gebildet werden. [18]

Wirken **schwache, langsame Kräfte**, wie beim Kneten, Ziehen oder Liegenlassen (Gravitation) auf die hüpfende Knete ein, dann können die Ketten aneinander vorbeigleiten. Die Vernetzungsstellen werden gelöst und es bilden sich an anderen Stellen neue. Der Stoff verhält sich wie eine plastische, viskose Masse und zerfließt beim Liegenlassen. Wirken **starke, schnelle Kräfte** (Werfen, Reißen, Hammerschlag) auf die hüpfende Knete ein, nähern sich die Molekülketten einander sehr stark an und es bilden sich erzwungene Vernetzungen. Bei stoßartigen Kräften, wie beim Werfen, verhält sich die hüpfende Knete wie ein hochelastischer Festkörper. Je größer die Krafteinwirkung ist, desto mehr Vernetzungsstellen bilden sich. Bei einem Hammerschlag können sie sich nicht schnell genug voneinander lösen und der einwirkende Impuls verursacht ein Zersplittern oder Reißen. Die hüpfende Knete verhält sich dann wie ein sprödelastischer Festkörper (entnommen aus [18, S. 14]).

## Zur Einbettung in den Lehrplan

Prinzipiell kann man das Thema „Knetmassen“ in allen Schulstufen bearbeiten, um unterschiedliche naturwissenschaftliche Aspekte zu thematisieren, Methoden einzuführen und zu üben. Auf der rein phänomenologischen Ebene können schon sehr junge Kinder die Eigenschaften untersuchen und beschreiben. Das systematische Untersuchen, Vergleichen und Beschreiben schult wichtige Kompetenzen, die für das naturwissenschaftliche Arbeiten notwendig sind.

Je nach Lehrziel können Inhalte auf allen Ebenen des Kompetenzmodells [21] angesteuert werden: C1 Aufbauprinzip der Materie, C2 Einteilung und Eigenschaften der Stoffe, C3 Grundmuster chemischer Reaktionen, C4 Rohstoffquellen und ihre verantwortungsbewusste Nutzung sowie C5 Biochemie und Gesundheitserziehung. So können z. B. bei Knetmassen auf der Basis von Weizenmehl der Aufbau von Proteinen besprochen werden (C1) und welche Bedeutung die Struktur der Proteine für ihre Quellfähigkeit und diese wiederum für die Eigenschaften der daraus hergestellten Knetmasse hat (C2), womit anschauliche und alltagsnahe Beispiele für die Erarbeitung von Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zur Verfügung stehen.

Weitere lehrplanrelevante Themen, die bearbeitet werden können, sind: langkettige Kohlenwasserstoffverbindungen, Polymere, Polymerisation, Polykondensation, Veresterung, Fettsäuren, Fettalkohole, Lewis- und/oder Brønsted-Säuren, Van der Waals-Kräfte, Struktur-Eigenschaftsbeziehung, Nicht-newtonsche Systeme und vieles mehr. Wichtig ist, dass man als Lehrkraft die angestrebten Ziele auf der Inhalts- und der Handlungsdimensionsebene vorher

sehr klar definiert und dafür jeweils geeignete Lernumgebungen entwickelt. Auf diese Art und Weise können an dem vorgestellten Themenkomplex neben fachlichen Inhalten und Methoden auch Kompetenzen, die für die Entwicklung einer naturwissenschaftlichen Grundbildung notwendig sind, eingeführt und geübt werden. Formate des Forschenden Lernens (siehe hierzu Hofer, Abels & Lembens in diesem Heft), die sowohl Experimente als auch Fachtexte aus Büchern, Zeitschriften oder dem Internet als Informationsquelle einbeziehen, eignen sich hierbei besonders gut.

## Quellen

- [1] <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-13-00294> [30.12.2015]
- [2] vgl. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03381> [30.12.2015]
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Knetmasse> [13.12.2016]
- [4] <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-11-01313> [29.12.2015]
- [5] <http://www.smarticular.net/essbare-spielknete-fuer-kinder-selbermachen-ohne-kochen/> [29.12.2015]  
Weitere Links: dieses Heft S. 53
- [6] <http://essknete.de/> [29.12.2015]
- [7] <https://de.wikipedia.org/wiki/Gliadin> [29.12.2015]
- [8] Meyer zu Venne, W. (2012). Die Welt der Waffel: Von den Ursprüngen zur industriellen Fertigung. Books on Demand; Auflage: 2.
- [9] <http://apchemproject2014.blogspot.co.at/> [29.12.2015]
- [10] <http://www.oekotest.de/cgi/index.gi?artnr=105601&bernr=07> [31.12.2015]
- [11] <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-02-01262> [30.12.2015]
- [12] <http://www.internetchemie.info/chemiewiki/index.php?title=Wachsester> [29.12.2015]
- [13] [http://www.chemie.de/lexikon/Slime\\_%28Spielzeug%29.html](http://www.chemie.de/lexikon/Slime_%28Spielzeug%29.html), [https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt\\_slime.htm](https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt_slime.htm) [31.12.2015]
- [14] [http://www.bfr.bund.de/cm/343/borsaure\\_in\\_huepfknete.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/343/borsaure_in_huepfknete.pdf)
- [15] <http://www.chemie.de/lexikon/Polyvinylalkohol.html> [29.12.2015]
- [16] <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-16-03644> [31.12.2015]
- [17] <http://www.chemie.de/lexikon/Bors%C3%A4ure.html> [31.12.2015]
- [18] Lembens, A. & Abels, S. (2015). Fest oder flüssig? Nicht-newtonsche Stoffsysteme. In: Lembens, A. & Abels, S. (Hrsg.). Sondernummer TEMI – Teaching Enquiry with Mysteries incorporated. Chemie & Schule, 30(1b).
- [19] <https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem415/CEM415,%202013/Experiment%201.pdf> [31.12.2015]
- [20] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/stufen/polykondensation/silicone/silicon.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/stufen/polykondensation/silicone/borssyn.vscml.html> [31.12.2015]
- [21] [https://www.bifie.at/system/files/dl/bist\\_nawi\\_kompetenzmodell-8\\_2011-10-21.pdf](https://www.bifie.at/system/files/dl/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf) [25.01.2016]

# Die geheimnisvolle Flasche

Elisabeth Hofer, Sandra Puddu, Katrin Reiter, Simone Abels, Anja Lembens

## Klassenstufe

ab der 7. Klasse (11. Schulstufe)

## Themen

Dichtebegriff, Mischbarkeit verschiedener Lösungen, Ausbildung von Phasen/Grenzschichten zwischen nicht mischbaren Flüssigkeiten, Bildung von Emulsionen, Kunststoffe und Möglichkeiten zu deren Recycling.

## Fachliche Ziele

Die SchülerInnen können die Mischbarkeit von Flüssigkeiten sowie die Ausbildung von Phasen bei nichtmischbaren Flüssigkeiten mit entsprechenden Fachbegriffen (Polarität, Dichte, Grenzfläche, Emulsion) beschreiben und erklären. Sie kennen verschiedene Kunststoffe und sind mit der Kennzeichnung durch Recyclingcodes vertraut. Außerdem können die SchülerInnen verschiedene Aspekte des Themas Kunststoffrecycling (abhängig von der Extend-Phase) unter Verwendung von Fachbegriffen erläutern.

## Handlungskompetenz ‚Wissen organisieren‘

Die SchülerInnen können Recherchen durchführen und die daraus gewonnenen Informationen adressatengerecht darstellen und für Diskussionen verwenden. Sie wissen über die Bedeutung des Themas Kunststoffrecycling für unsere Gesellschaft Bescheid.

## Handlungskompetenz ‚Erkenntnisse gewinnen‘

Die SchülerInnen können zum präsentierten Phänomen Fragen stellen und Hypothesen bilden. Sie können zu den Fragestellungen und Vermutungen passende Untersuchungen planen, durchführen und auswerten.

## Handlungskompetenz ‚Konsequenzen ziehen‘

Die SchülerInnen sind in der Lage, die Ergebnisse aus ihren Untersuchungen kritisch zu hinterfragen und anschließend entsprechend zu interpretieren. Sie kennen die Bedeutung der dargestellten Inhalte für gesellschaftlich relevante Fragen im Zusammenhang mit der Entsorgung und Verwertung von Müll.

## Alltagsbezug

Phänomen des Schwimmens und Sinkens; nicht mischbare Flüssigkeiten (z. B. Wasser und Öl); auf der Wasseroberfläche schwimmende „Ölteppiche“ bei Unfällen in Verbindung mit Erdöl; Umweltproblematik der Kunststoffe; Kunststoffrecycling.

## Das Phänomen

Betrachtet man die geheimnisvolle Flasche (Abb. 1), so sieht man kleine Kunststoffstücke in zwei verschiedenen Farben, die in einer mit farbloser Flüssigkeit gefüllten Flasche etwa auf halber Höhe schweben.

Wird die Flasche geschüttelt, kann anschließend ein überraschender Vorgang beobachtet werden: die vermeintlich schwebenden Kunststoffstücke bewegen sich in entgegengesetzte Richtungen. Die dunklen Kunststoffstücke sinken zu Boden, während die hellen zur Oberfläche aufsteigen (Abb. 2). Lässt man die Flasche kurze Zeit ruhig stehen, so kehren alle Kunststoffstücke wieder in ihre Ausgangsposition zurück – sie scheinen wieder auf halber Höhe in der Flüssigkeit zu schweben, wie ein fliegender Teppich. Ein Video zu diesem Phänomen ist verfügbar. [2]



Abb. 1: Die geheimnisvolle Flasche



Abb. 2: Die dunklen Kunststoffstücke sinken zu Boden, die hellen steigen auf.

Die folgenden Vorschläge und Gedanken sollen als Ideen für eine Unterrichtssequenz im Sinne des Forschenden Lernens auf Level 2 (s. Einführungsartikel in diesem Heft) zum Thema Dichte, Mischbarkeit und Phasenbildung dienen. Das Thema Kunststoffrecycling ist eine Möglichkeit für die Gestaltung der Erweiterungsphase, sie könnte aber von ebenso vielen anderen Themen, wie z. B. Kunststoffarten, Kunststoffproduktion, Löslichkeit verschiedener Stoffe etc. geprägt sein.

## Benötigtes Material und Vorbereitung für die Engage-Phase<sup>1</sup>

**1 Liter Flasche** (farblos und durchsichtig, verschließbar)

**Flüssigkeiten:** 450 mL 20%ige Kochsalzlösung, 450 mL Propan-2-ol

**Kunststoffstücke** in zwei Farben, ca. 5 mm x 5 mm:

- a) nicht expandiertes Polystyrol (PS) und
- b) High Density Polyethen (HDPE), diese können leicht aus entsprechenden Kunststoffverpackungen zurechtgeschnitten werden, z. B. aus Joghurt- oder Kunststofftrinkbechern (PS) und Fruchtsaft- oder Reinigungsmittelflaschen (HDPE).

Bevor die geheimnisvolle Flasche einsatzbereit ist, müssen die verschiedenen Kunststoffstücke in die Flasche gegeben werden, die anschließend mit den oben beschriebenen Flüssigkeiten befüllt wird. Nach dem Verschließen wird die Flasche kräftig geschüttelt, sodass alle Kunststoffstücke gut mit dem Flüssigkeitsgemisch benetzt sind. Nun steht dem Bestaunen des Phänomens nichts mehr im Wege.

## Engage-Phase

Die vorbereitete Flasche soll nun dazu dienen, die SchülerInnen in Staunen zu versetzen und dadurch ihr Interesse für die geplanten Inhalte zu wecken. Zu diesem Zweck wird die geheimnisvolle Flasche im Unterricht so präsentiert, dass der mysteriöse Effekt gut beobachtet werden kann. Dabei sollten möglichst viele SchülerInnen mit dem Phänomen direkt in Kontakt kommen, um genau beobachten zu können. Hier können auch mehrere Flaschen oder ein Video zum Einsatz kommen. Eine Idee für eine Präsentation des Phänomens sehen Sie unter <https://youtube/RDFcFACQMHk>.

Die Lehrperson ist nun gefordert, die Aufmerksamkeit der SchülerInnen auf die Beobachtung des Phänomens zu lenken. Um die Gedanken der SchülerInnen in dieser Phase des Erstaunens zu fokussieren, könnten folgende Fragen hilfreich sein: Was kannst du beobachten?, Was passiert hier?, Welche Fragen ergeben sich aus deinen Beobachtungen?, Hast du bereits Vermutungen, wie dieser Effekt zustande kommt?, Wo hast du ein ähnliches Phänomen schon einmal beobachtet?

Als Alternative könnten die SchülerInnen auch vor dem Schütteln der Flasche dazu aufgerufen werden, eine Vorhersage zu treffen, was wohl nach dem Schütteln in der Flasche passieren wird.

Die Beobachtungen und Vermutungen der SchülerInnen werden in der Klasse besprochen und diskutiert. Währenddessen oder auch im Anschluss daran werden die Fragen, die aufgetreten sind oder von der Lehrperson angeregt wurden, gesammelt. Diese Fragen bilden den Grundstein für die Arbeit in der nächsten Phase (Explore-Phase) und sollen deshalb gemeinsam mit den SchülerInnen gut überlegt und genau ausformuliert werden, denn entlang dieser Fragen soll das Phänomen der geheimnisvollen Flasche erforscht werden.

<sup>1</sup> Zur Erklärung des hier verwendeten Phasenmodells s. Einführungsartikel in diesem Heft (5E-Modell)

## Evaluate der Engage-Phase

Was kann die Lehrperson in dieser Phase über das Vorwissen und die Vorstellungen der Lernenden erfahren? Während dieser Einstiegsphase kann die Lehrperson Informationen darüber gewinnen, wie kreativ die SchülerInnen in ihren Ideen, Fragestellungen und Vermutungen sind. Zusätzlich kann die Lehrperson in der Diskussionsphase darauf achten, welches Vorwissen die SchülerInnen zu diesem Zeitpunkt bereits einbringen und ob sie dieses für ihre Vermutungen und Fragen heranziehen. Eine andere Möglichkeit wäre, den Fokus auf die Beobachtungskompetenz der SchülerInnen zu legen: Wie exakt beobachten sie die Vorgänge? Unterscheiden sie zwischen Beobachtungen und Interpretationen? Welche Wörter verwenden sie in ihren Ausführungen? Können sie Vorgänge alltagssprachlich umschreiben? Verwenden sie Fachbegriffe?

## Explore-Phase

Das Ziel der Explore-Phase besteht darin, die in der Engage-Phase aufgetretenen Fragen mithilfe geeigneter Untersuchungen zu beantworten. Dazu stehen den SchülerInnen verschiedene Materialien und Geräte zur Verfügung, die Informationen und Aufschluss zu den Themen Dichte und Mischbarkeit von Flüssigkeiten bzw. Kunststoffen geben können. Im Sinne von Inquiry Level 2 sollen die Untersuchungen von den SchülerInnen selbst geplant und durchgeführt werden. Die SchülerInnen sollen ihre Untersuchungspläne der Lehrperson jedoch vor Arbeitsbeginn präsentieren (Folgende Untersuchungen haben wir geplant / Mit unseren Untersuchungen wollen wir diese Fragen beantworten / Wir wollen unsere Untersuchungen nach diesem Schema durchführen usw.).

## Material und Vorbereitung für die Explore-Phase

Das Materialangebot für die Untersuchungen könnte z. B. aus Eprovetten mit Stopfen, Eprovettenständern, Pinzetten, farbigen Stücken verschiedener Kunststoffe und Glasstäben bestehen. Statt der Eprovetten können auch kleine Bechergläser verwendet werden. Zusätzlich stehen den SchülerInnen acht verschiedene Flüssigkeiten mit verschiedenen Dichten bzw. Eigenschaften zur Verfügung. Von jeder Flüssigkeit sollten ca. 250 mL in beschrifteten Gefäßen, z. B. Tropfflaschen bereitgestellt werden. Tabelle 1 enthält einen Vorschlag für die Beschriftung der Gefäße.

Außerdem werden auch noch verschiedene Kunststoffe bereitgestellt, entweder bereits in kleine Stücke geschnitten oder die SchülerInnen zerkleinern die Kunststoffe aus verschiedenen Verpackungen selbst, z. B. Obstschalen, Weichspülerflaschen etc.

Nr.	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Inhalt
1	0,79	Ethanol
2	0,91	Mischung aus 596 cm <sup>3</sup> Ethanol und 439 cm <sup>3</sup> deionisiertem Wasser
3	0,94	Mischung aus 448 cm <sup>3</sup> Ethanol und 586 cm <sup>3</sup> deionisiertem Wasser
4	1,00	deionisiertes Wasser
5	1,15	Lösung aus 184 g K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und 965 cm <sup>3</sup> deionisiertem Wasser
6	1,38	Lösung aus 513 g K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> und 866 cm <sup>3</sup> deionisiertem Wasser
7	0,79	Propan-2-ol
8	1,15	Lösung aus 200 g NaCl und 800 cm <sup>3</sup> deionisiertem Wasser, das entspricht einer 20%igen Kochsalzlösung

Tab. 1: Verwendete Flüssigkeiten und ihre Dichten

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Recyclingcodes der verwendeten Kunststoffe:

Polyethylen-terephthalat 	Polyethen mit hoher Dichte 	Polyvinylchlorid 
Polyethen mit geringer Dichte 	Polypropen 	Polystyren, expandiertes Polystyren 

Tab. 2: Verwendete Kunststoffe und ihre Recyclingcodes

Alle Recyclingcodes und die entsprechenden Symbole sind unter [http://www.tabelle.info/recycling\\_code.html](http://www.tabelle.info/recycling_code.html) zu finden.

**Tipp:** Einige kleine Siebe können beim Auffangen der Kunststoffstücke im Zuge der Entsorgung der bei der Untersuchung des Phänomens vermischten Flüssigkeiten hilfreich sein.

## Evaluat der Explore-Phase

Neben praktischen Fertigkeiten können die Lehrenden in der Explore-Phase auch Kompetenzen der SchülerInnen in den Bereichen Planung, Datensammlung usw. beobachten. Folgende Fragen könnten als Anregung dienen: Werden die Experimente von den SchülerInnen systematisch geplant und durchgeführt? Wie gut können die SchülerInnen mit den verwendeten Geräten und Materialien umgehen? Verwenden die SchülerInnen Fachbegriffe, wenn sie miteinander über das Phänomen und ihre Vorgehensweise bei der Untersuchung sprechen? Gestalten die SchülerInnen ein übersichtliches und gut nutzbares Protokoll? Wie systematisch gehen die Lernenden mit Variablen um? [1]

## Explain-Phase

Während der Explore-Phase haben die SchülerInnen durch ihre Untersuchungen Informationen und Erkenntnisse zu den Bestandteilen der geheimnisvollen Flasche gewonnen. Diese sollen sie nun verwenden, um das Phänomen der schwebenden Kunststoffstücke möglichst gut und ausführlich zu erklären. Um die entsprechenden Fachbegriffe bzw. Detailinformationen in die Erklärungen einfließen zu lassen, könnte die Lehrperson passende Fachtexte oder eine Linkliste zur Verfügung stellen, eine Präsentation vorbereiten oder einen kurzen Vortrag halten. Wie detailliert die fachlichen Ausführungen an dieser Stelle sein sollen, hängt einerseits von der Schulstufe und andererseits von den fachlichen Zielen ab. Die Lehrperson entscheidet, welche und wie viele Fachbegriffe (Phase, Grenzfläche, Emulsion, polar/unpolar usw.), Zusammenhänge und Vernetzungen sie von den SchülerInnen für dieses Experiment erwartet. Fachliche Vertiefungen und zusätzliche Inhalte können auch in der anschließenden Extend-Phase noch Platz finden.

## Fachliche Klärung

In der geheimnisvollen Flasche befinden sich zwei farblose Flüssigkeiten mit verschiedenen Dichten, die nur begrenzt mischbar sind. Propan-2-ol (Dichte ca. 0,79 g/cm<sup>3</sup>) bildet die obere Phase, während sich die 20%ige NaCl-Lösung (Dichte ca. 1,15 g/cm<sup>3</sup>) unterhalb der Propan-2-ol-Phase befindet. Die Dichten der Kunststoffstücke liegen zwischen den Dichten der beiden Flüssigkeiten (High Density Polyethen (HDPE): 0,94-0,97 g/cm<sup>3</sup> und Polystyrol (PS): 1,04-1,09 g/cm<sup>3</sup> haben beide höhere Dichten als das Propan-2-ol und niedrigere Dichten als die NaCl-Lösung) und befinden sich deshalb auf halber Höhe der Flasche im Bereich der Grenzschicht. Wird die Flasche geschüttelt, so vermengen sich die beiden Flüssigkeiten kurzfristig. Dadurch entsteht eine Emulsion, deren Dichte zwischen den Dichten der beiden Kunststoffe liegt – die Kunststoffstücke ordnen sich entsprechend ihrer Dichte an der Oberfläche (HDPE) bzw. am Boden (PS) der Flasche an. Trennen sich die beiden Flüssigkeiten langsam wieder, so bildet sich eine Phasengrenze zwischen Propan-2-ol und der NaCl-Lösung und die Kunststoffstücke kehren nach und nach in ihre Ausgangsposition zurück. Liegen die beiden Flüssigkeiten schließlich wieder in zwei Phasen übereinander vor, scheint die Schicht aus Kunststoffstücken wie zu Beginn der Beobachtung auf halber Höhe der Flasche zu schweben.

## Evaluat der Explain-Phase

In dieser Phase der Erklärungen und Begründungen kann die Lehrperson Rückmeldungen über das fachliche Wissen der SchülerInnen und dessen Struktur erhalten. Mögliche Fragen hierfür wären z. B.: Verwenden die SchülerInnen die Ergebnisse aus den Untersuchungen sinnvoll für ihre Erklärungen? Werden die gelernten Zusammenhänge zum Begründen und Verteidigen ihrer Schlussfolgerungen angewendet? Setzen die SchülerInnen Fachbegriffe wie Dichte, Mischbarkeit, Phasen, Grenzphase usw. (angemessen) ein?

## Extend-Phase

Für die Erweiterungsphase sind je nach Schwerpunktsetzung im Unterricht und Interesse der SchülerInnen verschiedene Erweiterungen und Vertiefungen denkbar. Nachdem die Aufgabe auf Level 2 zu bearbeiten gewesen ist (begleitetes Forschendes Lernen, s. Einführungsartikel in diesem Heft), könnten die SchülerInnen nun den eventuell entstandenen eigenen Fragen (Level 3, offenes Forschendes Lernen) nachgehen, die während der vorangegangenen Untersuchungen aufgetreten sind. Es könnten auch inhaltliche Vertiefungen (z. B. zu Polarität, Löslichkeit, Kunststoffarten, Kunststoffherzeugung usw.) in dieser Unterrichtsphase stattfinden.

Als mögliches Beispiel einer Erweiterung sollen an dieser Stelle Vorschläge zum Thema „Recycling von Kunststoffen“ gemacht werden:

### Vorschlag 1

Die SchülerInnen entwickeln mit Hilfe ihres erworbenen Wissens ein Verfahren, das die Trennung verschiedener Kunststoffarten im Zuge des Kunststoffrecyclings ermöglichen soll. Als Herausforderung können zusätzliche Anforderungen wie beispielsweise die Trennung von mehr als zwei verschiedenen Arten, ein möglichst umweltfreundliches oder ein möglichst ökonomisches Verfahren dienen.

### Vorschlag 2

Die SchülerInnen halten Kurzreferate, in denen sie verschiedene Trennmethode im Bereich des Kunststoffrecyclings vorstellen und evtl. auch praktisch demonstrieren. Dabei könnten sie auf die entsprechenden Verfahren, deren Vor- und Nachteile sowie Einsatzbereiche eingehen. Häufig angewendete Sortierverfahren verwenden u. a. die Eigenschaften Dichte, Löslichkeit, elektrische Leitfähigkeit, Benetzbarkeit oder Partikelgröße.

### Vorschlag 3

Impulsfragen könnten durch Diskussionen oder Recherchen behandelt werden. Ein Beispiel wäre etwa „Welche Gründe könnte es haben, dass in einigen Regionen Österreichs ausschließlich PET-Flaschen und keine anderen Kunststoffe gesammelt werden, während in anderen Regionen die gesamte Leichtfraktion (Gelber Sack) gemeinsam gesammelt wird?“

### Vorschlag 4

Um sich Informationen zum Thema Kunststoffrecycling zu beschaffen, könnte auch eine Exkursion zu einer Recycling-Anlage stattfinden oder entsprechende Filme könnten angeschaut werden. Die SchülerInnen könnten auch recherchieren, welche Produkte aus recycelten Kunststoffen hergestellt werden, welche Eigenschaften diese haben und wo sie zum Einsatz kommen. Im Anschluss daran könnten die SchülerInnen auch selbst ein Informationsvideo zum Thema Kunststoffrecycling erstellen. Eine Auswahl an Links und Adressen ist unter dem Punkt „Weiterführende Informationen und Adressen“ zu finden.

### Vorschlag 5

Die SchülerInnen könnten in Supermärkte gehen und dort sowie im Internet und der entsprechenden Literatur recher-

chieren, welche Verpackungen und Gegenstände aus recycelten Kunststoffen hergestellt werden. Zusätzlich könnte ausgearbeitet werden, welche Eigenschaften recycelbare Kunststoffe aufweisen müssen und welche Eigenschaften diese Produkte besitzen.

## Evaluate der Extend-Phase

Die Lehrperson kann in dieser weiterführenden Phase beobachten, ob die SchülerInnen ihr neu erworbenes Wissen, aber auch andere Inhalte auf neue Aufgabenstellungen anwenden können. Außerdem kann das Bewusstsein der SchülerInnen für Mülltrennung, Recycling, Mehrwegprodukte usw. gesteigert werden, wenn das Thema in der Extend-Phase auch explizit reflektiert wird.

## Danksagung

Wir danken der Sheffield University für die Idee zu diesem Mystery und der Europäischen Kommission für die Finanzierung des Projekts TEMI (Teaching Enquiry with Mysteries Incorporated; Grant Agreement N. 321403), in dessen Rahmen diese Unterrichtseinheit entstanden ist. Weitere Informationen zum Projekt finden Sie unter <http://teaching-mysteries.eu/at/>.

## Weiterführende Informationen und Adressen

### Der ÖKK (Verein Österreichische Kunststoff Kreislauf AG)

<http://www.kunststoffhoertzu.at/uber-uns/der-okk/>

Hier werden Fragen rund um Kunststoffe und deren Recycling beantwortet.

### Altstoff Recycling Austria (ARA)

<http://www.ara.at/>

### Sammlung von Kunststoffverpackungen

<http://www.ara.at/d/konsumenten/recycling/kunststoffverpackung.html>

### Link zum Artikel "Kunststoffverpackungen im Kreislauf":

<http://www.ara.at/d/konsumenten/recycling/kunststoffverpackung.html>

### PET to PET Recycling Österreich GmbH, 7052 Müllendorf, SET-Straße 10

<http://www.pet2pet.at/>

Auf der Homepage dieses Recyclingbetriebes kann in kurzen Videosequenzen der Kreislauf dieses Werkstoffes nachvollzogen werden.

### Ecoplast Kunststoffrecycling, 8410 Wildon, Untere Aue 21

<http://www.ecoplast.com/>, <http://www.ecoplast.com/index.php/recycling/kreislauf/>

Hier können Hintergrundinformationen zum Thema Kunststoffrecycling entnommen werden.

## Literatur

- [1] Lembens, A., & Abels, S. (2015). Forschendes Lernen nach dem 5E-Modell und Showmanship. *Chemie und Schule*, 30(1b), 6-7.
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=Z-pDxahLEyc>.

# Von Badezusätzen und anderen Kosmetikprodukten

## Zum nachhaltigen Umgang mit Kunststoffen

Simone Abels und Anja Lembens

„Beat the microbead“ – so lautet der Name einer internationalen Umweltkampagne, die sich gegen die Verwendung von Mikrokunststoffen richtet [1]. Die Mikropartikel sind vor allem in Peelings enthalten, aber auch in Gesichtereinigern, Duschgels, Nagellackentferner u.ä. (s. Produktlisten [2]). Sie dienen als Ersatz für natürliche Inhaltsstoffe wie z. B. Bimsstein, Salzkristalle, Haferflocken oder Nusschalen [3]. Sie sollen als „mechanische Putzkörper“ dienen und dadurch eine besonders gute Reinigung bewirken [1]. Solche sog. Microbeads (Mikrokügelchen) sind  $5\ \mu\text{m}$  bis 1 mm groß und bestehen aus synthetischen Polymeren wie Polyethylen, Polypropylen oder Polystyrol [3].

Das Problem bei der Verwendung solcher Partikel liegt darin, dass Kläranlagen die Mikropartikel nicht herausfiltern. Sie sammeln sich in Flüssen, Seen und Meeren an, wo sie sehr langsam abgebaut werden (450 bis 1000 Jahre) und von im Wasser lebenden Tieren aufgenommen werden können. Außerdem binden die Mikrokunststoffe weitere organische Giftstoffe aus dem Wasser. Über die Nahrungskette nehmen dann andere Tiere und schließlich auch wir Menschen die Mikrokunststoffe auf. Die Folgen sind noch nicht abzusehen. Obwohl Firmen zugesichert haben, keine Mikrokügelchen mehr einzusetzen – Zahnpasta ist z. B. in Österreich mittlerweile kunststofffrei –, finden sie sich teilweise nach wie vor in vielen Produktgruppen [1].

Mit Schülerinnen und Schülern solche Themen zu bearbeiten, zielt auf Bildung für eine nachhaltige Entwicklung ab. Sie sollen lernen, sich verantwortungsbewusst zu verhalten, ressourcen- und umweltschonend mit unserer Welt umzugehen, so dass die Bedürfnisse der jetzigen Generation erfüllt werden können, ohne die zukünftiger Generationen zu kompromittieren [4]. Dafür ist die Entwicklung einer Urteils- und Handlungskompetenz entscheidend, die (zukünftigen) Bürgerinnen und Bürgern erlaubt, an politischen, ökonomischen, ökologischen und sozialen Themen mitzudiskutieren und Entscheidungsprozesse zu beeinflussen oder sich zumindest ein Urteil zu bilden (vgl. Bildungsstandards Naturwissenschaften, Handlungsdimension Schlüsse ziehen [5]).

Die Herausforderung im Unterrichten solcher Themen liegt darin, dass es oftmals beim Diskutieren und Urteilen bleibt, ohne dass tatsächlich eine Handlungsänderung erreicht wird, ohne dass also reflektierte Handlungsentscheidungen

getroffen werden [6]. Die Diskussionen bleiben zu abstrakt und sind vielleicht auch manchmal zu moralisch anstatt wissenschaftlich informiert.

Im Folgenden wird daher ein Zugang im Sinne Forschenden Lernens vorgeschlagen, bei dem solche Fragen im Anschluss ans Experimentieren mit Polymeren angeregt werden und für die Schüler und Schülerinnen dadurch konkreter und persönlich bedeutsamer erscheinen könnten.

## Das Thema ‚Polymere‘ forschend erlernen

In einer ersten Unterrichtsphase gilt es, die Schülerinnen und Schüler für ein Thema zu begeistern und in eine fragende Haltung zu bringen (Engage-Phase)<sup>1</sup>. Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Darbietung eines anregenden Materialtisches (Abb. 1).



Abb. 1. Materialtisch (eigene Aufnahme)

Auf dem Materialtisch befindet sich in diesem Fall eine vorbereitete Wanne, die Wasser und einen Badezusatz enthält. Wir haben hier Gelli Baff® verwendet (bei Amazon® erhältlich oder auch unter dem Namen Glibbi® beim Drogeriemarkt Müller®). Der Badezusatz ist ein farbiges Pul-

<sup>1</sup> Die hier beschriebene Unterrichtseinheit ist nach dem 5E-Modell Forschenden Lernens aufgebaut. Details zum Modell können in [7] und im Einführungsartikel dieses Heftes nachgelesen werden. Die Phasen des 5E-Modells sind Engage (Engagieren/Motivieren), Explore (Erkunden), Explain (Erklären), Extend (Erweitern/Vertiefen) und querliegend dazu die Evaluate-Phase (Evaluieren/Einschätzen).

ver, das in Wasser innerhalb weniger Minuten aufquillt. Unserer Erfahrung nach lassen sich davon alle Altersstufen vom Kleinkind bis zum Erwachsenen begeistern<sup>2</sup>. Auf dem Materialtisch befinden sich außerdem Haargel, Zahnpasta, Windeln, ungefärbter Superabsorber (z. B. erhältlich im VCÖ-Shop<sup>3</sup>), Kochsalz, Meersalz, Natriumhydrogencarbonat (Soda), Haushaltessig, Zitronensaft, Puderzucker, Haushaltszucker, Waschmittel, eine Waage, Messzylinder, Messbecher, Rührstäbe, Spatel, Bechergläser oder kleine Schüsseln (vgl. [8]). Der Materialtisch ist je nach Erfahrung der Schülerinnen und Schüler flexibel erweiterbar oder auf einzelne Versuchsmöglichkeiten hin eingrenzbar.

Die Lehrperson könnte nun folgende kurze Story erzählen und dabei mit der Hand in die Wanne mit dem glibberigen Gel fahren (Gel färbt nicht):

*„Die Geschwister Sarah und Philip haben den ganzen Nachmittag im Gelli Baff gebadet. Nun ist es genug und sie wollen die Badewanne wieder sauber machen. Aber wie?! Das Gelli Baff ist viel zu dickflüssig für den Abfluss“.*

Wir gehen für diese Unterrichtseinheit davon aus, dass die Schülerinnen und Schüler bereits mit Superabsorber, der in Windeln enthalten ist, gearbeitet haben. Sie wissen z. B., dass bestimmte Pulver in Wasser aufquellen und dass Windeln mehr destilliertes Wasser als Leitungswasser oder salzhaltiges Wasser aufsaugen. Auf Basis dieses Vorwissens sollen die Lernenden erste Vermutungen äußern, wie man das Gel verflüssigen könnte. Als Hilfe können neben bereits bearbeiteten Arbeitsblättern zu der Windel auch Satzanfänge zum Einsatz kommen (Ich vermute, dass ... oder auch: Ich vermute, dass das Gelli Baff durch die Zugabe von ... flüssig wird.). Als Lehrkraft lässt sich in dieser Einstiegsphase einschätzen (Evaluate), welches Vorwissen die Schülerinnen und Schüler aktivieren können, ob sie bereits erste Zusammenhänge herstellen und wie sie Hypothesen formulieren können (vgl. [8]).

Anschließend sollen die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen hypothesengeleitet Experimente planen und durchführen, um ihre Vermutungen zu überprüfen (Explore-Phase). Als Inspiration können sie den Materialtisch nutzen. Hier kann die Lehrperson beobachten, ob die Lernenden nach einem ‚trial and error‘-Verfahren vorgehen oder ob sie begründet planen und systematisch ihre Ideen umsetzen und protokollieren.

Auf Basis der Beobachtungen und gewonnenen Daten versuchen die Schülerinnen und Schüler dann zu einer Erklärung bezüglich der Ausgangsfragestellung zu gelangen (Explain-Phase). Hier kann die Lehrperson zur Unterstützung fachliche Inputs geben, Recherchezeit ermöglichen, Fachtexte

<sup>2</sup> Diese Unterrichtseinheit wurde im Rahmen des FP7 EU-Projekts TEMI (Teaching Enquiry with Mysteries Incorporated) entwickelt und vielfach erprobt. Das Projekt wird unter der Grant Agreement Nummer 321403 seit Februar 2013 bis Juli 2016 von der EU gefördert. Details zum Projekt sind hier zu finden: <http://teachingmysteries.eu/at/> [03.11.2015]

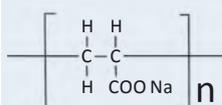
<sup>3</sup> Online-Shop des Verbandes der ChemielehrerInnen Österreichs (VCÖ): <http://www.vcoe.or.at/shop/index.php> [15.11.2015]

oder Animationen (z. B. [9]) zur Verfügung stellen.

In der Unterstufe wäre eine fachliche Klärung auf Phänomenebene angemessen. Die Schülerinnen und Schüler können Stoffe, die sie verwendet haben, um das Gel zu verflüssigen, nach Kategorien einteilen, z. B. funktioniert / funktioniert nicht, und die gemeinsamen Eigenschaften dieser Stoffe herausarbeiten. Die Lernenden sollen die Systematik erkennen und erklären können, dass das Gel mittels Zugabe saurer Lösungen oder von Natriumsalzen verflüssigt werden kann. Andere Feststoffe wie z. B. verschiedene Zucker oder basische Lösungen erzielen diesen Effekt hingegen nicht.

In der Oberstufe kann das Phänomen auch auf submikroskopischer Ebene von den Schülerinnen und Schülern erklärt werden. Die Hilfen der Lehrperson werden z. B. Inputs oder Fachtexte mit Abbildungen zur Molekülstruktur des Polymers oder der stattfindenden Gleichgewichtsreaktion sein, damit die SchülerInnen das Rückgängigmachen der Quellung, also das Verflüssigen, so wissenschaftlich informiert wie möglich selbständig erklären können (Kasten 1).

**Fachliche Klärung:** Der Hauptbestandteil von Gelli Baff® und Superabsorbent ist das Natriumsalz der Polyacrylsäure, ein Polyelektrolyt, der die Eigenschaften eines Polymers und eines Elektrolyten vereint. Kommt dieser Polyelektrolyt in Kontakt mit Wasser, sind die Natriumionen bestrebt, sich zu gleichen Teilen zwischen der Polymerverbindung und dem Lösungsmittel zu verteilen. Wassermoleküle lagern sich an den Natriumionen an und hydratisieren diese. Die zuvor, durch die Natriumionen abgeschirmten, negativ geladenen Carboxylat-Gruppen stoßen sich aufgrund ihrer negativen Ladung immer stärker voneinander ab und benötigen so mehr Raum. Der Polyelektrolyt nimmt deshalb eine gestreckte Form ein. So können sich die Wassermoleküle besonders gut um die Ionen gruppieren und ihre Lage durch Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrücken stabilisieren. Durch intermolekulare Vernetzungen wird verhindert, dass sich die Carboxylat-Gruppen zu weit voneinander entfernen bzw. lösen. Das Makromolekül quillt auf, d. h. die Viskosität nimmt zu. Das Natriumsalz der Polyacrylsäure kann in destilliertem Wasser das 800-fache seines Gewichts absorbieren, in Leitungswasser nur das 300-fache, weil dieses Natrium-, Calcium- und andere mineralische Salze beinhaltet. Von einer physiologischen Kochsalzlösung (0,9%ig), was in etwa der Salzkonzentration im Urin entspricht, wird noch deutlich weniger aufgenommen.



Gibt man Natriumchlorid zu, so werden die Ladungen der Carboxylat-Gruppe durch die Natriumionen ausgeglichen. Die elektrostatische Abstoßung der Polymerketten untereinander wird geringer und somit auch das Bestreben des Gels, weiter Flüssigkeit aufzunehmen. Die gestreckten Moleküle verknäulen sich, das Gel wird flüssig. Das Verknäulen von schwachen Polyelektrolyten, wie der Polyacrylsäure, lässt sich auch durch den pH-Wert kontrollieren. In wässriger Lösung entsteht bei der Reaktion der Polyacrylsäure mit Wasser auch Hydroxidionen, wodurch das gelöste Gelli Baff leicht basisch reagiert, was mit pH-Indikatoren gezeigt werden kann. Durch Zugabe von sauren Lösungen und damit einer Verringerung des pH-Werts, stellt sich die verknäulte Struktur wieder ein.

Kasten 1. Fachliche Klärung des Experiments (leicht verändert nach [8, S. 19])

## Die Entsorgung als Lernmöglichkeit

Anschließend an diese drei Phasen des Unterrichts (Engage, Explore, Explain) stellt sich nun in der Extend-Phase das Problem der Entsorgung. Darf das verflüssigte Gel einfach über die Kanalisation entsorgt werden? Laut Hersteller ist der Badezusatz unbedenklich und darf gelöst in den Abfluss oder als Gel in den Hausmüll wandern (Abb. 2).

Die aufgeworfene Frage der Entsorgung führt zu Lernmöglichkeiten im Sinne einer Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. Wie soll man sich ressourcen- und umweltschonend verhalten? Die SchülerInnen können zunächst auf Basis ihrer Vermutungen und bisherigen Kenntnisse über das Polyacrylat intuitive Urteile fällen. Diesen Urteilen und Vermutungen könnte strukturiert nach Think-Pair-Share (Denken-Austauschen-Besprechen)<sup>4</sup> Raum gegeben werden. Auch ein Diskurs entlang eines Concept Cartoons wäre denkbar (vgl. Steininger in diesem Heft). Ziel der Diskussion wäre, zu erkennen, dass für ein fachlich informiertes Urteil mehr Informationen nötig sind. Die SchülerInnen sollen so selbstständig wie möglich zusätzliche Informationen in Erfahrung bringen oder bereitgestellte Informationen aufarbeiten. Sie sollen dabei überlegen, welche Quellen vertrauenswürdig sind und wie sie ggf. mit unsicherer Evidenz umgehen<sup>5</sup>.

Die SchülerInnen könnten z. B. auf das Sicherheitsdatenblatt stoßen, das besagt, dass Polyacrylat nicht toxisch für Meer- und Landbewohner sowie biologisch abbaubar ist und keine Auswirkungen auf das Wassersystem hat [10]. Es ist außerdem bekannt, dass diese Polymere nicht vergasen und so auch keine toxischen Gase in die Luft oder das Grundwasser abgeben. Sie werden laut [11] in Klärschlamm, Sedimenten oder Ackerböden adsorbiert. Aufgrund der unterschiedlichen Informationen können sich den SchülerInnen folgende Fragen stellen: Wird Polyacrylsäure (in der hier vorliegenden Form) tatsächlich im Klärschlamm abgeschieden, sind die Partikel nicht zu leicht und zu klein dafür? Was passiert, wenn polyacrylsäurehaltiger Klärschlamm auf Ackerböden ausgebracht wird?

<sup>4</sup> Erst allein nachdenken, dann im Team oder in der Kleingruppe diskutieren und anschließend im Plenum die Ergebnisse beisteuern. So erhöht sich die Chance, dass mehr SchülerInnen sich an der Plenumsphase beteiligen.

<sup>5</sup> Hier wird der Bereich Nature of Science bzw. die Natur der Naturwissenschaften adressiert.

<sup>6</sup> In einem Sitzkreis diskutieren vier bis sechs VertreterInnen unterschiedlicher Positionen miteinander. Die anderen SchülerInnen haben einen Beobachtungs- und/oder Dokumentationsauftrag und dürfen sich nach festgelegten Kommunikationsregeln mit Kurzbeiträgen in die Diskussion einmischen, indem sie einen freien Sessel im Kreis einnehmen..

Vielleicht lesen die SchülerInnen aber auch die Homepage der „Beat the Microbead“-Kampagne [1] genauer und erfahren, dass viele Kunststoffe, insbesondere auch die Mikropartikel in Kosmetikprodukten, große Schäden an unserem Ökosystem verursachen. Lässt sich da einfach so ausschließen, dass dies für Badezusätze nicht gilt? Was ist der Unterschied der enthaltenen Kunststoffe? Solche Fragen könnten auch mit verteilten, gut recherchierten und vorbereiteten Rollen in einer Fishbowl<sup>6</sup> diskutiert werden (VertreterIn der Industrie, ForscherIn, VertreterIn der Kampagne, UmweltpolitikerIn etc.), in der die unterschiedlichen Perspektiven vertreten werden. Die Lehrperson kann den Diskurs moderieren und durch Leitfragen steuern. Es sollte sichtbar werden, wie wichtig das Engagement in solchen Kampagnen ist und was sie bewirken. Die SchülerInnen können abschließend nach begründeten Wahl- bzw. Konsumententscheidungen gefragt werden, um einschätzen zu können, welche Position sie auf Basis welcher Argumente vertreten.

Auch bei sorgfältiger Recherche wird es nicht möglich sein, völlig widerspruchsfreie und umfassende Informationen zu erhalten. Es ist wichtig, dass Schülerinnen und Schüler auch mit solchen Situationen umzugehen lernen. Es müssen Entscheidungen unter Unsicherheit getroffen werden und es gilt abzuwägen, welche Werte mehr ins Gewicht fallen: mögliche Umweltschäden oder Spaß etc.

## Literatur

- [1] <http://www.beatthemicrobead.org/de/> [18.09.2015]
- [2] <http://www.beatthemicrobead.org/de/produktlisten> [18.09.2015]
- [3] Rochman, C. M. et al. Veríssimo, D. (2015). Scientific Evidence Supports a Ban on Microbeads. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 10759-10761.
- [4] Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm> [18.09.2015]
- [5] Bifie (2011). Kompetenzmodell Naturwissenschaften 8. Schulstufe. [https://www.bifie.at/system/files/dll/bist\\_nawi\\_kompetenzmodell-8\\_2011-10-21.pdf](https://www.bifie.at/system/files/dll/bist_nawi_kompetenzmodell-8_2011-10-21.pdf) [18.09.2015]
- [6] Höbtle, C. & Menthe, J. (2013). Urteilen und Entscheiden im Kontext Bildung für nachhaltige Entwicklung. Ein Beitrag zur Begriffsklärung. In J. Menthe, et al (Eds.), *Handeln in Zeiten des Klimawandels. Bewerten lernen als Bildungsaufgabe* (S. 35-63). Münster u.a.: Waxmann.
- [7] Lembens, A. & Abels, S. (2015). Forschendes Lernen nach dem 5E-Modell und Showmanship. *Chemie & Schule*, 30(1b), 6-7.
- [8] Abels, S. & Lembens, A. (2015). GelliBaff® – Superabsorber, der wieder flüssig wird. *Chemie & Schule*, 30(1b), 17-19.
- [9] <http://www.chempage.de/versuche/OC/OC%20007/superabsorber.html> [05.10.2015]
- [10] ETi (2004). Material Safety Data Sheet. <http://www.hmsmedical.com/images/44-oc%20msds.pdf> [05.10.2015]
- [11] FDA (2010). Environmental Assessment. <http://www.fda.gov/downloads/Food/FoodIngredientsPackaging/EnvironmentalDecisions/UCM243558.pdf> [05.10.2015]

# What happened to the cup?

Peter E. Childs

**Age:** Can be done at age 15-16 without going into glass transition temperatures and structures; age 17-18 with a more detailed look at polymer structure and properties

**Subject-matter area:** Structure and properties of polymers, recycling

**Duration:** 2-3 lessons

## ENGAGE<sup>1</sup>

### Scenario

I was making a cup of coffee and there were no clean cups. So I grabbed a transparent disposable plastic cup from the shelf and put in the coffee powder and then poured the hot water into the cup. It was a good job I did it over the sink because the cup 'collapsed' and shrank, spilling all the liquid. The cup had collapsed and changed its shape. That doesn't happen when I use cold water or when I use a more rigid plastic beaker. Why did that happen? What is the difference between those two plastic vessels? How hot does the water have to be to make it happen? Does it happen with all disposable plastic cups?

## EXPLORE

How hot does the water have to be for this to happen? Set up an investigation using hot water from a kettle and a thermometer to test this out. Does it happen with other makes of disposable cups? Get some different transparent cups and try it out. Does it work with all or only some? Is it reversible – does cold water restore the shape or not? How can you check what sort of polymer the cups are made from?

**Hint:** check the symbol on the bottom and look up the name and symbol to identify the plastic. See the table of polymer symbols provided (Table 1).

- Are the cups that collapse made from particular polymers?
- Is the way they are produced of relevance?
- What about cups that don't collapse?
- The cups change shape but do they lose mass or stay the same?
- Is it to do with whether the polymer is biodegradable or not?

<sup>1</sup>) This teaching unit was developed within the framework of the FP7 EU-project TEMI (Teaching Enquiry with Mysteries Incorporated, Grant Agreement N. 321403; see also <http://teachingmysteries.eu/> [Oct 28 2015]). All units are based on the 5E model of inquiry-based learning. Details can be found in the introduction of the issue.

## Preparation

You need to source some transparent, disposable plastic cups made from different plastics. Several types are available: polystyrene (PS), polyethyleneterephthalate (PET), poly-lactic acid (PLA), polypropylene (PP). There are also coloured, opaque cups available and white, expanded polystyrene cups. The initial mistake was made with PLA cups, which are also biodegradable. The cups are cheap and so after the initial teacher demonstration, the students can work in groups with a set of different cups. Each group should have access to hot water, e.g. from an electric kettle, thermometer and a plastic bowl or container to contain the cups and water. This should avoid water being spilled over the classroom.

## EXPLAIN

The cups are made from polymers and are meant for one use only. They are made from very little plastic and are thin-walled and are usually used for cold drinks. Why do some cups collapse when hot water is used and others don't? What do you think is happening when hot water is added? Can you think of other examples where this sort of thing happens? You should identify the plastics used for each make of cup and look up its properties e.g. whether it is biodegradable or not (Fig. 1), its melting point ( $T_m$ ) and its glass transition temperature ( $T_g$ ), a property special to polymers.



Fig. 1. Recycling symbols for common polymers [http://teachers.yale.edu/curriculum/viewer/initiative\\_09.05.08\\_u](http://teachers.yale.edu/curriculum/viewer/initiative_09.05.08_u) [09.12.2015]

## Clarification of the subject-matter

Different polymers have different melting points ( $T_m$ ), when they turn into a viscous liquid, but at a lower temperature (known as the glass transition temperature,  $T_g$ ) they become plastic or rubbery and shrink back to their original size, much like a balloon when the air is let out (Fig. 2). On cooling they set solid again. A table of values for common plastics is given below (Tab. 1). Plastic cups are often made by blowing air into a blob of hot, molten polymer in a mould. It blows up to fill the mould and when it is cooled it has the shape of the mould. When the plastic is hot it can be shaped and blown like a balloon, but on cooling it sets into the new shape. (You can find some plastic bubbles in

toy shops which can be used to blow permanent bubbles.)



Fig. 2. The effect of hot water on PLA cups –  $T_g$  is the glass transition temperature, above which the polymer becomes plastic and returns to its original size.  
<https://publi.cz/books/180/06.html> [09.12.2015]

Name	Abbreviation	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_g/^\circ\text{C}$
Poly(lactic acid)	PLA	163	60
Polystyrene	PS	240	95
Polyethyleneterephthalate	PET	260	70
Polypropylene	PP	130-171	0
Polyvinylchloride	PVC	160	87

Tab. 1: Properties of common polymers

## EXTEND

Take a 500 mL or 2 L drinks bottle, used to contain fizzy drinks. If you check the bottom they may say that they are made from PET polymer (Polyethyleneterephthalate). They are transparent like glass and they are made by blowing the polymer in a bottle-shaped mould. What do you think might happen if you put a bottle into boiling water? Is this behaviour the same or different to the cup? Try filling a 500 mL bottle half full of hot water and then screwing on the top. What do you think will happen?

What do you think the effect of cold will have on a plastic cup? Plastics have two temperatures similar to melting and freezing ranges. At the lower point, the glass transition temperature, a flexible plastic becomes rigid like a glass. Check this temperature for the polymer you have identified during the exploration phase and then see if you can cool it below that temperature.

**Hint:** You may need to think how to get that cold – will a freezer do it? Or a salt-ice cooling mixture? Or dry ice? Or liquid nitrogen? If you have access to a suitable way of cooling the cup, try and see what effect cooling has on its physical properties. Your teacher might show you the effect of liquid nitrogen on a flexible polymer.

Make a model of a thermoplastic polymer and use this to explain why it can change its shape.

You can buy a plastic bubble kit, which can be used to blow up permanent bubbles, which don't burst like soap bubbles. What is the connection between these bubbles and a balloon on the one hand, and a plastic cup or bottle on the other?

## EVALUATE

Can the students explain in terms of the structure and properties of the polymer, why some plastic cups collapse when hot water is poured into them and others don't do this? Can they explain how soft drinks bottles are made from a former (a test-tube like shape, Figure 3) and why they



retain their shape when they have been produced by heat and blowing with gas? Can they then explain why the bottle will collapse back to nearly its original size if heated?

Fig. 3. PET bottle and former  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Plastic\\_bottle.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Plastic_bottle.jpg)

### Further hints:

Unbreakable bubbles

<http://chemistry.about.com/od/bubbles/a/Bubbles-That-Dont-Pop.htm> (access date)

Magic plastic bubbles – ar. £4 per tube (available in toy shops)

<http://www.hawkin.com/magic-plastic> (date)

Blow moulding

<http://www.bpf.co.uk/data/iframe/injectionBlowMoulding.html> (date)

Making PET bottles from a former.

<https://www.youtube.com/watch?v=v89ezOA0oNE>

Using PET to make bottles and its properties

<http://www.kenplas.com/project/pet/>

Slideshow on the development of plastic cups to make them more heat resistant:

<http://www.slideshare.net/Atkinderek/innobioplast-2013-presentation-dwa-coffee-cup-development>

### See also:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene\\_terephthalate](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate)

[http://www.fpintl.com/wp\\_biodegradable\\_plastics.aspx](http://www.fpintl.com/wp_biodegradable_plastics.aspx)

Name:	Subject: Chemistry	Date:	WS 1.2
<b>The unstable cup</b>			

Transparent plastic cups are disposable and have thin walls. They are available in vending machines and are primarily used for cold drinks. Are there reasons why this type of cups are not used for hot drinks, like coffee or tea?



**Task:**

By mistake your teacher poured a hot liquid into a transparent plastic cup and it collapsed, spilling the drink, as shown in the picture below.

**Engage**



before

after

When the teacher repeated this with a different type of cup, the cup didn't collapse. Why was the behaviour different? Write down your assumptions in your exercise book.

**Task 1:**

What is the difference between the two types of transparent cups? How could you identify what they were made from?

Hint: Think about recycling and how we know what polymer an artificial material is made from.



**Task 2:**

Does the temperature of the liquid have an effect on the collapse of the cup? Devise an experiment using both sorts of cups to see what effect the temperature has on the shape of the cups.

Caution: You will need to use boiling liquids, which can be diluted with cold liquids to get liquid samples with different temperatures.

**Task 3:**

Can you find any other types of transparent cups made from different polymers? See if they are affected by hot water or not.

Name:	Subject: Chemistry	Date:	WS 1.2
<h1>The unstable cup</h1>			

## Explain

Most solids have a definite melting point when they change from a solid to a liquid. Polymers have two characteristic temperatures: one at which they turn from a rigid, glassy state to a rubbery, plastic state (the glass transition temperature,  $T_g$ ) and one at which they turn into a viscous liquid (the melting point,  $T_m$ ).

**Task 1:** Draw up a table for the polymers used in the cups you selected, giving the melting point and the glass transition temperature. Compare the data in the table with the behaviour of the cups during your investigation and come up with an explanation of why some polymers change their shape in hot water and others do not.

**Task 2:** Make models or look at pictures of polymer chains and explain why polymers can be both plastic (rubbery) and rigid (glassy), depending on the temperature. Research why they behave differently from other organic molecules, like paraffin wax or benzoic acid, which have a definite melting point?

**Task 1:** Look up and research how soft drink bottles are made from PET, starting with something that looks like a test-tube. Explain in terms of  $T_m$  and  $T_g$  how the test-tube can be made into a 500 mL or 2 L bottle. Will the mass change when this is done or not? Explain also what happens when you put boiling water into the 500 mL or 2 L bottle.

**Task 2:** Find out how PET bottles are recycled and whether or not they can be turned back into new bottles.

**Task 3:** Look up the properties of the different polymers you have identified in the Explore-Phase and whether they are biodegradable or not.

**Task 4:** If available, investigate the properties of plastic bubbles and try to explain why they don't collapse like soap bubbles.

**Task:** Can you explain why polymers don't behave like other organic molecules in terms of their structure? How do the special properties of polymers allow us to make cups or bottles by blowing molten polymer inside a mould?

# Neue Polymere für die Medizin

Ian Teasdale, Helena Henke, Brigitte Koliander, Gerhard Kern

Polymere, im Alltag als „Kunststoff“ oder „Plastik“ bezeichnet, werden oft als hässlich, umweltverschmutzend, auch als gefährlich dargestellt. Mit dem folgenden Artikel soll ein Unterricht unterstützt werden, der SchülerInnen bei der Erkenntnis hilft, dass aus Makromolekülen aufgebaute Stoffe sehr unterschiedlich sind. Es kann kein allgemeines Urteil über diese Stoffe geben. Zu den Polymeren gehören „Plastik“ und „Kunststoffe“, aber auch natürlich vorkommende Polymere wie z. B. Proteine, Stärke und Cellulose. Es gibt weit gefächerte Anwendungen: Vom Autoreifen bis zu Superabsorbentpolymeren in Windeln, von Solarzellen bis zu medizinischen Implantaten. Der Schwerpunkt wird in diesem Beitrag auf Anwendungen der Polymere in der Medizin gelegt.

Künstliche Polymere werden heute schon für viele Therapien in der Medizin eingesetzt. Wenig bekannte Beispiele sind der Einsatz als Tablettensprengmittel oder als „Wirkstofftaxi“ (eine kurze Einführung unter: JKU Science Video „Funktionale Polymere machen's möglich“, <https://youtu.be/A5U0o2auOH0> [03.12.2014]). Neue Polymere werden für Bereiche entwickelt, für die kein bisher bekanntes Material geeignet ist.

## Folgenden Fragen gehen wir in diesem Artikel nach:

- Welche grundlegenden Denkweisen der Chemie können am Beispiel „Polymere“ vermittelt werden?
- Wie können SchülerInnen zum Thema „Polymere in der Medizin“ hingeführt werden?
- Was gibt es an spannender aktueller Forschung dazu?

Wir haben als Einstieg eine immer wieder gehörte Behauptung gewählt, die viele Laien beunruhigt: Plastik ist giftig.

## Ist Plastik giftig?

Man stößt in den Medien immer wieder auf plakative Darstellungen von „Tatsachen“, zum Beispiel auf die Gefahr von Weichmachern in Plastik. Es wird bei vereinfachten Beschreibungen oftmals vermischt, was auf der realen Ebene für Laien sichtbar und erfahrbar ist und wie ChemikerInnen über diese Vorgänge sprechen. Wird beispielsweise eine Chemikerin befragt, so sagt sie, dass „aus Kunststoff hormonähnliche Stoffe gelöst werden können und dass diese in Nahrungsmitteln, im Blut der Menschen und in den Gewässern nachgewiesen werden können“ – tatsächlich eine Erkenntnis, die zum Handeln aufruft und nicht übergangen werden darf. Die Chemikerin weiß allerdings, dass es viele verschiedene Kunststoffe gibt, für sie ist Plastik nicht gleich Plastik. Sie weiß, dass hormonähnlich wirkende Stoffe als

Weichmacher nur manchen Kunststoffen, vor allem PVC, zugegeben werden. Sie denkt die Vorgänge auf einer molekularen Ebene mit. Sie sieht den Aufbau der Polymere aus den langen Ketten der Moleküle vor sich, sie denkt die äußeren Weichmacher, wie Bis(2-ethylhexyl)phthalat (DEHP), als kleinere Moleküle, die zwischen diesen Ketten eingelagert sind.

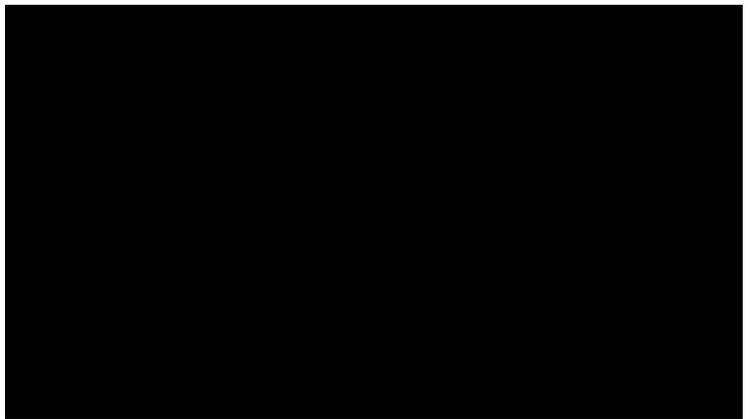


Abb. 1: Wie sich eine Chemikerin PVC mit Weichmachern vorstellen könnte

Sie würde nicht auf die Idee kommen, dass jemand diesen Satz so verstehen könnte, dass „giftiges Plastik“ aus PET-Getränkeflaschen ins Blut geht. Solchen weit verbreiteten Missverständnissen sollte man mit folgenden Argumenten entgegentreten:

Wenn kein **Weichmacher** zum Kunststoff dazugegeben wurde, kann er nicht enthalten sein. Es wäre überhaupt nicht notwendig, Weichmacher zu verwenden, wenn man bereit wäre, einen teureren Kunststoff mit besser geeigneten Anwendungseigenschaften zu nehmen.

Bisphenol A (BPA) wird oft in einem Atemzug mit „Plastik“ genannt – eine Quelle vieler Missverständnisse, vor allem im Bereich von Babyprodukten. BPA ist ein **Restmonomer**, übriggebliebene Grundbausteine des Polymers, also eine Verunreinigung von Polycarbonat und manchen Epoxidharzen mit dem Ausgangsstoff. Es kann de facto nicht aus einem **anderen** Kunststoff gelöst werden, wie oft befürchtet (zum Beispiel aus Getränkeflaschen, die aus PET hergestellt wurden).

Es gilt als Standard in der Pharmakologie und Toxikologie, dass Moleküle mit einem Molekulargewicht von über ca.  $500 \text{ g mol}^{-1}$  **nicht** über den Magen-Darm-Trakt in die Blutbahn gelangen können. Das heißt, per Definition und auch in der Praxis gelangen Polymere nicht in die Blutbahn (ohne dass sie absichtlich injiziert bzw. implantiert worden wären), sondern sie werden vom Körper einfach wieder über die

Exkreme ausgeleitet. Sie gelangen somit nicht zu den inneren Organen, wo Schaden angerichtet werden könnte. Fazit: Es ist äußerst selten, dass das Polymer selbst toxisch ist, sondern die kleinen molekularen Additive oder Verunreinigungen sind giftig, die in hochwertigeren Kunststoffen nicht enthalten sind.

Die Diskussion über die Auswirkungen des Einsatzes von Kunststoffen könnte durch ein grundsätzliches Verstehen der Sichtweise und Sprache der Chemie erleichtert werden. SchülerInnen sollen als Teil ihrer Grundbildung aus dem Chemieunterricht mitnehmen, dass ChemikerInnen „die Kunststoffe“, die im Alltag unter einem Begriff zusammengefasst werden, nochmals viel genauer in weitere Gruppen einteilen und dass sich diese in ganz wesentlichen Eigenschaften unterscheiden. Und sie sollen immer wieder darauf hingewiesen werden, dass in der Chemie die Phänomene auf der **Makroebene** (Plastikfolien aus Polyethen (PE) verrotten auf dem Komposthaufen nicht) mit Vorgängen auf der **molekularen Ebene** (Plastikfolien sind aus Makromolekülen mit sehr stabilen Bindungen aufgebaut) verbunden und erklärt werden [1].

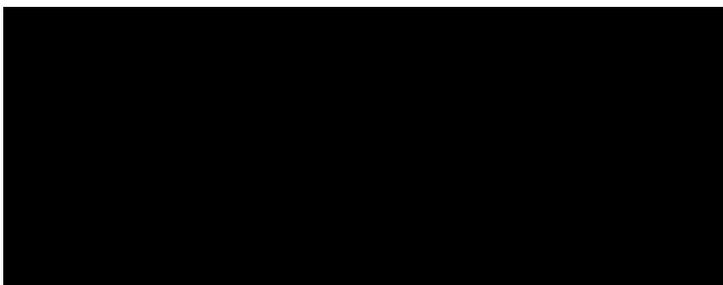


Abb. 2: Plastikfolie aus Polyethen auf dem Kompost (Makroebene), Ausschnitt aus einer Polyethenkette (molekulare Ebene)

Es werden nun Ideen vorgestellt, wie im Unterricht einerseits die Unterschiede zwischen Polymeren auf eine etwas andere Art als bisher üblich erfahren werden können, und andererseits der Zusammenhang zwischen den Phänomenen auf Makroebene und den Vorgängen auf molekularer Ebene thematisiert werden kann.

## Nützliche Kunststoffe?

Um die SchülerInnen in das Thema "Polymere und Medizin" einsteigen zu lassen, kann in Gruppen gesammelt werden, welche medizinischen Einsatzmöglichkeiten für Kunststoffe, und im weiteren Sinn Polymere, im und um den menschlichen Körper den SchülerInnen bekannt sind (Arbeitsblatt im Anhang).

Mögliche Ergebnisse dieses Arbeitsauftrags: Pflaster, Brillen, Spritzen, Schläuche, künstliche Augenlinsen, Zähne, künstliche Gelenke, Herzklappen, Infusionsflaschen, künstliche Nähte, Medikamente.

Die SchülerInnen werden unterschiedliches Vorwissen darüber haben, aus welchem Material die abgebildeten Teile (Abbildung siehe Arbeitsblatt im Anhang) sein könnten.

Manche werden weitere Anwendungsbereiche kennen, wenn Familienangehörige betroffen sind: Blutgefäße, Katheter, Bänder, Brustimplantate, ...

## Bezüglich der Eigenschaften von Kunststoffen, die in der Medizin Verwendung finden, könnten SchülerInnen auf Folgendes schließen:

- Wesentliche Eigenschaften für alle Materialien, die im menschlichen Körper eingebaut werden: Sie dürfen keine giftigen Substanzen abgeben, sie müssen mit den körpereigenen Zellen verträglich sein und dürfen keine Abwehrreaktionen hervorrufen. Sie müssen spezifische Eigenschaften für den Einsatz besitzen, wie Durchsichtigkeit bei einer Augenlinse, chemische Beständigkeit bei Zahnfüllungen, Festigkeit bei Nahtmaterial.
- Wesentlicher Unterschied zwischen Kunststoffen, die im Körper dauerhaft und solchen, die nur kurzfristig im Körper verbleiben sollen: die **Abbaubarkeit**. Wichtig ist, dass die Stoffe, die nur kurzfristig im Körper verbleiben sollen, zu ungiftigen Stoffen abgebaut werden, die über das Ausscheidungssystem aus dem Körper entfernt werden können. Die Alternative wäre, dass die Teile wieder operativ entfernt werden, was in vielen Fällen eine zusätzliche Belastung darstellt und in manchen Fällen (z. B. bei einer Matrix für sich wieder aufbauendes Gewebe) gar nicht möglich ist.

Für interessierte Personen wird nun auf eine medizinische Anwendung von Polymeren in der Medizin fokussiert und dazu tiefer in die Chemie eingestiegen.

## Fokus: Gezielte Wirkstofffreisetzung mit Drug Delivery Systemen

Was ist gezielte Wirkstofffreisetzung? Dabei geht es um Polymere, die Wirkstoffe enthalten, die hauptsächlich an einem bestimmten Zielort im menschlichen Körper über eine bestimmte Zeit abgegeben werden sollen. Drug Delivery Systeme helfen bei der Dosierung von Medikamenten. Jeder von uns hat wahrscheinlich schon Tabletten geschluckt, deren Wirkstoffe mit Hilfe von Polymeren zu einem bestimmten Zeitpunkt im Magen-Darm-Trakt freigesetzt werden. Ein Beispiel: Übliche Schmerzmittel (Diclofenac®, Ibuprofen®), die länger wirken sollen, werden durch Polymerbeschichtungen langsamer, nämlich über mehrere Stunden, freigesetzt, damit die PatientInnen länger schmerzfrei bleiben. Oder Wirkstoffe, die sonst durch den niedrigen pH-Wert im Magen zerstört werden (Erythromycin-Antibiotikum), können durch Beschichtungen, die sich erst im Darm auflösen, geschützt werden. Da das Polymer über den Magen-Darm-Trakt nicht aufgenommen wird, wird der Wirkstoff (in der Regel kleine Moleküle) alleine in die Blutbahn transportiert, das Polymer wird einfach im Exkrement ausgeschieden [2].

Polymere können aber auch die Freisetzung und Verteilung von Wirkstoffen in der Blutbahn beeinflussen. Wie funktioniert das? In diesem Fall kann das Medikament nicht ein-

fach geschluckt werden. Hier gibt es zwei Optionen. Erstens operativ: In diesem Fall ist der Wirkstoff in eine Polymermatrix eingelagert, die allmählich abgebaut wird und dabei den Wirkstoff freigibt. Dafür benötigt man ein abbaubares Polymer, dessen Abbaurate mit der benötigten Freisetzung korrespondiert. Ein gutes Beispiel sind Gliadel® Wafers für die Bekämpfung von Krebs, die aus abbaubarem Polyanhydrid bestehen, und die nach der operativen Entfernung eines Gehirntumors implantiert werden. Diese Methode wird bereits klinisch verwendet.

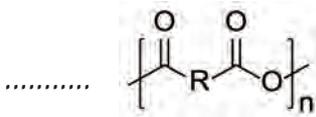


Abb. 3: Polyanhydrid

Die zweite Möglichkeit ist das Injizieren der Wirkstoffe direkt (intravenös) in die Blutbahn (Venentropf). Hierbei können polymerbasierte Drug Delivery Systeme verwendet werden, um zu beeinflussen, wo, wie und wann die enthaltenen Wirkstoffe freigesetzt werden. Damit das funktioniert, muss das Polymer entweder wasserlöslich (damit im Plasma löslich) sein oder in sehr kleine Nanopartikel verpackt werden, die in die Blutbahn eingespritzt werden können. Daraus folgt aber, dass das, was man injiziert hat, auch wieder aus dem Körper hinaus muss, sonst könnte es zu Nebenwirkungen führen. Makromoleküle werden von den Ausscheidungsorganen nicht aus dem Blut entfernt. Daher benötigt man für solche Einsatzmöglichkeiten abbaubare Polymere.

## Neue Polymere für die Medizin: Anorganische Polymere

### Gesucht: Abbaubare Polymere!

Es ist vielfach bekannt, dass die meisten kohlenstoffbasierten Polymere (Polystyrol, Polyethen usw.) nur bedingt oder gar nicht (biologisch) abbaubar sind: die Plastikfolie aus Polyethen verrottet nicht auf dem Kompost.

Sowohl umgangssprachlich als auch in der wissenschaftlichen Literatur werden die Begriffe **bioabbaubar** (als Kurzform für biologisch abbaubar) und **abbaubar** vermischt. Die meisten künstlichen Polymere bauen durch Hydrolyse ab, d.h. durch eine chemische Reaktion mit Wasser, und sind deshalb streng genommen nicht „bioabbaubar“, sondern einfach abbaubar.

Biopolymere (Stärke, Proteine) gelten als bioabbaubar. Ihr Einsatz in der Medizin ist aber problematisch. Die Bearbeitung und das „Maßschneidern“ der Makromoleküle sind bei Biopolymeren oft schwierig. Ein weiteres Problem ist, dass sie manchmal eine Immunantwort auslösen können.

Bekannte abbaubare künstliche Polymere (meist Polyester wie Polylactid und Polycaprolacton) zeigen nicht immer die geeigneten Eigenschaften für den Wirkstofftransport.

Deshalb beschäftigt man sich aktuell in der Forschung mit **anorganischen** Polymeren (Abb. 4).

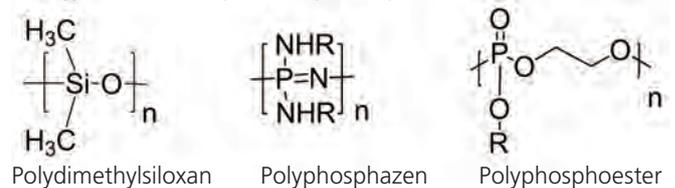


Abb. 4: Verschiedene anorganische Polymere

Polydimethylsiloxan, PDMS, ein Polymer aus der Gruppe der **Silikone**, ist schon jetzt sehr weit verbreitet (Katheter usw.), da es biologisch inert ist. Es ist aber nicht (bio)abbaubar, was für manche Einsatzgebiete gut ist, es aber für den Einsatz in Drug Delivery Systemen ungeeignet macht.

**Phosphorhaltige Polymere**, wie Polyphosphazene und Polyphosphoester zeigen Eigenschaften, die organische Polymere weit übertreffen. Sie werden durch Hydrolyse am Phosphoratom abgebaut (Abb. 5), wobei man die Abbaurate sehr leicht durch Substitution am Phosphoratom maßschneidern kann. Wenn der Zugang von Wassermolekülen zum Phosphoratom behindert wird, bauen die Polymere langsamer ab [3]. Die Hydrolyse am Phosphoratom führt zu Phosphat. Da Phosphat ein Metabolit ist, der überall vorkommt, ist es für den menschlichen Körper in geringen Konzentrationen unbedenklich.

Vor kurzem wurde gezeigt, dass sich Polyphosphazene sehr gut zur Wirkstofffreisetzung eignen [4]. Unter anderem wurden sie für die gezielte Freisetzung von Chemotherapeutika entwickelt (ein Video, in dem einem Taxilenker erklärt wird, wie dies funktioniert: <https://youtu.be/P1NoyiKQG00> [03.12.2015] MAYBE PALERMO or what E100304 is all about). Ähnlich wie im Magen-Darm-Trakt ändert sich der pH-Wert auch auf dem Weg vom Blutkreislauf bis in die Tumorzellen, wo ein niedriger pH-Wert herrscht [5]. Die Polymere wurden so hergestellt, dass sie bei niedrigerem pH-Wert schneller abbauen, wodurch der Wirkstoff freigesetzt wird. Polyphosphazene mit maßgeschneiderten Abbauraten wurden entwickelt und deren Abbaubarkeit bei unterschiedlichen pH-Werten untersucht (siehe auch die Studie über die Abbaubarkeit von Polymeren [6]).

Noch eine Idee, wie das Thema „Abbaubarkeit von Polyphosphazenen“ von SchülerInnen bearbeitet werden kann.

## Arbeiten mit der Studie über die Abbaubarkeit von Polymeren

Eine der Kompetenzen, die SchülerInnen beim Umgang mit konkreten Daten aus aktuellen Forschungen (siehe z. B. [6]) üben können, ist das Lesen der Diagramme, mit denen ForscherInnen Zusammenhänge sichtbar machen. Dazu gibt es im Anhang ein Arbeitsblatt, in dessen Zentrum ein Diagramm aus einer wissenschaftlichen Veröffentlichung über die Abbaubarkeit von Polyphosphazenen steht.

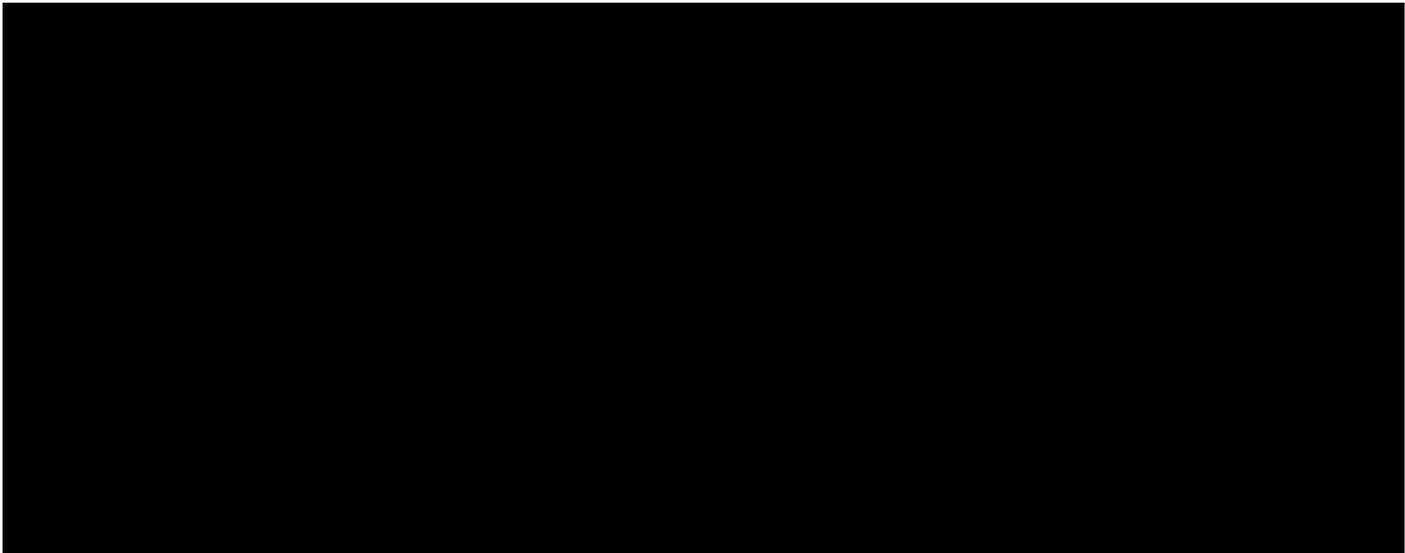


Abb. 5: Abbau eines Polyphosphazenes zu Phosphat und Ammoniak

**Tipp:** Wenn die SchülerInnen einfache chemische Analysen durchführen können (was einerseits die Existenz eines Labors voraussetzt und andererseits einige grundlegende Fertigkeiten der SchülerInnen im Umgang mit Geräten und Chemikalien), so kann man an dieser Stelle auch einen kolorimetrischen Phosphatnachweis (Anleitung im Anhang) durchführen lassen. Damit führt man die SchülerInnen näher an die konkreten Stoffe heran und die Messwerte im angeführten Diagramm werden besser begreifbar.

## Und zuletzt:

### Lasst uns einen Kunststoff selbst herstellen!

Eine Lerneinheit über Kunststoffe sollte auch die Möglichkeit beinhalten, einen Kunststoff selbst zu synthetisieren. Da Polyphosphazene in einem üblichen Schullabor nicht herzustellen sind (wasserfrei, Schutzatmosphäre, teure Ausgangsstoffe usw.), muss modellhaft auf eine andere Kunststoffsynthese ausgewichen werden.

Die meisten Kunststoffsynthesen sind schwierig, erfordern ein exaktes Befolgen der Anleitungen, einen verantwortungsvollen Umgang mit gefährlichen Chemikalien und benötigen oft teure oder nicht lange haltbare Ausgangsstoffe. Sehr einfach ist dagegen die Herstellung eines Polyesters aus Citronensäure und Glycerin (Anleitung im Anhang). Die beiden Ausgangsstoffe haben jeweils mehrere funktionelle Gruppen in ihren Molekülen, das genaue Mischungsverhältnis ist daher nicht so wichtig wie bei anderen Polykondensationen. Die Ausgangsstoffe sind billig, relativ ungefährlich und leicht erhältlich.

**Voraussetzungen:** Die SchülerInnen sollen mit einem Brenner umgehen können. Die Reaktion einer Carbonsäure mit einem Alkohol zu einem Ester soll den SchülerInnen bekannt sein, um die Bildung eines Polyesters verstehen zu können.

Auch hier ist der bewusste Wechsel zwischen der Makroebene und der Ebene der Atome und Moleküle wichtig. Der Kunststoff, der entsteht, ist zu Beginn dickflüssig und lässt sich zu Fäden ziehen. Auf der Ebene der Moleküle kann man dies mit den entstandenen Makromolekülen erklären.

Modelle dieser Makromoleküle kann man aus den Molekülen der Ausgangsstoffe herstellen, in dem man immer eine Alkoholgruppe und eine Carbonsäuregruppe miteinander unter Wasserabspaltung reagieren lässt.

Damit ist der Kreis geschlossen.

### **Das Wesentliche, das die SchülerInnen mitnehmen sollen:**

Kunststoff ist nicht gleich Kunststoff, und Polymere sind viel mehr als nur Kunststoff. Polymere haben unterschiedliche Eigenschaften und sie haben unterschiedlich gebaute Moleküle. Und wie immer in der Chemie wird versucht, Eigenschaften und Reaktionen der Stoffe auf der Makroebene über das Verhalten der Atome, Moleküle und Ionen auf der molekularen Ebene zu erklären und vorherzusagen.

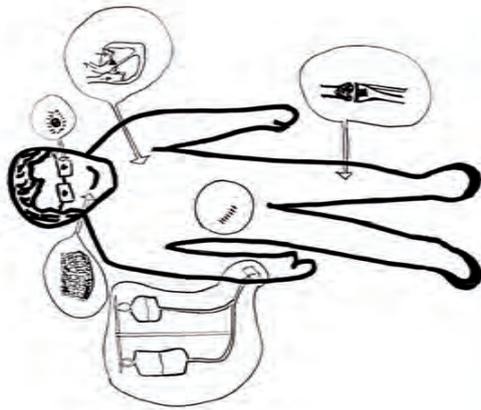
## Literatur

- [1] Johnstone, A. H. (1982): Macro- and Microchemistry, School Science Review (1982) 64, S. 377–379.
- [2] Perry J.; Chambers A.; Spithoff K.; Laperriere N. (2007). Gliadel wafers in the treatment of malignant glioma: a systematic review, Curr Oncol. Oct, 14 (2007) 5, S. 189–194.
- [3] Teasdale, I.; Brüggemann, O. (2013). Polyphosphazenes: Multifunctional, Biodegradable Vehicles for Drug and Gene Delivery, Polymers, 5 (2013) 1, S. 161-187.
- [4] Teasdale, I.; Wilfert, S.; Nischang, I.; Brüggemann, O. (2011). Multifunctional and biodegradable polyphosphazenes for use as macromolecular anti-cancer drug carriers, Polym. Chem., 2 (2011) 4, S. 828-834.
- [5] Haag, R.; Kratz, F. (2006). Polymer Therapeutics: Concepts and Applications, Angew. Chem. Int. Ed., 45 (2006) 8, S. 1198-1215.
- [6] Wilfert, S.; Iturmendi, A.; Schoefberger, W.; Kryeziu, K.; Heffeter, P.; Berger, W.; Brüggemann, O.; Teasdale, I. (2014). Water-soluble, biocompatible polyphosphazenes with controllable and pH-promoted degradation behavior, J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem, 52 (2014) 2, S. 287-294.

# Polymere in der Medizin

## Arbeitsauftrag 1

Identifizieren Sie in den Abbildungen Gegenstände aus Kunststoff, die der Heilung von Wunden, dem Ausgleich von Fehlfunktionen des menschlichen Körpers, dem Ersatz von zerstörtem Gewebe dienen, und benennen Sie diese! Nennen Sie weitere medizinische Hilfsmittel aus Kunststoff!



## Arbeitsauftrag 2

- Zählen Sie Eigenschaften auf, die ein Material besitzen muss, das im Körper auf Dauer verbleiben soll!
- Zählen Sie Eigenschaften auf, die ein Material besitzen muss, das nur kurzfristig im Körper eine Funktion übernehmen soll, wie eine künstliche Naht (ohne dass diese Naht durch einen weiteren Eingriff entfernt wird).
- Vergleichen Sie die Eigenschaften! Suchen Sie gemeinsame Eigenschaften und unterschiedliche Eigenschaften von Materialien für diese beiden Anwendungsgebiete!

# Phosphatnachweis mit Ammoniummolybdat

## Sicherheit



Die schwefelsaure Ammoniummolybdat-Lösung ist ätzend, Schutzbrille tragen!

## Geräte

5 Stück 100 mL Kolben, 10 mL Pipette, 5 mL Pipette, 1 mL Pipette, eventuell: Photometer

## Chemikalien

Angesäuerte Ammoniummolybdat Lösung (Achtung, ätzend!)

Hergestellt von der Lehrperson oder fertig gekauft: 25 g  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  in 175 mL destilliertem Wasser lösen; 280 mL konzentrierte Schwefelsäure langsam zu 400 mL destilliertem Wasser zugeben, wird heiß! Abkühlen lassen; beide Lösungen mischen, auf 1 L verdünnen

Phosphatlösungen als Standards

Kaliumdihydrogenphosphat-Lösung 0,01 g/L, 0,075 g/L, 0,050 g/L, 0,025 g/L bezogen auf P

<b>Ammoniummolybdat</b> $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$		Achtung!	H: 315-319-335 Verursacht schwere Augenreizung
<b>Schwefelsäure konz.</b>		Gefahr!	H: 314-290 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.
<b>Ascorbinsäure</b>			
<b>Kaliumdihydrogenphosphat</b>			

Phosphat(V)-Ionen reagieren mit Ammoniummolybdat zu einem farbigen Komplex. Die Reaktion wird in einer sauren Lösung mit einem Überschuss an Ascorbinsäure durchgeführt. Die Reaktion kann entweder quantitativ mit Hilfe eines Photometers (bei 650 nm) oder halbquantitativ durch den optischen Farbvergleich ausgewertet werden.

## Durchführung

Der Nachweis sollte zuerst mit den vier Standards und danach mit der unbekanntem Probe durchgeführt werden.

5 mL der Phosphatlösung bzw. der Probe werden in einem 100 mL Kolben mit 10 mL destilliertem Wasser und 1 mL Ammoniummolybdat Lösung vermischt. Eine Spatelspitze Ascorbinsäure wird zugefügt. Die Mischung wird vorsichtig erhitzt und zum Sieden gebracht, die Lösung sollte sich bei der Anwesenheit von Phosphat blau verfärben. Abkühlen lassen.

Die Farbtiefe/Absorption der unbekanntem Probe wird mit den Standards verglichen. Dazu entweder in Küvetten füllen und die Absorption bei 650 nm messen (wenn ein Photometer zur Verfügung steht) oder in Mikrotiterplatten jeweils 1 mL der blauen Lösungen einfüllen und die Farben vergleichen.

# Einsatz von Polymeren in der Krebstherapie

INFOTEXT: Vor kurzem wurde gezeigt, dass sich Polyphosphazene sehr gut für die gezielte Freisetzung von Chemotherapeutika eignen (Teasdale et al., 2011). Ähnlich wie im Magen-Darm-Trakt (Blut pH 7,4, im Magen pH 1-2 und im Darm pH 8) ändert sich der pH-Wert auch auf dem Weg vom Blutkreislauf bis in die Tumorzellen, wo ein niedriger pH-Wert herrscht (Haag & Kratz, 2006). Die Polyphosphazene wurden so hergestellt, dass sie bei niedrigerem pH-Wert schneller abbauen (Wilfert et al., 2014). Dadurch wird der Wirkstoff nicht schon im Blut, sondern erst beim Tumor freigesetzt (Haag & Kratz, 2006). Die Hydrolyse am Phosphoratom führt zu Phosphat. Phosphat kann man sehr leicht nachweisen. Daher lässt sich die Abbaureate durch den Anstieg des Phosphatgehalts bestimmen.

Die folgende Abbildung ist aus einer Studie über die Abbaubarkeit von Polyphosphazenen entnommen (Wilfert et al., 2014).

## Arbeitsauftrag

Interpretieren Sie das folgende Diagramm im Hinblick auf die Eignung von Polyphosphazenen als Wirkstofftransporter in der Krebstherapie!

Nutzen Sie die unten stehenden Fragen als Hilfe, wenn Sie in einem ersten Schritt keinen Zugang zur Abbildung finden!

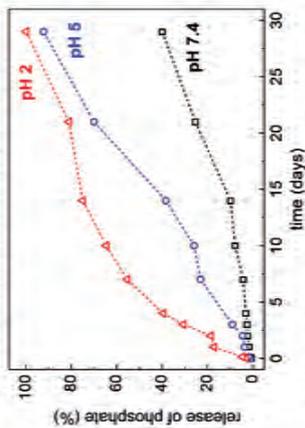


Abbildung: Freisetzung von anorganischem Phosphat bei der Hydrolyse von Polyphosphazenen in wässriger Lösung bei pH 2, pH 5 und pH 7,4, mit UV-Vis Spektroskopie detektiert (Wilfert et al., 2014)

1. Welche Größe ist auf der waagrechten Achse aufgetragen?
2. Welche Größe ist auf der senkrechten Achse aufgetragen?
3. Weshalb kann man aus der Darstellung herauslesen, dass das Polyphosphazen bei pH 2 schneller abgebaut wird als bei pH 7,4?
4. Was bedeutet das Ergebnis für den Einsatz von Polyphosphazenen als Wirkstoff-Transporter in der Krebstherapie?

## Literatur

- Teasdale, I.; Wilfert, S.; Nischang, I.; Bruggemann, O. (2011). Multifunctional and biodegradable polyphosphazenes for use as macromolecular anti-cancer drug carriers, *Polym. Chem.*, 2 (2011) 4, S. 828-834.
- Haag, R.; Kratz, F. (2006). *Polymer Therapeutics: Concepts and Applications*, Angew. Chem. Int. Ed., 45 (2006) 8, S. 1198-1215.
- Wilfert, S.; Iturmendi, A.; Schoeberger, W.; Kryeziu, K.; Heffner, P.; Berger, W.; Bruggemann, O.; Teasdale, I. (2014). Water-soluble, biocompatible polyphosphazenes with controllable and pH-promoted degradation behavior, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* 52 (2014) 2, S. 287-294.

# Polyestersynthese

## Sicherheit



Citronensäure ist ätzend, Schutzbrille tragen!

## Geräte

Reagenzgläser, Spatel, Pipette, Reagenzglasständer, Holzstab, Brenner, Waage, Lineal

## Chemikalien

<b>Citronensäure</b> 2-Hydroxypropan-1,2,3-tricarbonsäure		H-Sätze H319 Verursacht schwere Augenreizung
Glycerin Propan-1,2,3-triol		H: 314-290 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

## Durchführung

Aus Citronensäure und Glycerin kann ein Polyester hergestellt werden. Die Vorgehensweise dabei ist einfach: Citronensäure und Glycerin werden in einem trockenen Reagenzglas mit einem Holzspieß gemischt und über einer Brennerflamme erhitzt.



Füllen Sie ein Reagenzglas wie in der Abbildung mit Citronensäure. Geben Sie vorsichtig (klebt an der Wand!) einen Tropfen Glycerin dazu. Nehmen Sie eine Holzklammer als Halter und erhitzen Sie die Mischung über dem Brenner. Rühren Sie mit dem Holzstab dabei um! Die Mischung wird über dem Brenner erhitzt, bis die Stoffe schmelzen und zu einem zähen Produkt reagieren.

## Beobachtung

Beschreiben Sie genau, was Sie im Verlauf der Reaktion beobachten!

## Interpretation

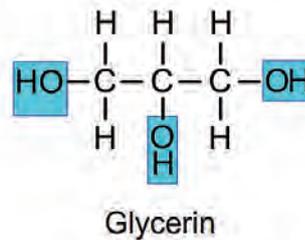
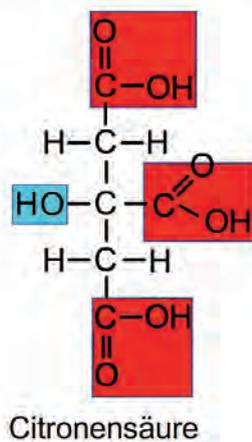
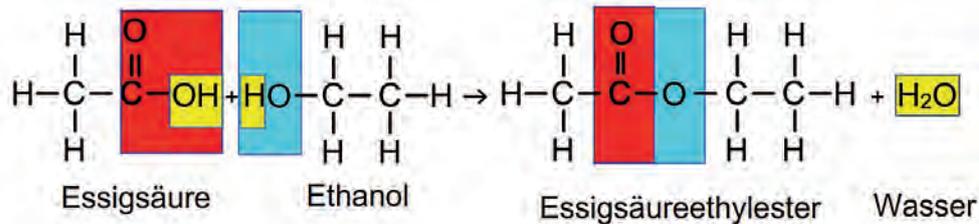
Erklären Sie die Beobachtungen durch Vorgänge auf der Ebene der Moleküle und Atome!

## Weiterführende Versuche

Formulieren Sie weitere Fragestellungen, denen Sie nachgehen könnten!

# Hilfekarte zur Interpretation

In der Abbildung wird die Bildung eines Esters aus Essigsäure und Ethanol dargestellt. Darunter sehen Sie vereinfachte Formeln von Citronensäure und von Glycerin. Die Alkoholgruppen sind blau, die Carbonsäuregruppen sind rot eingezeichnet.



## Arbeitsauftrag

- 1) Erläutern Sie, weshalb sich aus Glycerin und Citronensäure ein Polyester bilden kann!
- 2) Skizzieren Sie auf einem leeren A4-Blatt einen möglichen Ausschnitt aus einem Polyestermolekül, das sich bei der Reaktion von Citronensäure- mit Glycerinmolekülen bilden könnte! Verbinden Sie dazu mindestens vier Ausgangsmoleküle!

## Hilfekarte für mögliche weitere Fragestellungen

- Wie beeinflusst das Verhältnis der beiden Ausgangsstoffe die Eigenschaften des Endprodukts?
- Durch welche Bedingungen (Temperatur, Dauer des Erhitzens usw.) kann man die Reaktion beeinflussen?
- Welche Eigenschaften hat der gebildete Polyester?
- Kann man Glycerin durch Ethylenglycol (Ethan-1,2-diol) oder andere Alkohole ersetzen?

# Riesengroße Moleküle

Gerhard Kern

Die Bezeichnung *makromolekulare Stoffe* umfasst sowohl biogene Substanzen wie etwa Stärke, Cellulose oder Proteine als auch anthropogene wie die üblicherweise als Kunststoffe bezeichneten Materialien. Als dritte Gruppe kommen Produkte hinzu, die aus modifizierten Naturstoffen hergestellt werden wie etwa Celluloseacetate. Die letztgenannte Gruppe stellt ein gutes Beispiel dafür dar, was ChemikerInnen tun: Sie untersuchen die Eigenschaften verfügbarer Stoffe, erklären diese Eigenschaften mit Hilfe von Modellen für die Strukturen der entsprechenden Moleküle und verändern deren Strukturen auf Basis theoretischer Überlegungen so, dass die auf diese Weise neu geschaffenen Substanzen gewünschte Eigenschaften aufweisen, die die Ausgangsstoffe nicht oder in unzureichendem Ausmaß hatten. In diesem Beitrag soll es in erster Linie um Kunststoffe auf Erdölbasis und ihrer Verankerung in den Lehrplänen gehen. Als Beispiele dienen die Lehrpläne der allgemeinbildenden höheren Schulen, die jedoch in wesentlichen Punkten eng mit denen für die Hauptschulen/Neue Mittelschulen und berufsbildenden höheren Schulen korrelieren.

## Makromolekulare Stoffe im Chemielehrplan der Sekundarstufe I [1]

Im Bereich Bildungs- und Lehraufgabe findet sich folgende Formulierung:

*Der Chemieunterricht dient einerseits dazu, die Schülerinnen und Schüler mit dem Wissen und den Grundfähigkeiten zur Bewältigung stofflicher Alltags-, Freizeit-, Lebens- und Berufsphänomene auszustatten, und hat andererseits die Aufgabe, die gesellschaftliche Erziehung im Bereich von Natur und Materie vorzunehmen.*

Mit welchen stofflichen Alltags-, Freizeit-, Lebens- und Berufsphänomenen sind denn 13-/14-Jährige konfrontiert, und welches Wissen über Kunststoffe und welche Einstellungen gegenüber diesen Materialien sollten sie in ihr Erwachsenenleben mitnehmen?

Spielsachen, Klebstoffe, Sportgeräte, Sportbekleidung samt Sportschuhen, Schulsachen und die Windeln des Geschwisterchens, PET-Flaschen, Handy- und Computergehäuse sowie Verpackungsmaterialien jeglicher Art sind die häufigsten alltäglichen Begleiter auch von Jugendlichen. Die alltäglichen Gebrauchs- und Bedarfsgegenstände aus Kunststoff sind auf die intendierte Verwendung abgestimmt, so dass man sich nur an die Angaben des Herstellers, z. B. bezüglich Reinigung, zu halten braucht. Für den kreativen, sprich zweckfremden, Einsatz dieser Artikel kann zusätzliches chemisches Wissen durchaus nützlich sein. Es liefert auch die Hintergründe für etwaige Warnungen.

## Einige Beispiele

- Die Bezeichnung *Alleskleber* verleitet zur Vorstellung, man könne damit alles mit allem verkleben, was oft auch zutrifft. Für Gegenstände aus Polystyrol beispielsweise gilt das aber dann nicht, wenn im verwendeten Alleskleber Fruchtester und/oder Aceton als Lösungsmittel enthalten sind, in denen sich nicht nur der eigentliche Klebstoff, z. B. Polyvinylacetat, sondern auch Polystyrol löst. Welche Kunststoffe gegen welche Lösungsmittel empfindlich sind, lässt sich mit einfachen Schülerübungen feststellen. (Hersteller von Kunststoffartikeln drucken häufig in ihren Katalogen entsprechende Tabellen ab [2] oder stellen die Informationen im Internet zur Verfügung [3]). Lösungsmittel sind nicht nur in Klebstoffen, sondern auch in Lacken enthalten. Dabei kommen meist Mischungen aus Kohlenwasserstoffen, Alkoholen, Ethern und Estern zum Einsatz, was beim Bemalen von Kunststoffgegenständen oder dem Umfüllen von Lacken in Kunststoffbecher durchaus zu Überraschungen führen kann. Beispielsweise können Cyclohexan, Xylol, Isobutanol, Butylglycol, Ethylacetat und Aceton als Einzelbestandteile in Lacken enthalten sein [4]. Darüber hinaus wird man neben Spiritus, Benzin und Aceton wohl kaum andere Lösungsmittel in Haushalten finden. Dem Hinweis, man möge zum Säubern von Kunststoffflächen nur feuchte Tücher oder Seifenwasser verwenden, liegt die Löslichkeit oder Quellbarkeit von Kunststoffen in organischen Lösungsmitteln zu Grunde.

Was über die Schulzeit hinaus bleiben sollte, ist die Vorsicht im Umgang mit Kunststoffen. Neben dem Verhalten gegenüber Lösungsmitteln ist auch zu beachten, dass manche von ihnen temperaturempfindlich sind oder spröde und damit zerbrechlich, sich elektrostatisch aufladen können und bei Reinigungsversuchen leicht zerkratzen.

- Kleidungsstücke aus Kunstfasern dürfen nur bei niedrigen Temperaturen gewaschen werden, weil die Fasern bei höheren schmelzen.
- Kunststoffabfälle in Form von Verpackung und Getränkeflaschen sind nahezu unvermeidlich. Die sparsame Verwendung und ordnungsgemäße Entsorgung berührt die Zielformulierung *gesellschaftliche Erziehung im Bereich von Natur und Materie* des Lehrplans. Im Abschnitt *Lehrstoff* wird *Wissen um den Stellenwert von Altstoffen und deren Entsorgung oder Wiederverwertung* gefordert. Richtige Entsorgung von Verpackungs- und anderen Kunststoffen und das Sammeln von Getränkeflaschen ist von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich. Die Betriebe der Abfallwirtschaft (siehe dazu auch die Homepage

der Altstoffrecycling Austria AG [5]) bieten häufig Vorträge und Workshops für Schulen an und geben auf ihren Homepages oder telefonisch Auskunft, wo und wie welche Art von Abfall entsorgt werden kann. Während z. B. in Wien Getränkeflaschen (PET) getrennt gesammelt werden und alle anderen Kunststoffe in den Restmüll kommen und mit diesem verbrannt werden, sammelt man im Burgenland Verpackungsmaterialien unabhängig von ihrer stofflichen Beschaffenheit (gelber Sack, gelbe Tonne) und wirft sonstigen Kunststoffmüll in die Restmülltonne. Kunststoffabfälle werden sowohl stofflich als auch energetisch verwertet, wobei einem Kilogramm Kunststoff der Heizwert von einem Liter Öl entspricht [6, S. 10].

Des Weiteren findet man bei den *Bildungs- und Lehraufgaben* des Lehrplans *Erfassung der Zusammenhänge zwischen Mikrokosmos und alltäglichem Erfahrungsbereich* sowie *Erwerb von Basiswissen über [...] einfachste Struktur-Wirkungsbeziehungen*, was bei näherer Betrachtung auf dasselbe hinausläuft, nämlich auf die Erklärung von makroskopischen Phänomenen, Stoffeigenschaften zum Beispiel, durch Art und Anordnung von Teilchen und deren Wechselwirkungen untereinander. Auf dem Niveau der Unterstufe und dem verfügbaren Zeitkontingent wird man sich wohl darauf beschränken müssen, thermoplastische, elastische und duroplastische Eigenschaften von Kunststoffen auf das Vorliegen von linearen unvernetzten Molekülen bzw. zweidimensional vernetzten bzw. dreidimensional vernetzten zurückzuführen, siehe Abbildungen 1a - c.

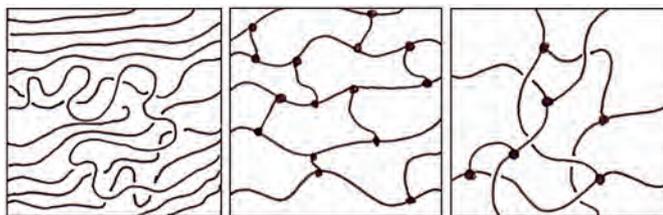


Abb. 1a: Thermoplast<sup>1</sup>    Abb. 1b: Elastomer    Abb. 1c: Duroplast

Im Abschnitt *Lehrstoff* findet man die folgenden Bezüge zu Kunststoffen:

Wissen um die Bedeutung, Gewinnung und Verarbeitung fossiler Rohstoffe.

Auf dem Weg vom Rohöl zum Plastiksackerl lässt sich an vielen interessanten Stationen anhalten, etwa bei der großtechnischen Anwendung der Destillation zur Auftrennung von Erdöl in verschiedene Fraktionen. Warum haben die einzelnen Fraktionen unterschiedliche Siedebereiche? Ein Blick auf die Moleküle gibt die Antwort. Was unterscheidet gutes Benzin, also kloppfestes, von schlechtem? Lässt man mit den üblichen Molekülbaukästen Modelle unverzweigter Alkane bauen, so finden SchülerInnen sehr schnell einen Weg, aus einem unverzweigten ein verzweigtes Alkan durch Isomerisierung zu machen: Sie trennen Teile des Molekülmodells ab und setzen die Teile nach Wunsch neu zu einer verzweigten Struktur zusammen. Fehlt nur noch die Information durch die Lehrperson, wie man die realen Moleküle dazu bringt, zu isomerisieren.

<sup>1</sup> Alle Abbildungen in diesem Artikel wurden vom Autor angefertigt.

Veränderte Bedingungen beim Raffinieren von Erdölfraktionen führen zu anderen Produkten, etwa ungesättigten Kohlenwasserstoffen, die man unter geeigneten Bedingungen polymerisieren kann. Die Vorgänge bei der Polymerisation können mit Molekülmodellen dargestellt werden. Der Wechsel zwischen der Teilchenebene und der phänomenologischen Ebene wird an dieser Stelle (erneut) thematisiert: Wir finden die Erklärungen für makroskopische Eigenschaften von Stoffen auf der Teilchenebene, lösen auf der Teilchenebene das Problem, die eine Teilchensorte in die andere umzuwandeln und übertragen die Lösung in den makroskopischen Bereich.

## Makromolekulare Stoffe im Chemielehrplan der AHS Oberstufe [7]

Mit dem im ersten Satz des Lehrplans angesprochenen *Zwiedenken* meint H.-R. Christen [8] die Notwendigkeit, Erklärungen für makroskopische Phänomene, also etwa Eigenschaften und Reaktionsvermögen von Substanzen, auf der Ebene der Teilchen zu erklären. Die im Zuge der Entwicklung von *Chemie im Kontext* formulierten *Basiskonzepte* (siehe z.B. [9]) sind auch in den derzeit gültigen AHS-Oberstufenlehrplan eingeflossen.

Wenn es um Kunststoffe geht, werden wohl am ehesten das Stoff-Teilchen-Konzept und das Struktur-Eigenschafts-Konzept angesprochen werden, d. h. einerseits die Ebene der Substanzen von der Ebene der Teilchen konsequent zu trennen und andererseits makroskopische Stoffeigenschaften durch die Struktur und Anordnung der entsprechenden Teilchen zu erklären.

Makroskopische Eigenschaften von Kunststoffen auf die Struktur ihrer Moleküle zurückzuführen, erweist sich als deutlich schwieriger als das bei niedermolekularen Substanzen der Fall ist. Welche Parameter bei hochmolekularen Substanzen deren Eigenschaften beeinflussen, sei in den folgenden Punkten skizziert. Scheinbar versagt das Struktur-Eigenschafts-Konzept bei Polymeren. Man kann aber gerade diese Situation benutzen, um die Grenzen einfacher Modelle, z. B. *Gleiches löst Gleiches* aufzuzeigen und mit der Berücksichtigung zusätzlicher Information(en) das auf Grund vereinfachender Annahmen überraschende Verhalten der Stoffe dennoch zu erklären. Die folgend aufgelisteten Bedingungen beeinflussen u. a. die Stoffeigenschaften von makromolekularen Stoffen:

- 1) Hochmolekulare Substanzen haben keine einheitliche Molekülgröße, sondern nur ein mehr oder weniger einheitliches Bauprinzip. Sie bestehen aus Molekülen unterschiedlicher Kettenlänge, deren durchschnittliche Molmasse sich experimentell bestimmen lässt. Unter dem Polymerisationsgrad versteht man die Anzahl der Monomer-Einheiten. Da Polymere also keine Reinstoffe aus gleichen Molekülen sind, sondern Gemenge, haben sie keine definierten Schmelzpunkte, sondern Schmelzbereiche.

2) **Taktizität** bezeichnet die Erscheinung, dass in Polymeren asymmetrisch substituierter Ethenderivate die Seitenketten im Polymer unterschiedlich angeordnet sein können. Neben isotaktischen Polymeren (alle Seitenketten auf derselben Seite der Hauptkette) und syndiotaktischen (Seitenketten abwechselnd auf der einen oder der anderen Seite) existieren auch ataktische Formen (Seitenketten unregelmäßig angeordnet). Die Taktizität beeinflusst die Kristallisationsfähigkeit von Polymeren (siehe unten).

3) „Polymere sind in aller Regel teilkristallin“ [10, S. 295], d. h. im Feststoff gibt es sowohl ungeordnete Bereiche als auch geordnete Kristallite, in denen die Moleküle oder Molekülteile entweder parallel angeordnet sind oder lamellenartig gefaltet (Abb. 2, nach [11, S. 1002f.]). Größe, Anzahl und Orientierung der Kristallite beeinflussen die physikalischen Eigenschaften des Polymers.



Abb. 2: Teilkristalline und amorphe Bereiche in einem festen Polymer

Zumindest teilweise kristallisationsfähig sind

- regelmäßig aufgebaute Polymere mit linearen Ketten wie Homopolymere, alternierende Copolymere und Blockcopolymere
- stereoreguläre (isotaktische und syndiotaktische) Polymere kristallisieren, ataktische dagegen nicht,)
- Polymere mit intermolekularen Wechselwirkungen, wie z. B. Wasserstoff-Brücken.

Nicht kristallisationsfähig sind

- vernetzte und verzweigte Polymere
- ataktische Polymere (außer wenn die Substituenten sehr klein sind, wie beispielsweise bei Polyvinylfluorid und Polyvinylalkohol (Kovalenzradius von C: 77 pm, O: 66 pm, F: 64 pm))
- statistische Copolymere [10, S. 295f.]

Die Kristallinität hängt von den Erstarrungsbedingungen ab. Schnelles Abkühlen führt zu amorphen Produkten, langsames zu solchen mit höherer Kristallinität.

4) Konformation im festen Zustand: „Polymere Moleküle kristallisieren in Zickzack- oder Helixkonformation“ [10, S. 298], je nachdem, welche der beiden Formen die größere freie Enthalpie ermöglicht. Polyethylen und Polyamide

weisen in den kristallinen Bereichen Zickzackstruktur auf. In Helices kristallisieren beispielsweise isotaktisches Polypropylen (Abb. 3) und isotaktisches Polystyrol. Fluoratome sind mit 64 pm deutlich größer als Wasserstoffatome (30 pm), daher kristallisiert Polytetrafluorethen nicht in Zickzack-Ketten wie Polyethylen, sondern aus sterischen Gründen in Helices (Abb. 4).

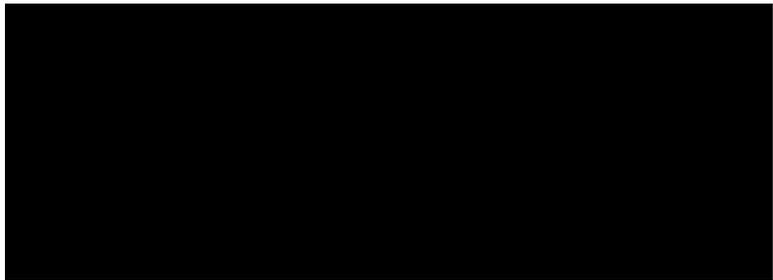
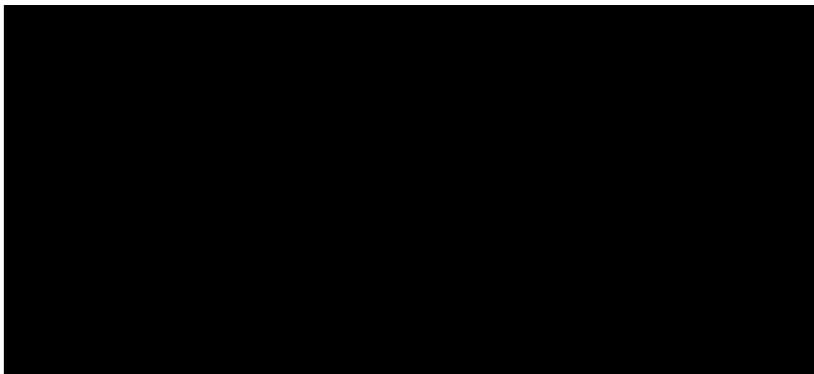


Abb. 3: Isotaktisches Polypropylen. Die Kohlenstoffatome der Methylgruppen sind mit gelben Kugeln dargestellt, um die Übersichtlichkeit zu verbessern und die helikale Struktur zu verdeutlichen: Jede der Methylgruppen ist um 120° gegen die vorangegangene versetzt [12, S. 40], [10, S. 299].



Kette schraubenartig gewunden [13, S. 439].

Zwei Beispiele sollen die Problematik der Vorhersagbarkeit makroskopischen Verhaltens durch eine einzige Moleküleigenschaft illustrieren. Während das erste Beispiel mit wenigen vertrauten Annahmen auskommt, zeigt das zweite schon deutlich die oben erwähnten Grenzen.

### Beispiel 1

Die Wasserlöslichkeit von Polyvinylalkohol (PVAL) ist durch die Hydroxylgruppen im Molekül gut erklärbar (Abbildung 5; tatsächlich ist der PVAL ataktisch).

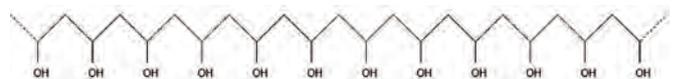


Abb. 5: Formelausschnitt aus Polyvinylalkohol

Da es durch Polymerisation nicht direkt gewonnen werden kann, hydrolysiert man Polyvinylacetat (PVAC), das durch radikalische Polymerisation von Vinylacetat hergestellt wird und in dem jede OH-Gruppe (siehe Abb. 5) mit Essigsäure verestert ist. Polyvinylacetat ist nicht wasserlöslich, die niedermolekulare Ester auch kaum. Daher ist die Eigenschaft des Polymers nicht weiter verwunderlich. Ebenfalls

leicht einzusehen ist, dass bei nur partieller Hydrolyse von PVAC die Wasserlöslichkeit mit zunehmendem Hydrolysegrad steigt. [14], [15].

## Beispiel 2

Thermoplaste und Fasern sind meist in irgendeinem Lösungsmittel löslich, weil unvernetzt. Duroplaste, die aus vernetzten Molekülen bestehen, lösen sich nicht. Elastomere als „Zwischenstufe“ lösen sich nicht, sind aber quellbar. Die üblicherweise geltende Faustregel „Gleiches löst Gleiches“ gilt nur eingeschränkt [13, S. 649]. Beispielsweise ist ataktisches Polypropylen in siedendem Heptan löslich, isotaktisches nicht [16]. Aufgrund der helikalen Struktur sind die Van-der-Waals-Kräfte zwischen den isotaktischen PP-Ketten stärker. Im ataktischen PP überwiegen die amorphen Bereiche. Für Polytetrafluorethen ist kein Lösungsmittel bekannt, obwohl die Moleküle unvernetzt sind [13, S. 649].

## Literatur

- [1] Lehrplan Chemie für Hauptschulen, NMS und AHS Unterstufe wortidentisch: [https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/hs11\\_875.pdf?4dzgm2](https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/hs11_875.pdf?4dzgm2) [Dez. 2015]
- [2] Artikel aus Kunststoff (2015). Katalog der Firma Semadeni AG, Kürschnergasse 6, 1210 Wien, 437-59.
- [3] [https://www.buerkle.de/media/files/Downloads/Liste\\_chemische\\_Bestaendigkeiten\\_DE\\_2015.pdf](https://www.buerkle.de/media/files/Downloads/Liste_chemische_Bestaendigkeiten_DE_2015.pdf) [Dez. 2015]
- [4] <https://de.wikipedia.org/wiki/Lack> [Dez. 2015]
- [5] Altstoffrecycling Austria AG <http://www.ara.at/> [Dez. 2015]
- [6] ARA (Hrsg.)(2014). Kunststoffreport 2014. Altstoff Recycling Austria AG, Mariahilfer Straße 123, 1062 Wien. [http://www.ara.at/uploads/tx\\_wxfilelist/ARA\\_Kunststoffreport2014\\_end.pdf](http://www.ara.at/uploads/tx_wxfilelist/ARA_Kunststoffreport2014_end.pdf) [Dez. 2015]
- [7] [https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp\\_neu\\_ahs\\_09\\_11861.pdf?4dzgm2](https://www.bmbf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_neu_ahs_09_11861.pdf?4dzgm2) [Dez. 2015]
- [8] Christen, H. R. (1990): Chemieunterricht – Eine praxisorientierte Didaktik. Basel: Birkhäuser, S 2 (zitiert nach Anton, M. A. (2008). Kompendium Chemiedidaktik. Bad Heilbrunn: Klinkhardt, S. 20)
- [9] Demuth, R., Ralle, B. & Parchmann, I. (2005). Basiskonzepte – eine Herausforderung an den Chemieunterricht. Chemkon 12/2, 55-60.
- [10] Tieke, B. (2014). Makromolekulare Chemie. Weinheim: Wiley-VCH.
- [11] Christen, H.-R. (1982). Grundlagen der Organischen Chemie. Studienausgabe Teilband 2. Frankfurt am Main: Salle + Sauerländer.
- [12] Natta, G. (1963). From the stereospecific polymerization to the asymmetric autocatalytic synthesis of macromolecules. Nobelvortrag 12. Dez. 1963. [http://www.nobel-prize.org/nobel\\_prizes/chemistry/laureates/1963/natta-lecture.pdf](http://www.nobel-prize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1963/natta-lecture.pdf) [Dez. 2015]
- [13] Lechner, M. D., Gehrke, K. & Nordmeier, E. H. (2014). Makromolekulare Chemie. Berlin: Springer Spektrum.
- [14] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylalkohol> [Dez. 2015]
- [15] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polyvinylacetat> [Dez. 2015]
- [16] <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen> [Dez. 2015]

# Green Materials – Nanocellulose

Andreas Mautner

Die Verwendung nachhaltiger Materialien, z. B. auf Basis von Cellulose, ist ein wesentlicher Beitrag zur Erhaltung des Lebensraums Erde für nachkommende Generationen. Dabei stehen sowohl der Einsatz erneuerbarer Rohstoffe und damit reduzierter Einsatz fossiler Rohstoffe wie auch die biologische Abbaubarkeit eingesetzter Produkte zur Abfallreduktion im Vordergrund. Beispielsweise ist der Einsatz von Stärke oder Polylactiden (Polymilchsäure) bei der Produktion von Kunststofffolien – als „Plastiksackerl“ – bereits weit verbreitet und als Beitrag zum Umweltschutz auch vom Kunden gewürdigt bzw. in der Werbung angepriesen. Neben dieser weitverbreiteten Anwendung im Alltagsgebrauch stehen auch und vor allem die Einsatzmöglichkeiten als Hochleistungswerkstoffe auf der Forschungsagenda. Alternativen zu Werkstoffverbunden auf Basis von Kohlenstoff (Carbon-) oder Glasfasern gelangen hierbei in den Fokus, da nicht nur Herstellung sondern auch Wiederverwertung von Faser-Verbundwerkstoffen, sowohl von energetischer Seite als auch in technologischer Hinsicht, große Herausforderungen darstellen. Daneben ist auch die Anwendung als Alternative zu Keramiken oder Hochleistungs-Polymeren als Filtrationsmembranen – Stichwort Nanofiltration oder Umkehrosmose zur Reinigung von Trinkwasser – ein potentielles Einsatzgebiet ressourcenschonender Materialien.

## **(Nano-)Cellulose – von Natur aus mit großartigen Eigenschaften ausgestattet**

Cellulose, als einer der drei Hauptbestandteile pflanzlicher Strukturen neben Lignin und Hemi-Cellulosen, ist ein Polysaccharid-Makromolekül, das aus Glucose-Molekülen, einem Monosaccharid, aufgebaut ist. Diese Makromoleküle

bilden eine Helix, die in weiterer Folge Elementarfibrillen und schlussendlich Mikrofibrillen formen, aus denen schließlich die Zellwände von Pflanzen bestehen. Während Holz als ältester eingesetzter Roh- und Verbundwerkstoff des Menschen gilt und zugleich immer noch dank hervorragender Eigenschaften geschätzt ist, kamen in den letzten zwei Jahrzehnten auch Cellulosefibrillen im Kleinmaßstab an sich, losgelöst von Lignin und Hemi-Cellulosen, in den Brennpunkt der Wissenschaft. Nanocellulosefibrillen weisen Festigkeiten und Steifigkeiten auf, die jenen von Glasfasern überlegen sind, und deshalb als deren potentiell Ersatzmaterial in Verbundwerkstoffen in den Fokus der Materialwissenschaft und -forschung gelangt sind [1].

Die Herstellung dieser Nanocellulosefibrillen kann auf grundsätzlich zwei verschiedene Arten erfolgen. Einerseits kann ausgehend von pflanzlichen Rohstoffen beim sogenannten Top-Down-Prozess die Nanocellulose extrahiert und auf Nanomaßstäbe heruntergebrochen werden. Dies geschieht in sogenannten Mass-Colloidern oder Hochdruck-Homogenisatoren, in welchen durch hohe Scherkräfte Nanofibrillen aus Mikrofibrillen gewonnen werden. Für diesen Prozess ist jedoch ein hoher Energieeinsatz zu veranschlagen. Durch unterschiedliche Vorbehandlungen, beispielsweise durch Einsatz von Enzymen oder Chemikalien, kann der Energieeintrag jedoch deutlich reduziert werden. Fibrillendurchmesser bis zu 2 nm sind hierbei möglich, wobei die Fibrillenlänge einige Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) beträgt [1]. Andererseits kann Nanocellulose auch von Bakterien im sogenannten Bottom-up Prozess erzeugt werden. Bakterien, beispielsweise vom Stamme *Acetobacter Xylinum*, sind im Stande, aus dem in Nährmedien enthaltenen Zucker Cellulose-Makromoleküle aufzubauen und diese als Schutzüberzug und

Abb. 1: Struktur von (Nano-)Cellulose (© Andreas Mautner, Universität Wien)

Nährstoffbunker einzusetzen. Dieser Schutzfilm besteht aus hochreiner Nanocellulose mit einem Anteil an kristallinen Strukturen von bis zu 90 % und Fibrillendurchmessern von 10 bis 100 nm bei einer Länge von einigen Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) [2].

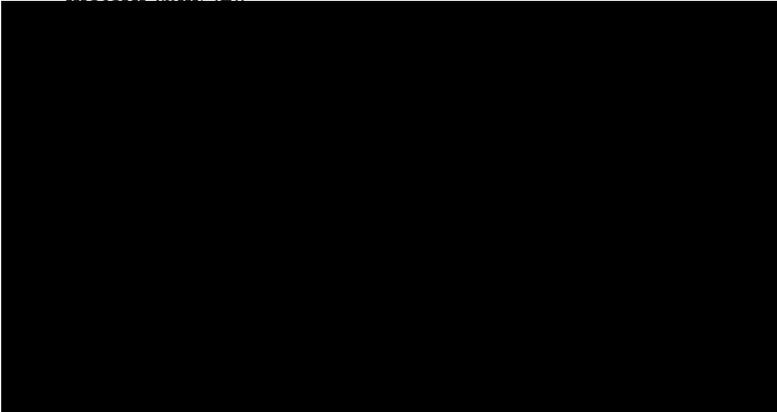


Abb. 2: Nanocellulose aus Bakterienkultur (© Andreas Mautner, Universität Wien)

## Nanocellulose aus landwirtschaftlichen und industriellen Abfällen

Anders als bei Stärke, welche aus  $\alpha$ -verknüpften Glucose-Bausteinen besteht, sind in Cellulose die Glucosegruppen  $\beta$ -verknüpft. Dieser relativ kleine geometrische Unterschied hat jedoch weitreichende Konsequenzen hinsichtlich der Anwendbarkeit, da  $\beta$ -verknüpfte Glucose vom menschlichen Verdauungstrakt nicht aufgespalten werden kann. Dies trifft jedoch nicht auf den Verdauungstrakt, beispielsweise von Wiederkäuern, zu. Während in menschlichen Exkrementen Cellulose mehr oder weniger unbeschadet ihren Weg durch den Körper genommen hat, sorgen das Wiederkäuen sowie bestimmte anaerobe Mikroorganismen (Bakterien, Protozoen und Hefen) im Verdauungstrakt dieser Tiere dafür, dass Cellulosefasern in kleinere Einheiten heruntergebrochen werden und dadurch schon ein großer Anteil an Vorbereitung zur Fibrillengewinnung geschehen ist. Nach Desinfizierung und Abtrennung von Nebenbestandteilen wie Protein(rest)en, DNA u.ä. ist ein kostengünstiges Material sprichwörtlich aus Mist entstanden. Ein weniger exotisch anmutender Ausgangsstoff sind Abfallströme aus der Papier- und Zellstoffindustrie [3].

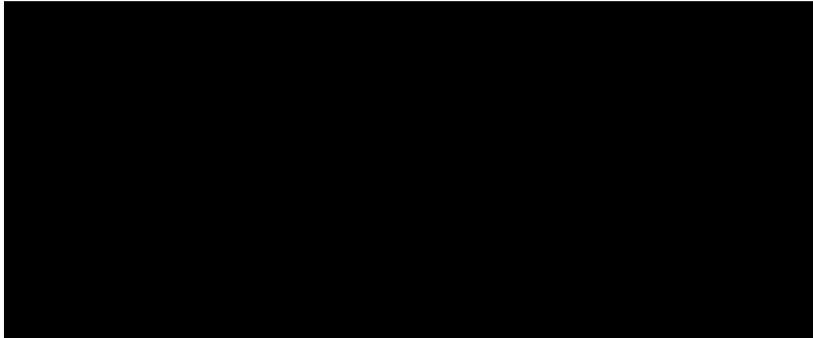
## Cellulosefilter

Cellulosefilter, beispielsweise Kaffeefilter, sind aus dem Alltag aber auch aus technologischen Anwendungen nicht mehr wegzudenken. Auf Grund ihrer pflanzlichen Herkunft und des relativ einfachen Herstellungsprozesses stellen sie eine ausgezeichnete Lösung für viele Separationsvorgänge dar. Unglücklicherweise ist der Einsatz von Cellulosefilterpapieren auf Partikelgrößen im Mikrometerbereich beschränkt. Dadurch ist es nicht möglich, Verschmutzungen im Nanometerbereich, etwa Viren oder Ionen (Schwermetalle, Nitrate), heraus zu filtern. Es besteht zwar die Möglichkeit auf Regenerat-Cellulose (Cellulose, die in geeignetem Lösungs-

mittel gelöst und anschließend in gewünschter Form ausgefällt wurde) oder Cellulose-Derivate (z. B. Cellulose-Acetat) zurückzugreifen, wobei jedoch ein beträchtlicher Energie- sowie Chemikalien-Aufwand betrieben werden muss.

## Nanopapiere

Die Anwendung des Herstellungsprinzips von Filterpapieren aus herkömmlichen Mikro-Cellulosefibrillen auf Nanofibrillen würde es ermöglichen, den Anwendungsbereich von Cellulosefiltern bis hin zum Nanometerbereich zu eröffnen. Die Herstellung sogenannter Nanopapiere basiert auf demselben Herstellungsverfahren wie jenes gewöhnlicher Papiere: Eine Suspension von Cellulosefasern/-fibrillen wird zu einem den Anforderungen entsprechenden Filterkuchen filtriert und durch Druck- sowie Temperatureinwirkung Wasser bis zum gewünschten Gehalt entfernt. Die Anwendung dieses Prozesses auf Nanocellulose-Suspensionen liefert transparente Nanopapiere. Die Transparenz ergibt sich aus dem Durchmesser der Fibrillen, die kleiner sind als die Wellenlänge sichtbaren Lichts. Die Größe der Nanofibrillen ist es auch, die die Porengröße der Papiere und damit den potentiellen Einsatzzweck (siehe unten) definiert. Porendurchmesser von 5 nm sind hierbei bereits realisiert worden, womit bereits große Moleküle (ca. 4000 Da), etwa Pharmazeutika, oder beispielsweise Viren abfiltriert werden können [4-5].



skopisches Bild (links oben) und Modell (rechts) sowie Demonstration der Transparenz von Nanocellulosepapieren (links unten) (© Andreas Mautner, Universität Wien)

## Adsorptions- und Ionentauscher-Nanopapiere

Auf Grund ihrer großen Oberfläche, bedingt durch die geringen Fibrillendurchmesser, sind Nanocellulosefibrillen prädestiniert für Adsorptionsanwendungen, da sie eine hohe Anzahl an Hydroxylgruppen auf ihrer Oberfläche aufweisen. Daneben bietet die große Oberfläche reichlich Spielraum für chemische Modifikationen und das Einbringen einer Vielzahl an funktionellen Gruppen. Damit bringt für das Entfernen von Schadstoffen, wie zum Beispiel Schwermetallionen oder Nitraten, aus Trinkwasser die Anwendung von chemisch modifizierten Nanocellulosepapieren einen großen Technologiesprung mit sich. Üblicherweise werden diese Schadstoffe durch diskontinuierlich eingesetzte Adsorptionsmedien oder Nanofiltrations- (NF) bzw. Umkehrosmosemembranen (RO) entfernt. Während bei konventionellen Adsorptionsmedien die Entsorgung sa-

turierten, also schadstoffgesättigten, Schlamm ein großes Problem darstellt, werden NF/RO Membranen aus komplizierten Polymer- oder Keramikwerkstoffen hergestellt, was einen beträchtlichen Aufwand hinsichtlich benötigter Chemikalien sowie an Energie mit sich bringt.

Die Modifizierung von Cellulose mit Ammoniumgruppen erfolgt durch Reaktion mit Glycidyltrimethylammoniumchlorid. Die eingebrachten kationischen Ammoniumgruppen interagieren mit anionischen Nitratgruppen aus kontaminiertem Wasser, wobei das Chloridgegenion gegen ein Nitration ausgetauscht wird [6].

Ist Wasser durch Schwermetallionen verschmutzt, so kann dieses durch Einsatz von phosphatisierter Cellulose gereinigt werden. Die Herstellung von phosphatisierter Nanocellulose erfolgt durch Umsatz mit Phosphorsäure unter Wasserabspaltung. Schwermetallkationen, wie beispielsweise Kupferionen reagieren mit den Phosphatgruppen, wobei Protonen abgespalten werden. Membranen aus phosphatisierter Nanocellulose können leicht regeneriert werden, indem mittels einer Säure die Kupferionen freigeschwenkt werden und durch Protonen ersetzt werden. Dabei wird wertvolles Kupfer wiedergewonnen, was zu einem wirtschaftlichen Prozess beiträgt [7].

## Verbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe aus Glas- oder Kohlenstofffasern sind mittlerweile aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken. Während an vorderster Werkstofffront, z. B. in der Luft- und Raumfahrt aber auch in der Formel 1 oder im Yachtbau, auf Grund des hervorragenden Festigkeits-Massen-Verhältnisses, Faserverbundwerkstoffe unentbehrlich geworden sind, öffnen sich auch abseits dieser High-Tech-Anwendungen Applikationen, beispielsweise in der Kraftfahrzeugindustrie. Obgleich die Vorteile dieser Materialien auf der Hand liegen, sind die Nachteile nicht auf den ersten Blick ersichtlich. Zum einen benötigt die Herstellung sowohl von Carbon- als auch von Glasfasern große Mengen an Energie, zum anderen ist die Entsorgung bzw. vor allem die Wiederverwertung dieser Materialien problematisch. Während sich gebrauchte Stahlbleche problemlos im Hochofenverfahren beimengen lassen und so neue Güter entstehen können, sieht die Sache bei Verbundwerkstoffen

anders aus. Während sich bei thermoplastischen Verbunden die Kunststoffmatrix theoretisch noch relativ einfach wiederaufschmelzen und damit von den Faserverstärkungen trennen ließe, ist dies bei Hochleistungskompositen, die üblicherweise auf Basis von Duromeren bestehen, nicht möglich. Abseits thermischer Wiederverwertung ist bislang somit kaum eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung gebrauchter Güter aus diesen Materialien möglich.

Als Alternative zu Glas- und Kohlenstofffasern kamen daher immer wieder Naturstofffasern ins Gespräch. Während eine stoffliche Wiederverwertung auch nicht ohne weiteres möglich ist, sind zumindest der Rohstoff und die Herstellung aus ökologischer Sicht weitestgehend unbedenklich. Handelt es sich bei der Matrix um einen abbaubaren Kunststoff, bspw. Polymilchsäure, so wäre auch das Abfallproblem gelöst. Verbundwerkstoffe aus abbaubaren Kunststoffen und Naturfasern haben jedoch einen gewaltigen Nachteil: Man kommt an die hervorragenden Eigenschaften von Glas- oder

Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffen noch nicht heran. Dies liegt vor allem an der zu geringen Adhäsion von (hydrophilen) Fasern an (hydrophobe) Polymere. Des Weiteren unterliegt die Qualität der Fasern größeren Schwankungen als bei synthetisch hergestellten Fasern, da Wetter- und Umwelteinflüsse sich direkt auf die Eigenschaften der Fasern auswirken. Man kann dies umgehen, indem Cellulosefasern aus Lösung gesponnen werden, was bereits praktiziert und zum Teil erfolgreich angewandt wird. Ein anderer Ansatz besteht darin, auf Nanocellulose zurückzugreifen und deren außergewöhnliche Eigenschaften auszunutzen. Unglücklicherweise haben sich auf dem Wege zu Verbundwerkstoffen mit Nanocellulose große Schwierigkeiten gezeigt. Zum einen ist die homogene Verteilung von Nanofibrillen in der Polymermatrix außerordentlich schwierig, das Problem der Hydrophilie der Fasern bleibt (trotz Modifizierung) vielfach ungelöst und die Entwicklung neuartiger Produktionsprozesse, mittels derer wässrige Suspensionen der Nanocellulosefibrillen verarbeitet werden können, steckt noch in den Kinderschuhen [8].

## Papier-Verbunde

In den Frühzeiten der Forschung an Verbundwerkstoffen war der Einsatz von Papier als Basismaterial bereits Thema. Auf Grund der einfachen Verfügbarkeit sowie der simplen Handhabung und besseren Eigenschaften von Materialien auf Basis fossiler Rohstoffe kam diese Technologie jedoch nie zum Durchbruch. Dies hat sich in den vergangenen Jahren gewandelt, als durch das Aufkommen von Nanocellulosefilmen bzw. Nanopapieren auch ein Fortschritt bei mechanischen Eigenschaften der Komposite zu erwarten war. Zudem ist das Bewusstsein gestiegen, dass alternative Werkstoffe, welche nicht auf fossilen Rohstoffen basieren, notwendig sind und gebrauchte Güter nicht auf der Müllhalde enden müssen. Präformen auf mit Nanocellulose verstärkter Naturfaserbasis waren eine der Entwicklungen, die auf dieser Ebene zu Formteilen mit sehr guten mechanischen Eigenschaften geführt haben. Wurden Nanopapiere zur Komposit-Produktion verwendet, so konnten mechanische Eigenschaften erzielt werden, die schon sehr nahe an Glasfaserverbunde heranreichen und herkömmliche Hochleistungspolymere in den Schatten stellen [9].

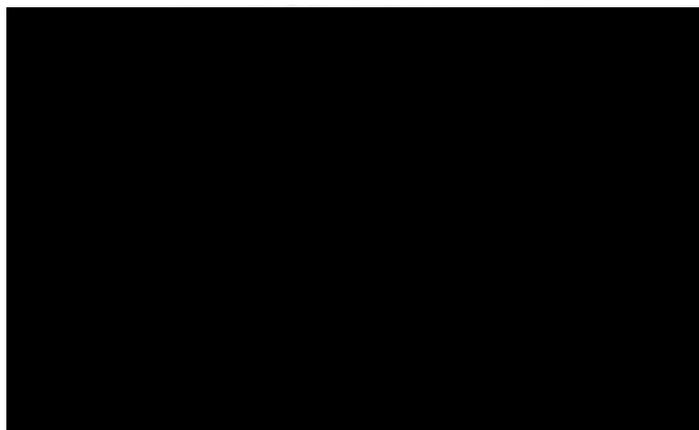


Abb. 6: Herstellung von Papier-Verbunden durch Laminierung  
(© Andreas Mautner, Universität Wien)

## Literatur

- [1] Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D. & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 5438-5466.
- [2] Lee, K.-Y., Buldum, G., Mantalaris, A. & Bismarck, A. (2014). More Than Meets the Eye in Bacterial Cellulose: Biosynthesis, Bioprocessing, and Applications in Advanced Fiber Composites. *Macromol. Biosci.*, 14, 10-32.
- [3] Jonoobi, M., Mathew & A.P., Oksman, K. (2012). Producing low-cost cellulose nanofiber from sludge as new source of raw materials. *Ind. Crop. Prod.*, 40, 232-238.
- [4] Mautner, A., Lee, K.Y., Lahtinen, P., Hakalahti, M., Tammelin, T., Li, K. & Bismarck, A. (2014). Nanopapers for organic solvent nanofiltration. *Chem. Commun.*, 50, 5778-5781.
- [5] Mautner, A., Lee, K.-Y., Tammelin, T., Mathew, A.P., Nedoma, A.J., Li, K. & Bismarck, A. (2015). Cellulose nanopapers as tight aqueous ultra-filtration membranes. *React. Funct. Polym.*, 86, 209-214.
- [6] Mautner, A., Maples, H.A., Sehaqui, H., Zimmermann, T., Perez de Larraya, U., Mathew, A.P., Lai, C.-Y., Li, K. & Bismarck, A. (2015). Nitrate removal from water using a nanopaper ion-exchanger. *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, 2, 117-124.
- [7] Liu, P., Borrell, P.F., Božič, M., Kokol, V., Oksman, K. & Mathew, A.P. (2015). Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  from industrial effluents. *Journal of Hazardous Materials*, 294, 177-185.
- [8] Lee, K.-Y., Aitomäki, Y., Berglund, L. A., Oksman, K. & Bismarck, A. (2014). On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites. *Comp. Sci. Tech.*, 105, 15-27.
- [9] Lee, K.-Y., Tammelin, T., Schultfer, K., Kiiskinen, H., Samela, J. & Bismarck, A. (2012). High performance cellulose nanocomposites: comparing the reinforcing ability of bacterial cellulose and nanofibrillated cellulose. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 4, 4078-4086.

# Leitfähige Polymere

## Vom „missglückten“ Laborexperiment zur organischen Elektronik

Frank Wiesbrock, Thomas Griesser

Kunststoffe stellen eine der wichtigsten Produktgruppen der chemischen Industrie dar und sind aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Es gibt kaum noch Alltagsprodukte, welche keine Kunststoffteile enthalten. Die überwiegende Mehrzahl der synthetischen Kunststoffe sind elektrische Isolatoren. Ihre Leitfähigkeit kann durch Zumischung von leitfähigen Füllstoffen wie z. B. Metallpulvern oder Ruß erhöht werden, um etwa deren elektrische Aufladung zu vermeiden. Manche Kunststoffe besitzen aber auch unter bestimmten Voraussetzungen eine intrinsische Leitfähigkeit. Diese besondere Eigenschaft der Kunststoffe wurde um 1977 von Alan J. Heeger, Hideki Shirakawa und Alan G. MacDiarmid entdeckt, wofür sie im Jahr 2000 den Nobelpreis für Chemie erhielten. [1, 2, 3]

### Polymerklassen:

#### Konjugierte $\pi$ -Elektronensysteme

Intrinsisch leitfähige Polymere zeichnen sich durch ein ausgedehntes konjugiertes Elektronensystem aus. Der einfachste Vertreter dieser Klasse ist das Polyacetylen (Abb. 1), welches erstmals 1967 von Shirakawa durch einen glücklichen Zufall in Form eines mechanisch belastbaren Filmes synthetisiert werden konnte. Shirakawa versuchte, eine Polymerisation von Acetylen durch Ziegler-Natta-Katalysatoren zu erreichen, berechnete jedoch die Katalysatormenge falsch und setzte etwa das Eintausendfache dessen ein, was für Olefinpolymerisationen üblich ist. Die Folge war eine Polymerisation an der Oberfläche der Reaktionslösung nach Einleitung von Acetylen, wodurch sich ein dünner stabiler Film des Polyacetylen an der Oberfläche bildete [4]. Die Ergebnisse der Leitfähigkeitsmessungen waren jedoch ernüchternd [5]. Der gebildete Film zeigte zunächst nur eine Leitfähigkeit im Bereich von Halb- bzw. Nichtleitern. Ursache hierfür ist die sogenannte Peierls-Verzerrung, welche bewirkt, dass die  $\pi$ -Elektronen der Doppelbindungen des Polymers nicht konjugiert und delokalisiert, d. h. nicht über das ganze Makromolekül verteilt, vorliegen, sondern weitgehend als eine Abfolge von Doppel- und Einfachbindungen betrachtet werden können (Abb. 1).

Abb. 1: Polyacetylen

Es dauerte weitere 10 Jahre, bis es Shirakawa, Heeger und MacDiarmid gelang, die Leitfähigkeit von Polyacetylen durch eine Behandlung mit einer geringen Menge an Oxida-

tionsmitteln wie Chlor, Brom, Jod oder Arsenpentafluorid dramatisch zu erhöhen [6]. Diese Reaktion führt zu einer „Dotierung“ des Polymers, wobei delokalisierte ionische Zentren im Makromolekül entstehen (Abb. 2). Der Begriff „Dotierung“ wurde aus der Halbleitertechnik entlehnt, steht hierbei aber für eine partielle Oxidation oder auch Reduktion des Polymers und nicht für den Einbau von Fremdatomen in Halbleiterkristalle. Die dabei erzeugten positiven (durch Oxidation) oder negativen (durch Reduktion) Ladungsträger (Polaronen, Bipolaronen) können bei angelegter Spannung entlang der Molekülkette wandern, wodurch ein Ladungstransport ermöglicht wird.

Abb. 2: Oxidative Dotierung von Polyacetylen

Die Entdeckung des chemischen Dotierens von Polyacetylen und die damit verbundene signifikante Erhöhung der Leitfähigkeit löste eine große Euphorie unter synthetisch arbeitenden PolymerchemikerInnen aus. Eine große Herausforderung stellte jedoch die schwierige Verarbeitbarkeit dieser Polymere dar, bedingt durch ihre Unlöslichkeit in organischen Lösemitteln und ihr unvorteilhaftes Schmelzverhalten. Erst die chemische Funktionalisierung der Polymerhauptkette mit flexiblen löslichkeitsvermittelten Seitenketten bzw. der Einsatz von Precursor-Routen, bei denen lösliche Vorstufen verarbeitet und erst im abschließenden Schritt das konjugierte Polymer generiert wird, ermöglichten eine für industrielle Anwendungen geeignete Prozessierbarkeit dieser Polymere. Eine weitere elegante Methode für die Herstellung von dünnen leitfähigen Polymerschichten bietet die Aufbereitung der leitfähigen Polymere in Form von wässrigen Dispersionen. Die stetige Weiterentwicklung von modernen Polymerisationsverfahren ermöglichte den Aufbau zahlreicher neuartiger halbleitender und leitender Polymere mit maßgeschneiderten Eigenschaften, welche im Folgenden kurz besprochen werden. [7, 8]

## Polymerklassen: Poly(para-phenylen)

Da unsubstituiertes Poly(para-phenylen) wie die meisten leitfähigen Polymere unlöslich und unschmelzbar ist, wird es meist mittels Precursorroute aus Cyclohexa-3,5-dien-carbonsäureestern hergestellt. Dabei entstehen lösliche Präpolymere, die beim Erhitzen unter gleichzeitiger Formgebung in Poly(para-phenylen) übergehen (Abb. 3). Poly(para-phenylen) ist oxidationsstabiler als Polyacetylen und kann deshalb nur mit Arsenpentafluorid ( $\text{AsF}_5$ ) dotiert werden, wobei sehr hohe Leitfähigkeiten erreicht werden können. Poly(para-phenylen) wird hauptsächlich in organischen Leuchtdioden (OLEDs) als Emitter von blauem Licht mit einer Wellenlänge von  $\lambda_{\text{max}} = 449 \text{ nm}$  eingesetzt.



Abb. 3: Synthese von Poly(para-phenylen) aus Cyclohexa-3,5-dien-carbonsäureester

## Polymerklassen: Poly(para-phenylenvinyl)

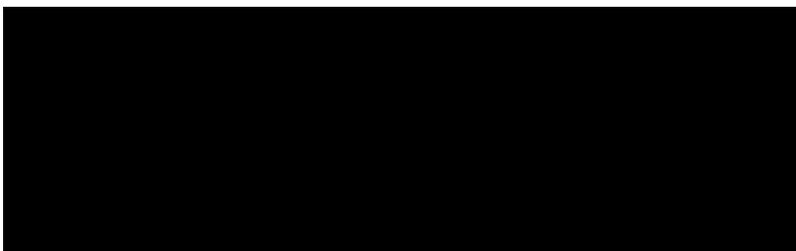
Poly(para-phenylenvinyl) ist unlöslich und unschmelzbar und wird daher ausgehend von einem löslichen Precursor-Polymer hergestellt. Dieses kann zu Filmen gegossen und unter anschließender thermischer Behandlung in ein hochmolekulares Poly(para-phenylenvinyl) überführt werden (Abb. 4). Poly(para-phenylenvinyl) ist ein leuchtend gelbes, fluoreszierendes, leitfähiges Polymer mit einem Emissionsmaximum im grünen Bereich. Aus diesem Polymer wurden die ersten OLEDs auf Polymerbasis hergestellt.



Abb. 4: Synthese von Poly(para-phenylenvinyl) aus einem löslichen Precursor-Polymer

## Polymerklassen: Polythiophen

Da unsubstituiertes Polythiophen unlöslich und unschmelzbar ist, werden meist alkylosubstituierte Derivate (Abb. 5) wie z. B. das Poly-3-hexylthiophen (P3HT) entweder durch elektrochemische Polymerisation von 3-Hexylthiophen oder durch unterschiedliche, meist metallorganische, Polymerisationsreaktionen hergestellt.



Polythiophenderivate werden aufgrund ihrer hohen Stabilität gegenüber Sauerstoff und Feuchtigkeit im dotierten sowie im undotierten Zustand vielseitig eingesetzt. Sie werden

hauptsächlich als Elektrodenmaterial, Leiter, oder Halbleiter in organischen Transistoren und Solarzellen sowie als Lichtemitter in LEDs eingesetzt.

Das bedeutendste Polythiophen-Derivat ist Poly(ethylen-dioxythiophen) (PEDOT, Abb. 5), welches durch oxidative Polymerisation von Ethylenedioxythiophen in Gegenwart von Eisen(III)-tosylat als Oxidationsmittel erhalten wird. Das entstehende leitfähige PEDOT/Tosylat ist transparent bis bläulich und zeichnet sich durch hohe thermische, photochemische und hydrolytische Stabilität aus. Die Suspension des Polymers als Gelpartikel in Wasser mit Polystyrolsulfonat als Dotierungsmittel (PEDOT/PSS) zeichnet sich durch eine besonders leichte Verarbeitbarkeit aus und findet daher breite Anwendung als Elektrodenmaterial für organische Bauelemente oder auch als Antistatikbeschichtung.

## Anwendungen und Ausblick

Batterien und Akkumulatoren waren und sind eines der viel diskutierten Einsatzgebiete für elektrisch leitfähige Polymere, wobei insbesondere deren geringes Gewicht und die potentielle kostengünstige Herstellung (im Vergleich mit derzeit eingesetzten Metallen) als vorteilhaft zu bewerten sind. Die Herstellung erster Polymerbatterien basierte auf Polyacetylen (Abb. 1 und 2) und Polypyrrol (Abb. 6), welches durch oxidative Polymerisation von Pyrrol hergestellt und durch Dotierung leitfähig gemacht wird. Ein Batterie-„Leichtgewicht“ auf Basis des Polypyrrols, das mit zwei verschiedenen Substanzen dotiert wurde, ist beispielsweise bei hohen Leistungsdichten konventionellen Alkalibatterien überlegen [9]. Oftmals weisen Batterien und Akkumulatoren auf Polymerbasis allerdings eine vergleichsweise geringe Lebensdauer auf: Sie können nicht hinreichend oft aufgeladen und entladen werden. Aufgrund der intensiven Aktivitäten auf dem Gebiet der Elektromobilität sind dementsprechend aber auch polymerbasierte Batterien und Akkumulatoren nach wie vor im Fokus der Forschung [10].



Abb. 6: Undotiertes Polypyrrol

Elektrisch leitfähige Polymere spielen insbesondere auf dem Gebiet der Leuchtdioden (light-emitting diodes, LEDs) eine prominente Rolle. Der Aufbau einer LED umfasst mindestens eine Anode, die im Allgemeinen transparent ist und oftmals aus Indium-Zinn-Oxid besteht (ITO, von engl. indium tin oxide), einen dünnen Film eines leitfähigen Polymers, beispielsweise Poly(para-phenylenvinyl) (PPV, Abb. 4) und einer Kathode. Bei Anlegen einer Spannung werden aus der Anode bzw. Kathode Löcher bzw. Elektroden in das Polymer geliefert, die aufeinander zuwandern. Treffen Elektronen und Löcher aufeinander, vereinigen sie sich und geben die Energie als Strahlung ab. Aktuelle Forschungsarbeiten sind insbesondere auf die Entwicklung großflächiger flexibler Farbmonitore ausgerichtet [10].

Durch die Umkehrung des Wirkprinzips einer LED, also durch die Bestrahlung einer Polymerschicht mit Licht zur Generierung von Elektron/Loch-Paaren, die einander entgegengesetzt zur Kathode bzw. Anode wandern, entsteht eine organische Solarzelle zur Generierung von Strom aus Licht. Dementsprechend ähnlich sind LEDs und Solarzellen aufgebaut. In einer Solarzelle werden (anders als in LEDs) zwei verschiedene leitfähige Polymere eingesetzt, nämlich ein Polymer für den Transport der Elektronen und ein Polymer für den Transport der Löcher. Oftmals wird in organischen Solarzellen ein Polymergemisch mit Fullerenen (beispielsweise PCBM, [6,6]-Phenyl-C<sub>61</sub>Buttersäuremethylester) eingesetzt, da Fullerene die unerwünschte sofortige Rekombination der Elektron/Loch-Paare durch Weiterleitung der Elektroden zur Anode unterbinden [11].

## Schülerexperimente

In der Literatur ist der Aufbau einer Solarzelle als Schülerexperiment beschrieben (Aufbau: ITO/PEDOT:PSS/Super Yellow (ein PPV-Derivat)/P3HT+PCBM/Galinstan (Legierung aus Gallium, Indium und Zinn)); auch die kommerziellen Anbieter der benötigten Chemikalien und Substrate werden genannt [11]. Ebenfalls als Schülerexperiment beschrieben wird der Bau einer „low cost“ Solarzelle (Aufbau auf dem Glassubstrat: ITO/Super Yellow/Galinstan) [10].

## Danksagung

Thomas Griesser dankt der Christian-Doppler Forschungsgesellschaft für die finanzielle Unterstützung. Die Arbeit von Frank Wiesbrock wurde im K-Projekt „PolyComp“ an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des COMET-Programms des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie und Bundesministeriums für Wirtschaft, Familie und Jugend erstellt und mit Mitteln des Bundes und des Landes Steiermark gefördert.

## Literatur

- [1] H. Shirakawa, *Angew. Chem.* 2001, 113, 2643.
- [2] A. J. Heeger, *Angew. Chem.* 2001, 113, 2660.
- [3] A. G. MacDiarmid, *Angew. Chem.* 2001, 113, 2649.
- [4] T. Ito, H. Shirakawa, S. Ikeda, *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.* 1974, 12, 11.
- [5] H. Shirakawa, T. Ito, S. Ikeda, *Makromol. Chem.* 1978, 179, 1565.
- [6] H. Shirakawa, E. J. Lois, A. G. MacDiarmid, C. K. Chiang, A. J. Heeger, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1977, 578.
- [7] *Handbook of Conducting Polymers*, Vol. 1&2 (Hrsg.: T.A. Skotheim), Marcel Dekker, New York, 1986.
- [8] *Semiconducting Polymers: Chemistry, Physics and Engineering* (Hrsg.: G. Hadziioannou, P.F. van Hutten), Wiley-VCH, Weinheim, 2000.
- [9] H.-K. Song, G.T.R. Palmore, *Adv. Mater.* 2006, 18, 1764.
- [10] M. Rehahn, *Chem. Unserer Zeit* 2003, 37, 18-30.
- [11] D. Scherr, *CHEMKON* 2014, 21, 31.

# Kunststoffexperimentalsets

## des Verbandes der Chemielehrer/innen Österreichs

### Ralf Becker

Versuche zum Thema ‚Kunststoffe‘ gehören zu den Standardexperimenten im Chemieunterricht. Während die Identifizierung von Kunststoffen aus dem Alltag mittels Dichte und Brennprobe verhältnismäßig einfach durchführbare Experimente darstellen, ist die Herstellung von Kunststoffen praktisch nur mit Chemikalien möglich, die oft nicht in jedem Schullabor vorhanden sind.

Daher hat der Verband der Chemielehrer/innen Österreichs (VCÖ) zwei Kunststoffexperimentalsets zusammengestellt, die über den VCÖ Shop beziehbar sind:  
<http://shop.vcoe.or.at/shop/de/index.html>.

#### Kunststoffexperimentalset klein

- Komponenten für Polyurethanschaum
- Polyvinylalkohol
- Superabsorber
- Expandierfähiges Polystyrol
- Lösung von Natriumtetraborat

#### Versuchsbeschreibungen zur

- Herstellung eines Polyurethanschaums
- Herstellung von Slime
- Herstellung eines Fadens aus Polyvinylalkohol
- Herstellung einer Polystyrolkugel
- Versuche mit Superabsorber

Die Versuche sind sowohl für die Sekundarstufe 1 als auch für die Sekundarstufe 2 geeignet, speziell für die Bereiche C3 (Reaktionen ausgewählter organischer Stoffe) und C4 (chemische Grundkenntnisse in praxisrelevanten Bereichen).

Die Versuchsbeschreibungen sind stark angeleitet (Anforderungsniveau N1).

Abb. 1: Die Komponenten des Kunststoffexperimentalsets klein des VCÖ

#### Kunststoffexperimentalset groß

Resorcin	100 mL Dose
Harnstoff	100 mL Dose
Natriumthiosulfat	100 mL Dose
Salzsäure 10%	100 mL Kunststoffflasche Engh.
Glycerin	250 mL Kunststoffflasche Engh.
Boraxlösung 2 %ig	250 mL Kunststoffflasche Engh.
Hexamethyldiamin-Lösung	100 mL Fl. Braunglas
Sebacinsäuredichlorid-Lösung	100 mL Fl. Braunglas
Ethylacetat	100 mL Fl. Braunglas
Aceton	100 mL Fl. Braunglas
Komponente I für PU	Kunststoffflasche Weith.
Komponente II für PU	Kunststoffflasche Weith.
Stärke	Dose 250 ml
Citronensäure	Dose 250 ml
Polyvinylalkohol	Dose 250 ml
Vorgesäumtes PS (EPS)	Dose 250 ml
Superabsorber	Dose 250 ml
<b>Zubehör</b>	
Holzspieße	20 Stück
Halbkugeln	2 Stück + 4 Schrauben (in Säckchen)
Eierfarbe	1 Beutel
PS-Becher	20 Stück (1 Packung)
Spritzen 20 mL	2 Stück
Pasteurpipetten	10 Stück

Abb. 2: Die Komponenten des Kunststoffexperimentalsets groß des VCÖ

## Versuchsbeschreibungen für folgende Experimente

(auf einer CD) liegen bei

### 1. Erkennen von Kunststoffen

Untersuchung von Klang, Festigkeit, Dichte, Löslichkeit, Verhalten beim Erwärmen, Brennbarkeit, Schwadenprobe (Geruch, pH-Wert), Beilsteinprobe

### 2. Herstellen von Kunststoffen

- Polyester aus Stärke und Glycerin
- Polyester aus Citronensäure und Glycerin
- Nylon
- Slime
- Polyurethan
- Resorcinharz
- Harnstoffharz

### 3. Umformen

- Erwärmen
- Polystyrol lösen und Folienherstellung
- Tiefziehen
- Polystyrol (PS) Schnüre
- Expandierbare Polystyrol (EPS) Kugeln
- Superabsorber

Neben den Standardversuchen wie im Experimentalsatz klein sind damit auch Versuche zu sogenannten Biokunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen sowie die Herstellung von Nylon und von Duroplasten auf Basis von Formaldehyd (muss allerdings extra besorgt werden) mit Resorcin oder Harnstoff möglich. Ferner sind auch Versuchsbeschreibungen zum Umformen von Kunststoffen enthalten.

Auch diese Versuche sind prinzipiell sowohl für die Sekundarstufe 1 als auch für die Sekundarstufe 2 geeignet. Aus zeitlichen Gründen werden allerdings die Versuche mit Formaldehyd sowie die Folienherstellung und das Tiefziehen erst in der Sekundarstufe 2 durchgeführt werden.

Die Versuchsbeschreibungen sind stark angeleitet (Anforderungsniveau N1). Da diese aber auf einer CD vorhanden sind, können sie nach Belieben auf höhere Anforderungsniveaus geändert werden.

Alle Komponenten der beiden Kunststoffexperimentalsätze können auch einzeln im VCÖ Shop bestellt werden.

---

# Anleitungen zur Herstellung von Knete

#### Anleitung für essbare Knete:

<http://www.smarticular.net/essbare-spielknete-fuer-kinder-selber-machen-ohne-kochen/> [29.12.2015]

#### Anleitung für Slime:

[https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt\\_slime.htm](https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt_slime.htm) [31.12.2015]

Chemikalien für Slime sind im Kunststoff-Experimentiersatz des VCÖ enthalten <http://www.vcoe.or.at/shop/diverses.php> [31.12.2015]

#### Anleitung für Hüpfende Knete:

[http://course1.winona.edu/cmierschin/450/Lab/Silicone\\_polymer\\_lab.pdf](http://course1.winona.edu/cmierschin/450/Lab/Silicone_polymer_lab.pdf) [31.12.2015]

<https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem415/CEM415,%202013/Experiment%201.pdf> [31.12.2015]

---

# Anleitungen zur Herstellung von Knete

## **Anleitung für essbare Knete:**

*<http://www.smarticular.net/essbare-spielknete-fuer-kinder-selber-machen-ohne-kochen/> [29.12.2015]*

## **Anleitung für Slime:**

*[https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt\\_slime.htm](https://web.archive.org/web/20070927183638/http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/experimente/effekt/effekt_slime.htm) [31.12.2015]*

Chemikalien für Slime sind im Kunststoff-Experimentierset des VCÖ enthalten *<http://www.vcoe.or.at/shop/diverses.php>* [31.12.2015]

## **Anleitung für Hüpfende Knete:**

*[http://course1.winona.edu/cmierschin/450/Lab/Silicone\\_polymer\\_lab.pdf](http://course1.winona.edu/cmierschin/450/Lab/Silicone_polymer_lab.pdf) [31.12.2015]*

*<https://www2.chemistry.msu.edu/courses/cem415/CEM415,%202013/Experiment%201.pdf> [31.12.2015]*

# Internetquellen: POLYMERE

Johanna Lena Steininger

## BP Educational Service

Die BP Webseite hat viele interessante Videos, Animationen und Unterrichtsmaterialien (u.A. auch Slideshows und Quizzes) für SchülerInnen unterschiedlicher Altersstufen zu einer Vielfalt an Themen. Um auf die Materialien zugreifen zu können, ist eine kostenlose Registrierung notwendig.

**Sprache:** Englisch

## Übersicht Polymere

<http://bpes.bp.com/secondary-resources/science/ages-14-to-16/chemical-and-material-behaviour/polymerisation/>

Video über Polymere und Plastik im Allgemeinen. Guter Einstieg, verschiedene Eigenschaften und Verwendungen, Recycling

[http://bpes.bp.com/videoplayer/?src=/mp4:fcs.groovy/clients/bpes/Film3\\_1.flv&stream=True#size=custom&width=635&height=470](http://bpes.bp.com/videoplayer/?src=/mp4:fcs.groovy/clients/bpes/Film3_1.flv&stream=True#size=custom&width=635&height=470)

**Dauer:** 1'33"

Video über Polymerisation von Ethen, Propene, PVC, etc. Relativ simple, gute Animation, erklärt Grundzüge, allerdings nichts über Radikale etc.

[http://bpes.bp.com/videoplayer/?src=/mp4:fcs.groovy/clients/bpes/Film3\\_2.flv&stream=True#size=custom&width=635&height=470](http://bpes.bp.com/videoplayer/?src=/mp4:fcs.groovy/clients/bpes/Film3_2.flv&stream=True#size=custom&width=635&height=470)

**Dauer:** 2'35"

## Crash Course Chemistry #45: Polymers

Detailliertes Video mit fast allem, was SchülerInnen über Polymere wissen sollten.

Kurzer historischer Hintergrund, Ethen, Additionsreaktion, verschiedene Kunststoffe & ihre Eigenschaften (u. a. wird die Herstellung von Nylon gezeigt), Radikale, Kondensationsreaktion, natürliche Polymere etc. Chemisch korrekt, gut und lustig (nette Animationen)

Sprache: Englisch. (ACHTUNG! Sehr, sehr schnell!) Sehr gute Englischkenntnisse vorausgesetzt!

<https://www.youtube.com/watch?v=rHxxLYzJ8Sw>

**Dauer:** 10'14"

## CHEMTUBE 3D (University of Liverpool)

ChemTube3D contains interactive 3D animations and structures, with supporting information for some of the most important topics covered during an undergraduate chemistry degree.

Relativ große Sammlung an verschiedensten Polymeren (von Natural Rubber über PET, Nylon, versch. Polyphenyle, PVC, PDMS etc.). Zu jedem Polymer eine Animation auf der linken Seite, rechts unbewegliche Strukturformel und kurze Informationen.

Common features der Animationen (bei den meisten vorhanden): Show Repeating Units, Show Individual Repeating Unit, Show Functional Groups, etc.

Man kann hineinzoomen und mit Maus drehen.

Unter „Larger View“ teilweise noch mehr Features.

Wenn man sich ein bisschen damit herumspielt, sehr informativ und eigentlich auch simple zu bedienen.

**Schwierigkeitsstufe:** Advanced (recht großes Vorwissen vorausgesetzt)

**Sprache:** Englisch

<http://www.chemtube3d.com/polymer/index.html>

## Beispiel: Nylon

[http://www.chemtube3d.com/polymer/\\_Nylon66F.html](http://www.chemtube3d.com/polymer/_Nylon66F.html)

## E-EDUCATION

Eine Art Slideshow mit vielen, guten Animationen, zum Durchklicken.

Setzt nicht unglaublich viel Vorwissen voraus, gibt einen guten, detaillierten Überblick, geeignet wenn sich SchülerInnen Stoff selbst erarbeiten sollen.

**Sprache:** Englisch

## Inhalt

1. Polymer Organic Chemistry (Basics, most common monomers)
2. Addition or Chain Growth Polymerization
3. Condensation or Step Growth Polymerization
4. Copolymers
5. Chain Architecture

[https://www.e-education.psu.edu/matse081/files/matse081/animations/lesson07/u07\\_polymerSynthF.swf](https://www.e-education.psu.edu/matse081/files/matse081/animations/lesson07/u07_polymerSynthF.swf)

## THE SIMPLE CHEMICS

Allgemeines über Polymere (ganz kurz was sie sind, Thermoplasten, Duroplasten, Elastomere, Polymerisation, Polykondensation, Polyaddition)

Gute, simple Erklärungen, Tonfall aber sehr „cool“ und locker

<https://www.youtube.com/watch?v=xyyAbGpoakM>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 4'49"

### Thermoplaste in mehr Detail

<https://www.youtube.com/watch?v=ll6hPdAkdFA>

**Dauer:** 3'31"

### Duroplasten in mehr Detail

[https://www.youtube.com/watch?v=\\_QOKDYHMxCU](https://www.youtube.com/watch?v=_QOKDYHMxCU)

**Dauer:** 2'35"

### Elastomere in mehr Detail

<https://www.youtube.com/watch?v=YtdPaDIGrK0>

**Dauer:** 3'03"

### Polymerisation in mehr Detail

[https://www.youtube.com/watch?v=yB\\_QThdMSvk](https://www.youtube.com/watch?v=yB_QThdMSvk)

**Dauer:** 4'04"

### Polyaddition in mehr Detail

<https://www.youtube.com/watch?v=bWh73rCI000>

**Dauer:** 3'31"

### Polykondensation in mehr Detail

Alle Videos sind unter folgendem Link in einer Playlist abgespeichert:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLlxOW5VSffINrOnMYd4KxawyBDS2Hnw-y>

## FAZ

Artikel aus dem Jahre 2009 mit einem kurzen Video zur Herstellung von Bio-Plastik (Polymilchsäure)

<http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-chemie/biopolymere-plastik-frisch-vom-acker-1773344.html>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer des Videos:** 59"

## MGH Biopolymer Company

<http://www.mhgbio.com/>

Ein amerikanisches Unternehmen, das widerstandsfähiges, natürlich abbaubares Plastik (PHA, Polyhydroxyalkanoate) aus Raps herstellt. Der Kunststoff ist 100% natürlich abbaubar und zersetzt sich nach spätestens einem Jahr sowohl in der Erde als auch in Süß- und Salzwasser.

Vorstellungs-Video der Company, guter Überblick

<https://youtu.be/nObfX0h580E>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 2'53"

### Animation des PHA Cycles

von der Pflanze über die Herstellung des Kunststoffs bis zum Recycling.

Ein bisschen „werbungs-like“ aber informativ, geht etwas mehr in Details als das Vorstellungs-Video

<https://youtu.be/VLia-wCODJU>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 2'33"

## MH Hannover

### Warum sind viele Biopolymere helikal?

Erklärt an Beispielen der DNA, Animation zum Durchklicken. Ganz gut aufgebaut, Animationen SoSoLaLa. Setzt Vorwissen über Polymere & über DNA voraus.

[http://webhost2.mh-hannover.de/bpcmol/jmol/helix\\_why/11start.htm](http://webhost2.mh-hannover.de/bpcmol/jmol/helix_why/11start.htm)

## Chemistry for All

Video über natürliche Polymere. Gibt einen guten Überblick darüber, was natürliche Polymere alles sind (Zellulose, Stärke, Chitin, diverse Proteine, DNA, Gummi etc.). Wenig Infos zur Struktur und was z.B. den Unterschied zwischen Zellulose und Stärke ausmacht (bei beiden wird das Monomer Glucose genannt, aber nichts über  $\alpha$  und  $\beta$ ). → Könnte man SchülerInnen recherchieren lassen.

<https://youtu.be/JISzXeVSjuQ>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 4'31"

## Bell Telephone Laboratories

„Physical Chemistry of Polymers, rubber elasticity, entropic force, mechanical properties“, ein Video aus dem Jahre 1962. Interessant aufgrund seines Alters, nicht inkorrekt, viele Demonstrationen und Animationen.

<https://youtu.be/4xWz8peGoVg>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 21'51"

## Polymers in Sport

Ein Video über die Polymere im Fußball der WM 2014. Erklärt anhand der Polymere, aus denen die Bälle der WM 2014 hergestellt wurden, sämtliche wichtige Konzepte der Polymere und der Polymerisation.

<https://www.youtube.com/watch?v=8IMBv0GvGHg>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 8'31"

---

## What is Gore-Tex?

Video über Polymere in der Kleidung, insbesondere Gore-Tex. Grundbegriffe der Polymere sehr vereinfacht erklärt, befasst sich u. a. damit, wieso Goretex gleichzeitig wasserabweisend und schweißdurchlässig ist.

<https://youtu.be/a9Ee6XOLKSA>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 5'30"

(Teilweise mit skandinavischem Akzent)

---

## Die geplante Obsoleszenz – Nylon

Eine Dokumentation über geplante Obsoleszenz, die auch einen kurzen Beitrag zu Nylon hat (von 5'45" bis 10'11"). Nylon war zu Beginn quasi unzerstörbar (bzw. sehr widerstandsfähig) und wurde dann so verändert, dass die Fäden schnell verschleißten, um den Konsum zu erhöhen.

<https://youtu.be/JZxAKErfe5E?t=345>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 4'26"

---

## Herkömmliche und Bio-Kunststoffe

### Einteilung nach Ausgangsmaterial und Abbaubarkeit

Interessante Grafik, die herkömmliche und Bio-Kunststoffe nach ihren Ausgangsmaterialien (petrochemische oder nachwachsende Rohstoffe) und ihrer Abbaubarkeit (nicht bio-abbaubar bzw. bio-abbaubar) einteilt. Kommt in einem spannenden Artikel über Biokunststoffe und ihre Diversität vor.

<http://www.engineering-igmetall.de/biokunststoffe-bio-ist-nicht-gleich-gr%C3%BCn>

**Sprache:** Deutsch

<http://www.engineering-igmetall.de/sites/default/files/Bio-Kunststoffe.jpg>

---

## Bioplastik?

Video von „Das Erste“ über die größten Irrtümer über Bioplastik. Was wird alles als Bioplastik vermarktet? Ist es gesünder als normales Plastik? Heißt „bio“ im Plastik dasselbe wie „bio“ bei Lebensmittel? Worin unterscheidet sich Bio- und Nicht-Bioplastik? Wie entsorgt man Bioplastik?

<http://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/videos/bioplastik-alles-abbaubar-100.html>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 5'21"

---

## Kunststoffrecycling mit dem grünen Punkt

Video, das Einblicke in die Funktionsweise einer Recycling-Anlage in Deutschland gibt.

<https://youtu.be/yjuooql8kzA>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 3'35"

---

## Kunststoffrecycling bei mtm plastics

Video über Europas Technologieführer bei der Verwertung von gemischtem Plastik, mtm plastics, ein 80-Kopf starkes Unternehmen in Deutschland und deren Recycling-Prozesse.

<https://youtu.be/JUWFzs-JjNM>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 4'25"

---

## Müll-Lüge

### Haben wir jahrzehntelang umsonst getrennt?

Video vom Bayerischen Rundfunk darüber, was denn jetzt mit dem von den Bürgern getrennten Müll wirklich geschieht. (Wie viel Prozent des Mülls aus dem gelben Sack wird wirklich wiederverwertet? Warum?)

<https://youtu.be/4aOxsR0VutQ>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 6'33"

---

## Plastics – the Facts 2015

PDF mit allen möglichen schön und bunt aufbereiteten Statistiken über Plastik in Europa im Jahr 2015, z.B. Anzahl der Arbeiter in der Industrie, Anteil des recycelten Plastiks, welche Länder am meisten Plastik verbrauchen etc.

<http://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/finalplasticsthefacts2015ebookwebve/17?e=14847134/31230241>

(zum online Durchklicken)

<http://www.plasticseurope.org/Document/plastics---the-facts-2015.aspx> (für den PDF download)

**Sprache:** Englisch

---

## How Plastic Bottles Are Recycled Into Polyester

Video über die Produktion von Polyester. Folgt Plastikflaschen von den UK nach China und verfolgt den Recyclingprozess in zwei verschiedenen Fabriken.

<https://www.youtube.com/watch?v=zyF9Mxlcltw>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 5'29"

---

## Plastics to Fuel

Video über die Möglichkeit, aus nicht-recycelbarem Plastik Energie herzustellen (liquid fuel, solid fuel, gas...). Nur Animationen, sehr einfach, quasi kein chemischer Hintergrund aber spannend als Ideenansatz.

[https://www.youtube.com/watch?v=b5eX-J23\\_oE](https://www.youtube.com/watch?v=b5eX-J23_oE)

**Sprache:** Englisch (simpel und langsam)

**Dauer:** 4'11"

---

## Designertaschen aus Plastikmüll

Ein Galileo-Beitrag über die Herstellung von Designertaschen aus Plastiksackerl in Indien – zu (relativ) fairen Arbeitsbedingungen.

<http://www.prosieben.at/tv/galileo/videos/designertaschen-aus-muell-clip>

**Sprache:** Deutsch

**Dauer:** 12'35"

---

## Recycling Tyres

Video über das Recycling von Autoreifen zu Lärmschutzwänden in Kroatien

<https://www.youtube.com/watch?v=6kD9YJ9iSfc>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 3'16"

---

## Are You Eating Plastic for Dinner?

Video von National Geographic über Plastik in der Nahrungskette mit vielen Animationen. Endet mit einem Aufruf zum Recyceln.

<https://www.youtube.com/watch?v=FjT8GG0ETQg>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 4'39"

---

## Microplastics – From Fleece Jackets to Your Food

Ein kurzes Video von National Geographic über Microplastics – woher sie kommen (welche Haushaltsgegenstände und Produkte) und wohin sie gehen (in die gesamte Nahrungskette).

<https://www.youtube.com/watch?v=RMkkYAf18Xk>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 1'19"

---

## Microplastics in the Ocean

Video über die Problematik von Mikroplastik im Meer – und in der Nahrungskette. Zeigt u.A. Forscher beim Untersuchen von Meerwasser.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZHCgA-n5wRw>

**Sprache:** Englisch

**Dauer:** 2'51"

---

## DOKUS

### Plastic Planet

<http://www.bpb.de/mediathek/187448/plastic-planet>

### Plastik – Ein langfristiges Problem (arte 2008)

<https://www.youtube.com/watch?v=jj-wSh6WlJs>

### Das Experiment – Ein Leben ohne Plastik

(Reportage 2014(?))

<https://www.youtube.com/watch?v=G4xIK4qm-Mw>

---

## ARTIKEL

### Straßen aus recyceltem Plastik in den Niederlanden

<http://www.spiegel.de/auto/aktuell/strassen-aus-plastik-rotterdam-plant-teststrecke-a-1046825.html>

### Kritischer Artikel über (Recyceltes) Plastik in Kleidung

<http://www.zeit.de/wissen/umwelt/2015-04/recycling-kleidung-plastik-meer/komplettansicht>

### Artikel über die Möglichkeit aus Plastik Kraftstoff herzustellen (Englisch)

<http://www.livescience.com/52249-tech-exists-to-turn-plastic-to-fuel-if-communities-demand-it.html>

---

# Autorinnen und Autoren

Name	Position und Institution	Arbeitsschwerpunkte	Kontakt
Dr. Simone ABELS	Universitätsassistentin (Post-doc) am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen, Inklusiver Naturwissenschaftsunterricht, Umgang mit Diversität, Reflexionskompetenz	Simone.Abels@univie.ac.at
Dr. Ralf BECKER	Präsident des Verbands der ChemielehrerInnen Österreichs		Ralf.Becker@schule.at
Dr. Peter E. CHILDS	EPI*STEM and Department of Chemical and Environmental Sciences, University of Limerick, Ireland	Inquiry-based learning, language	Peter.Childs@ul.ie
Assoc.Prof. DI Dr. Thomas GRIESSER	Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Chemie der Kunststoffe, Otto Glöckel-Strasse 2, 8700 Leoben	Synthesis and application of photosensitive materials for optical elements, organic electronics, surface science and ink-jet printing	Thomas.Griesser@unileoben.ac.at
Mag. Helena HENKE	Dissertantin am Institut für Chemie der Polymere, Johannes Kepler Universität Linz	Novel, biodegradable, multi-arm polyphosphazenes for biomedical applications	Helena.Henke@jku.at
Mag. Elisabeth HOFER	Universitätsassistentin (Predoc) am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen und sein Einsatz in Schule und LehrerInnenfortbildungen	E.Hofer@univie.ac.at
Mag. Gerhard KERN	Mitverwendeter Lehrer am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien; Lehrer für Chemie, Mathematik und Naturwissenschaftliches Arbeiten am BG/BRG/BORG Eisenstadt	Bildungsstandards, Kompetenzorientierung, Aufgabenentwicklung	Gerhard.Kern@univie.ac.at

Name	Position und Institution	Arbeitsschwerpunkte	Kontakt
DI Mag. Brigitte KOLIANDER	Mitverwendete Lehrerin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen, Ziele von Lehrpersonen in der Laborpraxis	Brigitte.Koliander@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Anja LEMBENS	Leiterin des Österreichischen Kompetenzzentrums für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen, LehrerInnenprofessionalisierung, Gender, Nature of Science	Anja.Lembens@univie.ac.at
Dr. Andreas MAUTNER	Postdoc am Institut für Materialchemie der Universität Wien	Green Materials	Andreas.Mautner@univie.ac.at
Mag. Sandra PUDDU	Projektmitarbeiterin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien, Lehrerin an der Lernwerkstatt Donaustadt (Inklusive Wiener Mittelschule)	Forschendes Lernen, Lernwerkstatt, Diversität	Sandra.Puddu@univie.ac.at
Mag. Tanja RADINGER	BRG Wienerwaldgymnasium Norbertinumstraße 7 3013 Tullnerbach	Forschendes Lernen, Lernwerkstatt	Tanja.Radinger@gmail.com
Mag. Rosina STEININGER	Mitverwendete Lehrerin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	LehrerInnen-SchülerInnen-Diskurse, Argumentieren, Concept Cartoons	Rosina.Steinger@univie.ac.at
Johanna Lena STEININGER	Absolventin der Sir-Karl-Popper-Schule		
Assoz. Univ.-Prof. Dr. Ian TEASDALE	Stellvertretender Institutsvorstand des Instituts für Chemie der Polymere, Johannes Kepler Universität Linz	Controlled Release von Wirkstoffen auf Basis funktionaler Polymere; neuartige funktionale Polyphosphazene	Ian.Teasdale@jku.at
Priv. Doz. Dr. Frank WIESBROCK	Polymer Competence Center Leoben Roseggerstrasse 12 8700 Leoben	Synthesis and applications of biopolymers and biocompatible polymers	Frank.Wiesbrock@pccl.at

Name	Position und Institution	Arbeitsschwerpunkte	Kontakt
DI Mag. Brigitte KOLIANDER	Mitverwendete Lehrerin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen, Ziele von Lehrpersonen in der Laborpraxis	Brigitte.Koliander@univie.ac.at
Univ.-Prof. Dr. Anja LEMBENS	Leiterin des Österreichischen Kompetenzzentrums für Didaktik der Chemie der Universität Wien	Forschendes Lernen, LehrerInnenprofessionalisierung, Gender, Nature of Science	Anja.Lembens@univie.ac.at
Dr. Andreas MAUTNER	Postdoc am Institut für Materialchemie der Universität Wien	Green Materials	Andreas.Mautner@univie.ac.at
Mag. Sandra PUDDU	Projektmitarbeiterin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien, Lehrerin an der Lernwerkstatt Donaustadt (Inklusive Wiener Mittelschule)	Forschendes Lernen, Lernwerkstatt, Diversität	Sandra.Puddu@univie.ac.at
Mag. Tanja RADINGER	BRG Wienerwaldgymnasium Norbertinumstraße 7 3013 Tullnerbach	Forschendes Lernen, Lernwerkstatt	Tanja.Radinger@gmail.com
Mag. Rosina STEININGER	Mitverwendete Lehrerin am Österreichischen Kompetenzzentrum für Didaktik der Chemie der Universität Wien	LehrerInnen-SchülerInnen-Diskurse, Argumentieren, Concept Cartoons	Rosina.Steininger@univie.ac.at
Johanna Lena STEININGER	Absolventin der Sir-Karl-Popper-Schule		
Assoz. Univ.-Prof. Dr. Ian TEASDALE	Stellvertretender Institutsvorstand des Instituts für Chemie der Polymere, Johannes Kepler Universität Linz	Controlled Release von Wirkstoffen auf Basis funktionaler Polymere; neuartige funktionale Polyphosphazene	Ian.Teasdale@jku.at
Priv. Doz. Dr. Frank WIESBROCK	Polymer Competence Center Leoben Roseggerstrasse 12 8700 Leoben	Synthesis and applications of biopolymers and biocompatible polymers	Frank.Wiesbrock@pccl.at