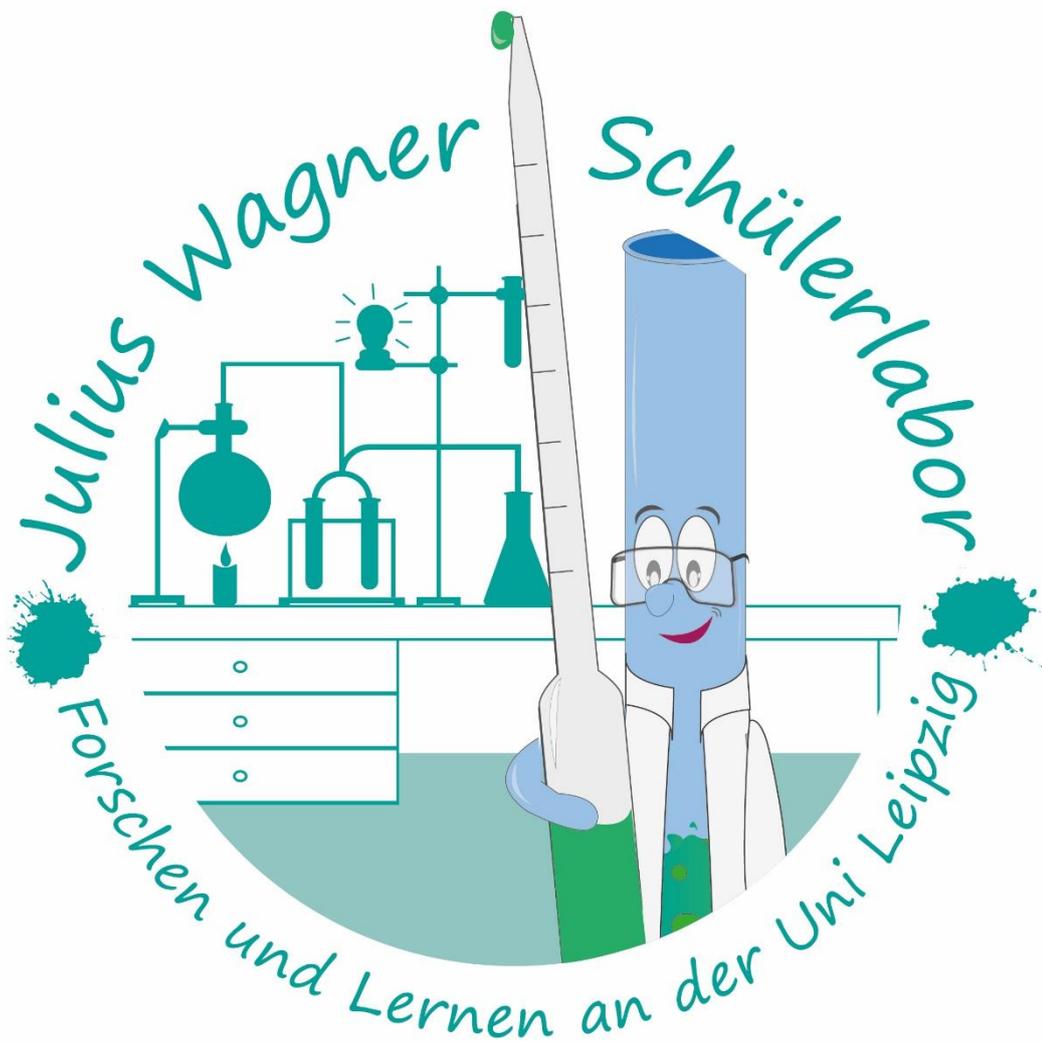


Zu viel Plastik –
Auf der Suche nach einem Ausweg

Für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 10



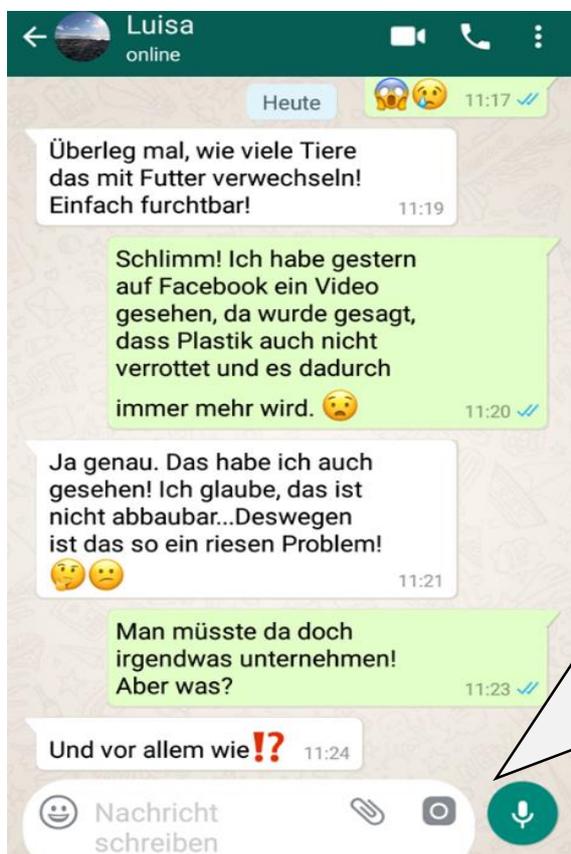
Insekten gegen das Plastik-Problem?

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

-Plasticfacts-

2015 wurden allein in Deutschland 5,92 Mio. Tonnen Plastikmüll produziert.¹ In der Chemie wird Plastik meist als Kunststoff bezeichnet.



Kunststoffmüll und seine Auswirkungen auf die Umwelt sind problematisch. In dem Chat mit Luisa wird dies am Beispiel des Kunststoffmülls im Meer deutlich. Du sollst heute verschiedene Ansätze kennenlernen, in denen man versucht dem Plastik-Problem zu begegnen. Denn um wirklich etwas unternehmen zu können, ist Hintergrundwissen nötig! Schaffst du es im Labor, so viel zu lernen, dass du einen Ausweg aus dem Plastik-Problem findest?

¹ mit Informationen aus: Struckemeier, Sieve und Kloppenburg (2015, S. 35)

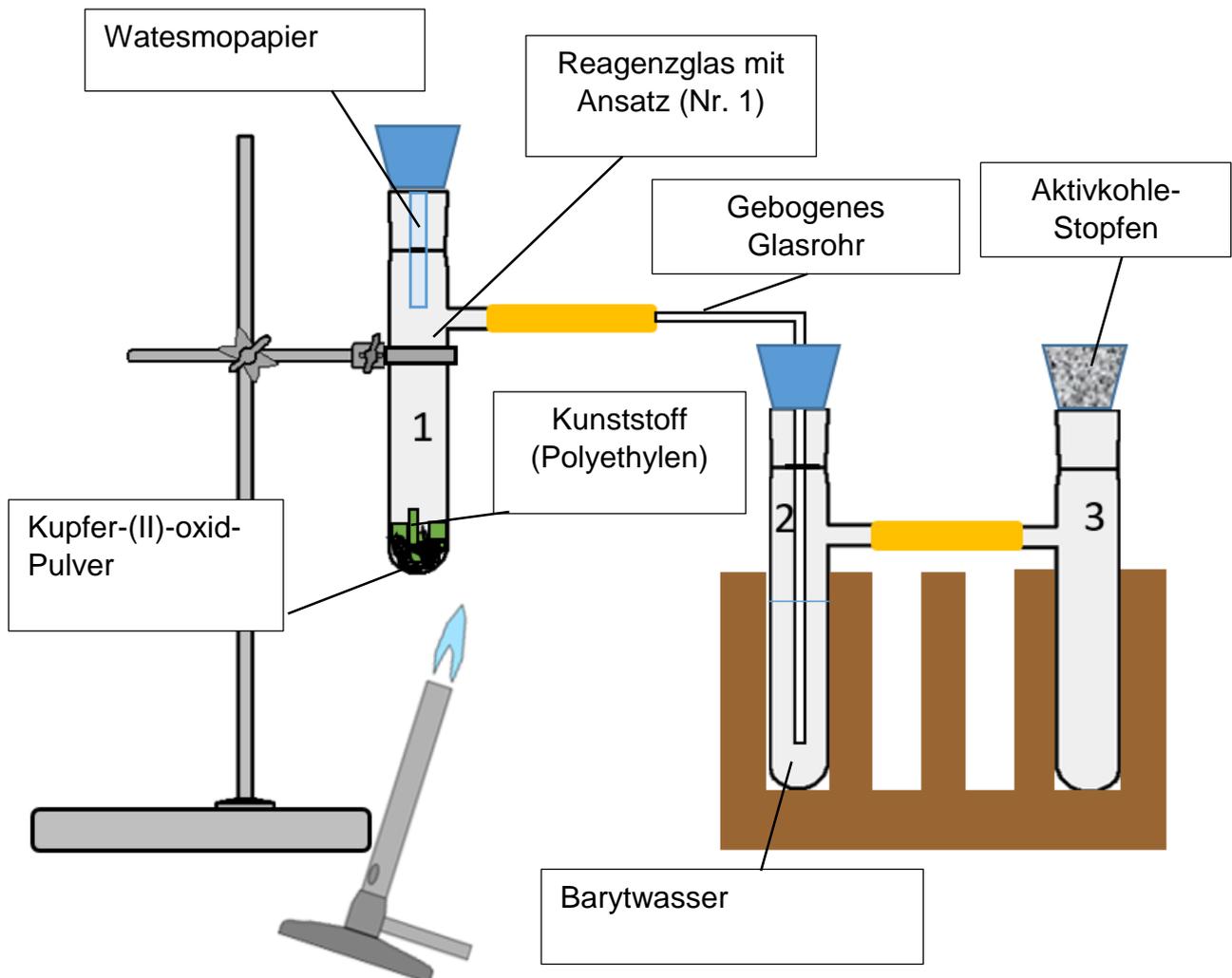
Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

Experiment: Kann Kunststoff abgebaut werden?

In dem Chat mit Luisa heißt es: „Ich glaube, das ist nicht abbaubar...“. Führe das Experiment durch, um herauszufinden, ob das wirklich stimmt.

Versuchsaufbau:

Beschrifte die Abbildung mit Hilfe der Versuchsanleitung.



Fakten-Box:

- Barytwasser bildet mit Kohlenstoffdioxid einen weißen Niederschlag.
- Wasser kann mit Watesmopapier durch eine dunkelblaue Färbung nachgewiesen werden.

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

Vorbereitung:

- Gib ca. einen Daumen breit von dem *zerschnittenen Kunststoff* in das *Reagenzglas mit Ansatz* (Reagenzglas **Nr. 1**).
- Gib 5 Spatel fein gepulvertes *Kupfer(II)-Oxid* hinzu.
- Klemme das Reagenzglas **Nr. 1** in das Stativ.
- Befülle das zweite Reagenzglas mit Ansatz (**Nr. 2**) mit 15 ml *Barytwasser* und stelle es in einen Reagenzglasständer.
- Tauche das eine Ende des *gebogenen Glasrohrs* in das Barytwasser und verbinde es durch das Schlauchstück mit dem Ansatz des Reagenzglases **Nr. 1**.
- Nimm ein Stück *Watesmopapier* und klemme es mithilfe eines Stopfens an den oberen Rand des Reagenzglases **Nr. 1**.
- Verbinde den Ansatz des Reagenzglases **Nr. 2** über einen Schlauch mit dem Ansatz des Reagenzglases **Nr. 3**.
- Setze einen *Aktivkohle-Stopfen* auf Reagenzglas **Nr. 3**.
- Alle Verbindungsstücke und Stopfen müssen möglichst fest sitzen.

Versuchsdurchführung:

- Entzünde den Brenner und erhitze mit rauschender Flamme das Kunststoff-Kupferoxid-Gemisch so lange, bis sich weiße Dämpfe bilden und nur noch ein schwarz-roter Rückstand im Reagenzglas zu sehen ist.
Nimm den Brenner dafür vorsichtig in die Hand und erhitze das Kunststoff-Kupferoxid-Gemisch im Reagenzglas schräg von unten.
- Stelle nun den Brenner aus und ziehe das gebogene Glasrohr vom Verbindungsschlauch ab.
- Warte, bis sich das Reagenzglas abgekühlt und kaum noch weißer Dampf zu sehen ist. Entnimm dann das Watesmopapier.

Beobachtung:

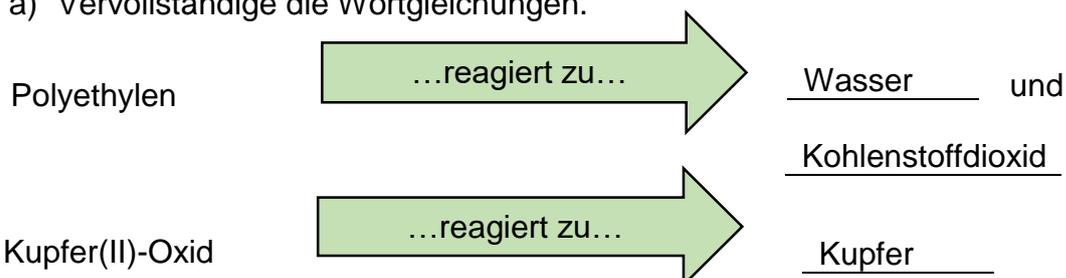
Das Watesmopapier färbt sich blau. Es entsteht ein weißer Niederschlag mit

Barytwasser. Der Kunststoff schmilzt erst, dann entstehen weiße Dämpfe.

Die Rückstände sind kupferfarben und schwarz.

Auswertung:

a) Vervollständige die Wortgleichungen.



Die ablaufende Reaktion nennt man Redoxreaktion.

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

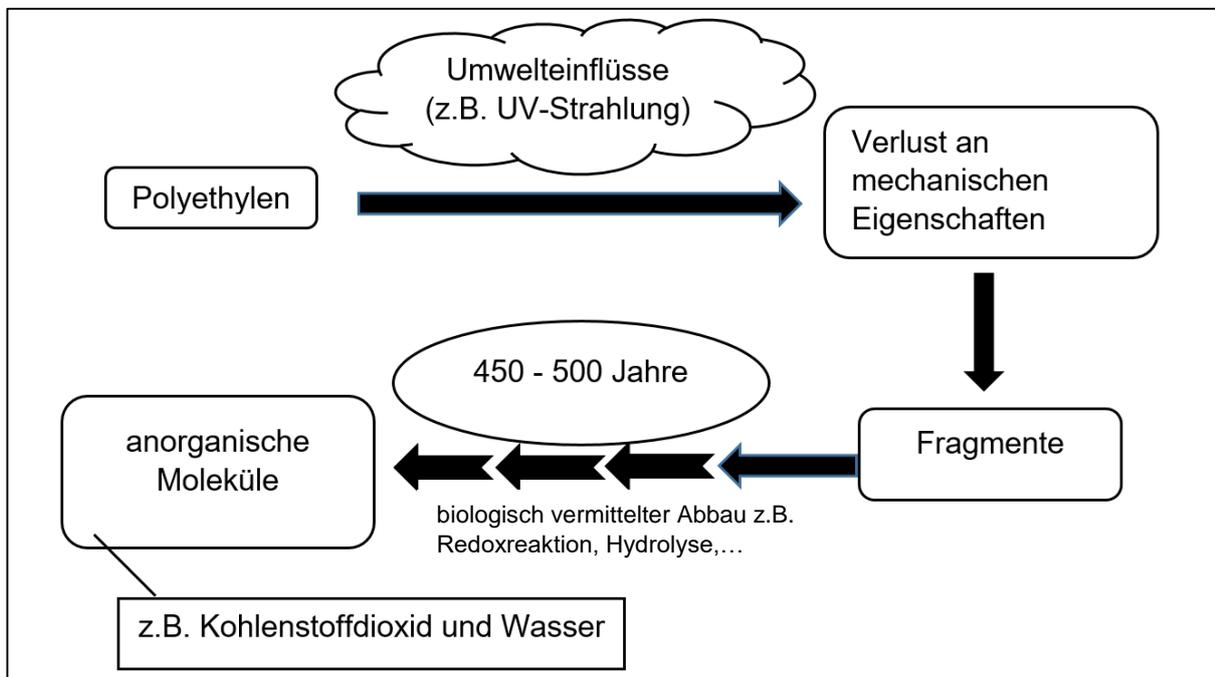
b) Ergänze den Lückentext

Kunststoffmoleküle bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff –Atomen und Wasserstoff –Atomen. Je nach Kunststoffsorte können zusätzlich beispielsweise noch Sauerstoff-, Stickstoff- oder Chloratome vorhanden sein.

Schlussfolgerung: Vervollständige das Flussdiagramm² zum Abbau von Kunststoff am

Beispiel von Polyethylen. Nutze dafür folgende Begriffe.

Polyethylen	450-500 Jahre
anorganische Moleküle	Kohlenstoffdioxid und Wasser



Der letzte Schritt eines solchen Abbaus wird *Mineralisierung* genannt. Dieser Prozess findet so bei allen Kunststoffarten statt, wobei die Dauer variiert.

Bewertung:

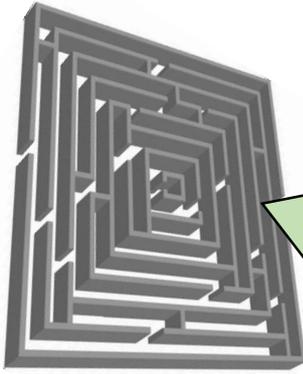
Hat Luisa mit ihrer Aussage „**Ich glaube, das ist nicht abbaubar...**“ recht? Begründe deine Antwort.

Da die Mineralisierung von Plastik meist sehr lange dauert (z.B. 450-500 Jahre bei Polyethylen), bezeichnen es viele als „nicht abbaubar“. Dies stimmt jedoch nicht.

Der Abbau findet statt, allerdings bei den meisten Kunststoffarten sehr langsam.

² mit Informationen aus: Andradý (2015, S. 145-146)

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?



Das Problem ist deutlich: Zu viel Plastikmüll, zu viel davon in der Natur und zu lange Zeit, die es dort verbleibt. Begib dich nun auf die Suche nach einem Ausweg aus dem Plastik-Problem. Bearbeite dafür die verschiedenen Stationen. Die Reihenfolge ist dabei nicht wichtig. Lies die Aufgabenstellungen immer sorgfältig durch. Vielleicht findest du ja eine Lösung...

Insekten gegen das Plastik-Problem? - Teil A

-Plasticfacts-

Eine Plastiktüte ist im Durchschnitt etwa 25 Minuten in Gebrauch, benötigt aber 100-500 Jahre zum Abbau – je nach Sorte.³



So entdeckte die spanische Biowissenschaftlerin und Hobby-Imkerin Federica Bertocchini zufällig die Besonderheit der Wachsmottenlarven (*Galleria mellonella*).⁴

Die Wissenschaftlerin stellte die Hypothese auf, dass die Raupen das Plastik nicht nur durchlöchern, sondern fressen. Um dies zu überprüfen, wog sie die Plastiktüte bevor und nachdem sich die Wachsmottenlarven einige Zeit darin befanden.

³ mit Informationen aus: Struckemeier, Sieve und Kloppenburg (2015, S. 34)

⁴ mit Informationen aus: Groß (2017, S. 223)

Insekten gegen das Plastik-Problem? - Teil A

Experiment: Verändert sich die Masse einer PE-Tüte durch Wachsmottenlarven?

Durchführung:

- Die vor dir liegende Plastiktüte wurde vor dem Einsetzen der Wachsmottenlarven gewogen. Die Masse kannst du dem beiliegenden Zettel entnehmen.
- In die Tüte wurden ca. 10 Wachsmottenlarven gesetzt. Der Ansatz steht jetzt ca. 24 Stunden.
- Nimm die Tüte aus dem Gefäß und entferne daraus vorsichtig die Raupen. Du kannst hierfür Handschuhe benutzen oder einen Plastiklöffel zur Hilfe nehmen, wenn du möchtest.
- Setze die entnommenen Larven in das Gefäß zurück und schließe den Deckel wieder.
- Säubere die Plastiktüte mit einem trockenen Tuch. (Wachsmottenlarven spinnen sich gerne ein).
- Wiege nun die Plastiktüte. Falte sie dabei so, dass sie komplett auf der Waage aufliegt

Vergleich:

Masse der Tüte vorher	Masse der Tüte nachher
3,945 g	3,908 g

Auswertung:

- a) Wird die Hypothese der Wissenschaftlerin, dass die Wachsmottenlarven das Polyethylen fressen, bestätigt oder widerlegt? Begründe deine Antwort.

Der Befund bestätigt zwar die Hypothese, aber es sind noch weitere

Untersuchungen nötig. PE könnte auch nur mechanisch zerkleinert worden sein.

- b) Schätze ab, wie lange es dauern würde, bis die 10 Wachsmottenlarven die komplette Plastiktüte gefressen haben?

Etwa 2559 h / 107 Tage

- c) Sind Wachsmottenlarven die Lösung für unser Plastikproblem? Bedenke hierbei die Antwort zu b). Begründe deine Antwort.

Nein, da nur PE abgebaut wird und kein anderer Kunststoff. Außerdem dauert

es sehr lange. Aber mit mehr Forschung evtl. Potential.

Insekten gegen das Plastik-Problem? - Teil A

Federica Bertocchini und ihre Kollegen zeigten in einem Experiment, dass ca. 100 Wachsmottenlarven in 12 Stunden 92 mg einer PE-Plastiktüte fraßen. Außerdem konnten die Forscher mittels einer speziellen Infrarotspektroskopie das Abbauprodukt Ethylenglykol nachweisen.⁵

Lies den folgenden Kommentar-Verlauf. ⁶ Wie du siehst, sind sich Wissenschaftler nicht immer einig. Markiere Punkte, in denen diese Uneinigkeit deutlich wird.



Suche

Federica Bertocchini
7 Std. • ⚙️

Interessante Literatur ;)

**Polyethylene bio-degradation
by caterpillars of the wax
moth *Galleria mellonella***

https://ac.els-cdn.com/S0960982217302312/1-s2.0-S0960982217302312-main.pdf?_tid=8e54345c-0a89-11e8-9a58-0000aacb362&acdnat=1517844835_9fc62e723bfa17f6532c690a9580198a

59 96 Kommentare • 4 Mal geteilt

Louise Schumann
Wow, das ist ja erstaunlich!

Gefällt mir Antworten

⁵ mit Informationen aus: Bertocchini, Howe und Bombelli (2017, S. 929)

⁶ mit Informationen aus: Weber, Pusch und Opatz (S. R774)

Insekten gegen das Plastik-Problem? - Teil A



Carina W.

Ich würde nicht ganz so viel darauf geben, was da steht!

Gefällt mir

Antworten



Louise Schumann

Und wieso?

Gefällt mir

Antworten



Carina W.

In dieser Studie wurde gesagt, dass Ethylenglykol als Produkt des Abbaus nachgewiesen wurde. Aber mir **fehlt hier ein Kontrolleexperiment** – nämlich der **Vergleich mit reinem Ethylenglykol** auf einem PE-Film. Ich habe das mit meinen Kollegen untersucht und habe dabei ein **anderes Ergebnis** erhalten, als das, was Bertocchini und ihre Kollegen als Argumentationsgrundlage nutzen. Somit ist **Ethylenglykol gar nicht sicher nachgewiesen**. Die **Ergebnisse könnten** zum Beispiel **auch durch Proteine entstanden sein**. Abgesehen davon **fehlen an einigen Stellen Kontrolleexperimente**. Es gibt noch einiges mehr...

Wen es interessiert: https://ac.els-cdn.com/S096098221730862X/1-s2.0-S096098221730862X-main.pdf?_tid=ffb87df4-0a8b-11e8-89b5-0000aab0f27&acdnat=1517845892_b933261b36c93a342e3ef13f1119b9fd

Die Antwort auf unsere angebrachten Zweifel kann hier ebenfalls eingesehen werden.

Gefällt mir

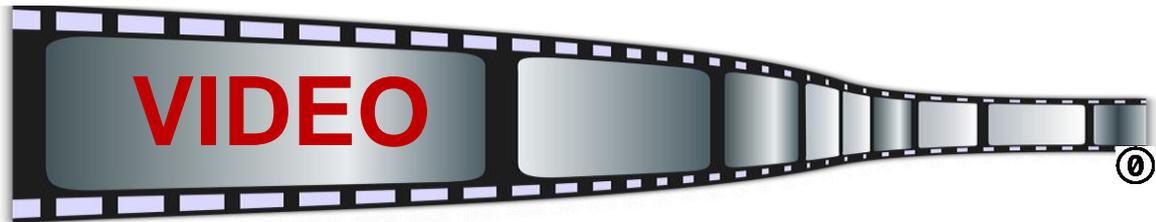
Antworten

Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

-Plasticfacts-

Styropor ist ein bekanntes Polystyrol-Produkt, welches als beständig gegenüber biologischem Abbau gilt. Im Jahr 2013 machte es schätzungsweise 7,1% des gesamten Kunststoffkonsums aus.⁷

Beobachte ca. 5 Minuten lang die vorliegenden Lebendansätze. Nutze hierfür die beiliegende Lupe.



Schau dir dann das Video „Mehlwürmer“ an.

Beobachtung:

Mehlwürmer fressen Styropor ganz auf. (Arbeit mit Mundwerkzeugen kann beobachtet werden)

Die Vermutung, dass die Larven das Styropor fressen, liegt nahe. Um diese Hypothese zu überprüfen und den Vorgang genauer zu untersuchen, wurden einige Experimente durchgeführt.

Experiment 1: Wie stark nimmt die Masse an Styropor ab?

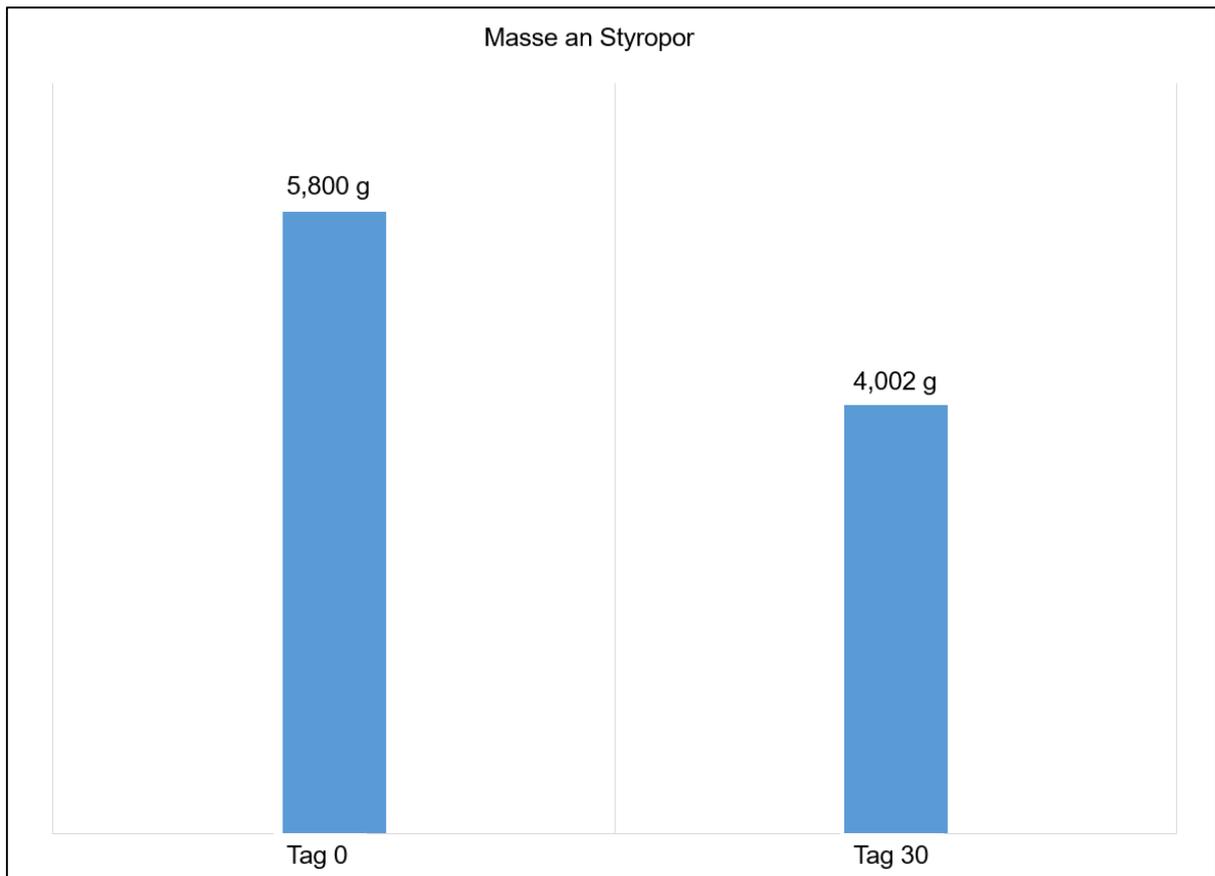
Bei diesem Experiment wurden die Mehlwürmer in einer Box platziert, in der sich Styroporstücke befanden. Es wurden drei Ansätze mit je ca. 500 Mehlwürmern unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Der Massenverlust des Styropors wurde gemessen.⁸

⁷ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S. 12080)

⁸ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S. 12081)

Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

Ergebnis⁹:



Schlussfolgerung:

Gib an, wie viel Prozent des Styropors im Experiment abgebaut wurden.

31 %

Die Wissenschaftler konnten außerdem beweisen, dass die langkettigen Polystyrol-Moleküle depolymerisiert werden. Die im Styropor gebundenen Kohlenstoffatome werden durch die Mehlwürmer zu Kohlenstoffdioxid, etwas Biomasse und Kot verwertet.¹⁰

Experiment 2: Ist das Fressen von Styropor schädlich für Mehlwürmer?

In diesem Experiment wurden Überlebensraten von Mehlwürmern, die mit Styropor gefüttert wurden, mit denen von Mehlwürmern verglichen, die mit Kleie gefüttert wurden. Unterschieden sich die Lebenszyklen stark?

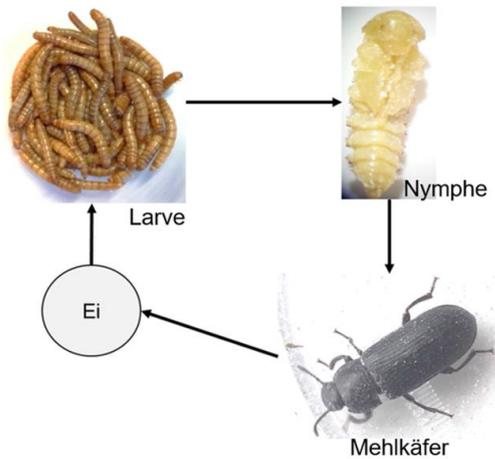
⁹ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S. 12081)

¹⁰ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S.12080)

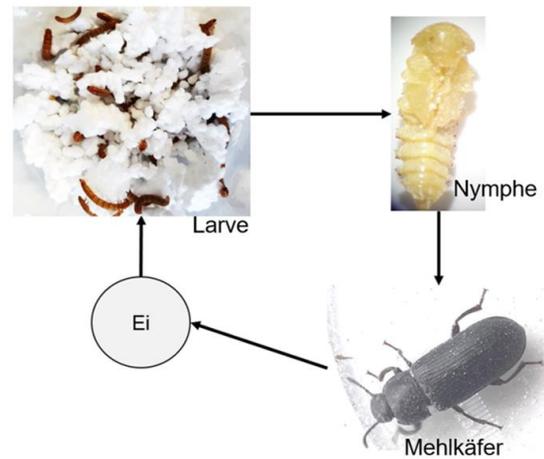
Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

Ergebnisse¹¹:

Lebenszyklen der jeweiligen Ansätze



Kontrollansatz



Ansatz mit Mehlwürmern, die nur Styropor zu fressen bekamen

Die Larven verpuppten sich etwa einen Monat später.

Dies ist kein signifikanter Unterschied.¹²

Vergleich:

Die Verpuppung dauert bei dem Ansatz mit Styropor einen Monat länger.

Ansonsten unterscheiden sich die Lebenszyklen / die Entwicklungen nicht.

Schlussfolgerung bezüglich der Ausgangsfrage:

Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Fütterung von Styropor keinen

negativen Effekt auf die Mehlwürmer hat.

¹¹ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S. 12082)

¹² mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang et al. (2015, S. 12082)

Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

Nun stellte sich noch die Frage, wie die Tiere das Polystyrol verdauen. Da der Darm der Mehlwürmer viele Mikroorganismen enthält, die eine wichtige Rolle bei der Verdauung von Futter spielen, wurde die Vermutung aufgestellt, dass diese auch wichtig für die Verdauung des Polystyrols sind.

Experiment 3: Wie wird das Polystyrol durch Mehlwürmer verdaut?

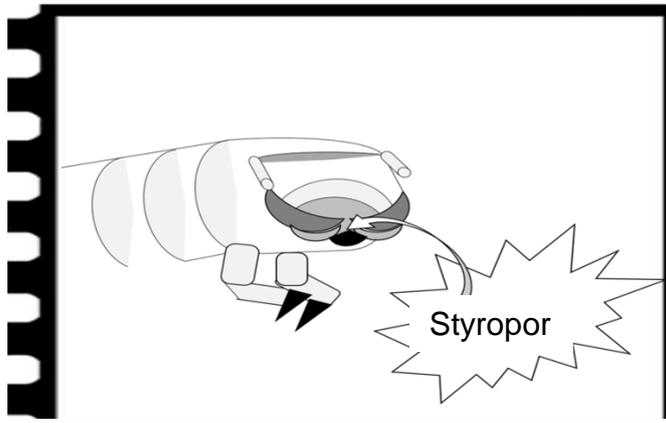
In diesem Experiment wurde nachgewiesen, dass Antibiotika die Fähigkeit der Mehlwürmer, Polystyrol abzubauen, hemmen. Es konnte weiterhin ein Bakterienstamm aus dem Mehlwurmdarm isoliert werden. Dieser veränderte die Polystyrol-Oberfläche und bewirkte einen Massenverlust. Diese Ergebnisse zeigen die wichtige Rolle von Darmbakterien beim Polystyrol-Abbau durch Mehlwürmer. In Zusammenhang mit diesen Ergebnissen wurde ein Schema zur Verdeutlichung der einzelnen Schritte erarbeitet.¹³

¹³ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang (2015, S. 12087-12092)

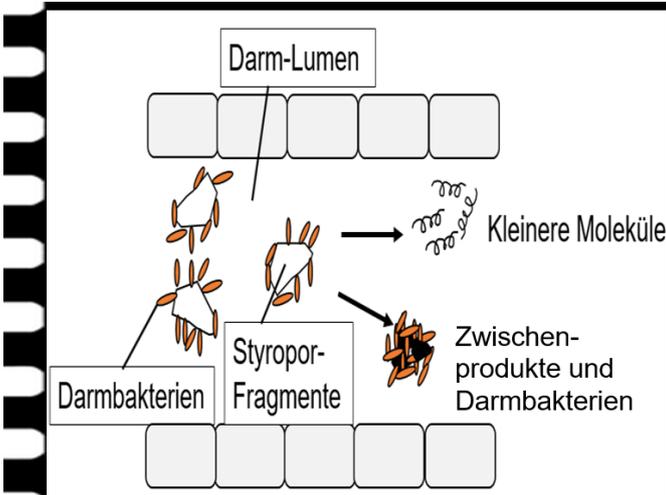
Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

Beschreibe den Ablauf der Verdauung mit Hilfe der Filmleiste¹⁴. Nutze hierfür die Begriffe im Kasten.

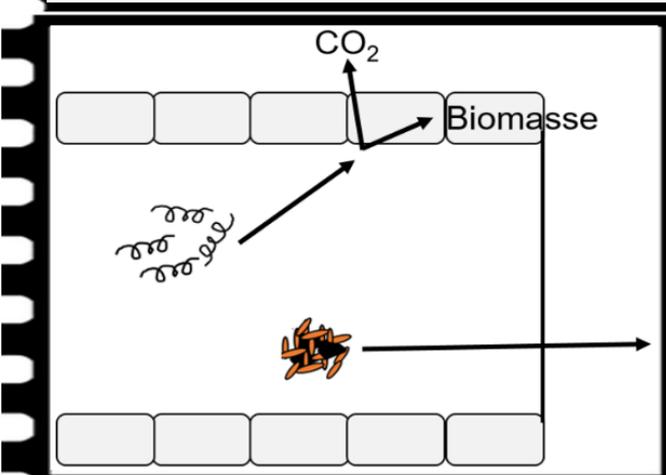
Kohlenstoffdioxid	ausgeschieden	Darmbakterien	Styropor-Fragmente	kaut
kleinere		Mundwerkzeugen	Zwischenprodukte	



Der Mehlwurm kaut _____ das
 Styropor mit seinen
Mundwerkzeugen _____.
 Dadurch wird es mechanisch zerkleinert.



Es entstehen kleinere
Styropor-Fragmente _____. Sie werden
 mit den Darmbakterien _____ vermischt.
 Diese erzeugen kleinere _____ Moleküle
 durch Depolymerisation. Außerdem
 entstehen verschiedene Zwischenprodukte _____.



Die Moleküle werden durch weitere
 Bakterien zu _____ Kohlenstoffdioxid
 mineralisiert.
Zwischenprodukte, einige Darmbakterien
 und eventuell unverdautes Styropor werden
ausgeschieden _____.

¹⁴ mit Informationen aus: Yang, Yang, Wu, Zhao, Song, Gao und Yang (2015, S. 12087-12092)

Insekten gegen das Plastik-Problem? – Teil B

Sind Mehlwürmer die Lösung für unser Plastik-Problem? Bedenke bei deiner Antwort besonders den zeitlichen Faktor sowie die Anzahl der Mehlwürmer.

Eigene Entscheidung. Dabei soll Folgendes beachtet werden: Es dauert recht

lange (auch wenn es schneller geht als bei Wachsmottenlarven). Außerdem wird

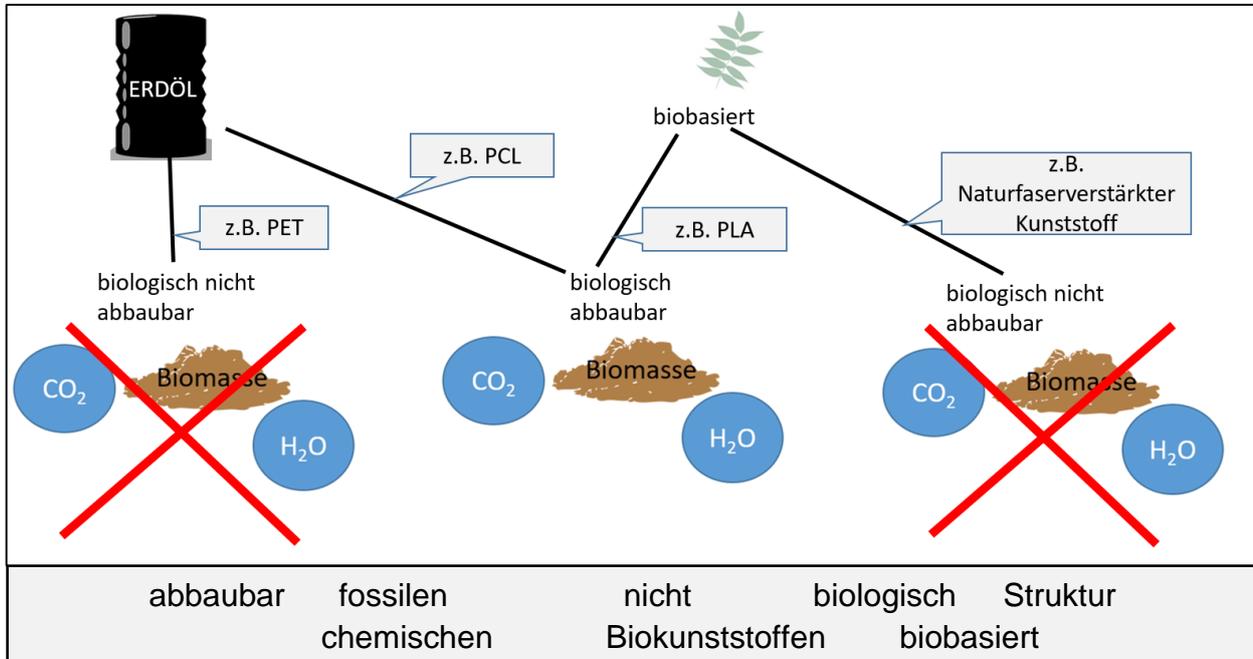
nur Styropor gefressen. Bekommen wir dann ein Mehlwurmproblem?!

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

-Plasticfacts-

Abfallsäcke, Tragetaschen, Einweggeschirr, Mulchfolien, Blumentöpfe und Füllmaterial für Verpackungen bestehen bereits häufig aus Bioplastik.¹⁵

Nutze das unten stehende Schema¹⁶, um den Lückentext auszufüllen. Verwende die Begriffe im Kasten.



Biokunststoffe, die komplett oder teilweise aus nachwachsenden Rohstoffen entstehen, bezeichnet man als biobasiert. Sie können entweder biologisch abbaubar sein oder nicht. Es gibt auch biologisch abbaubare Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen. Das zeigt, dass die biologische Abbaubarkeit von der chemischen Struktur und nicht von der Rohstoffbasis abhängt. Biologisch nicht abbaubare Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen zählen nicht zu den Biokunststoffen.

¹⁵ mit Informationen aus: Beier (2009, S. 5)

¹⁶ mit Informationen aus: Beier (2009, S. 4)

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

Um biologisch nicht abbaubare Kunststoffe aus fossilen Rohstoffen durch Biokunststoffe ersetzen zu können, ist viel Forschung nötig. Zur Einschätzung darüber, ob und in welchem Ausmaß Biokunststoffe besser für die Umwelt sind, werden diese häufig mit herkömmlichen Kunststoffen mit ähnlichen Eigenschaften verglichen. In den nachfolgenden Versuchen sollst du eine Folie aus Kartoffelstärke mit einer herkömmlichen Frischhaltefolie aus PE vergleichen.

Experiment: Ist die hergestellte Bioplastik-Folie durch Amylase abbaubar?

Fakten-Box:

- Stärke kann mit Iod-Kaliumiodid-Lösung nachgewiesen werden. Es tritt eine Blaufärbung ein.
- Amylase ist ein Enzym, das Stärke abbaut.
- Amylase kommt in vielen Mikroorganismen, Pilzen und auch im menschlichen Speichel vor.

Durchführung:

- Lege zwei Petrischalen mit angefärbter Bioplastik-Folie auf die Heizplatte (neben das vorbereitete 42°C warme Wasserbad).
- Nimm ein Wattestäbchen in den Mund.
- Streiche mit dem Stäbchen möglichst viel Speichel über die eine Folie. Nimm einen Glasstab zur Hilfe, um die Folie etwas festzuhalten.
- Lass die Petrischalen für 5 min auf der Heizplatte und bestreiche die eine Folie jede Minute erneut mit Speichel.
- Danach lässt du die Folien weitere 5 min auf der Heizplatte liegen ohne sie zu bestreichen.
- Vergleiche die beiden Folien.

Beobachtung:

Die Folie, die mit Speichel behandelt wurde, entfärbt sich mit der Zeit.

Die nicht behandelte Folie bleibt unverändert blau gefärbt.

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

Auswertung:

- a) Ist die Stärkefolie durch Amylase abbaubar? Begründe deine Antwort kurz. Schätze ab, wie lange es etwa dauern würde, bis das vorliegende Stück Folie in einer Amylase-Lösung komplett abgebaut wäre.

Ja. Dauer abschätzen. (ca. 2-3 Tage je nach Dicke der Folie)

- b) Kreuze Zutreffendes an. Die untersuchte Folie ist...

- aus fossilen Rohstoffen biobasiert
 biologisch abbaubar biologisch nicht abbaubar

Experiment: Wie unterscheiden sich Bioplastik-Folie und Frischhaltefolie?

Durchführung:

- Nutze die Bioplastik-Folie, die nicht angefärbt ist.
- Vergleiche die beiden Folien bezüglich ihrer Eigenschaften.
 - Reißfestigkeit, Aussehen, Handhabung beim Verpacken von Lebensmitteln
- Vergleiche die beiden Folien bezüglich ihres Verhaltens gegenüber Wasser
 - Lege beide Folien für ca. 10 min in ein Becherglas voller Leitungswasser.
- Vergleiche die beiden Folien bezüglich ihrer Abbaubarkeit
 - Nutze die ausgelegten Ansätze (bzw. die ausliegenden Fotos).

Beobachtung:

	Frischhaltefolie	Kartoffelstärkefolie
Reißfestigkeit	Dehnt sich, bevor sie reißt	Reißt schnell
Aussehen	Klar, gleichmäßig dick	Nicht klar, unregelmäßig dick, generell dicker
Handhabung beim Verpacken	leicht	Schwieriger, hält nicht so gut zusammen
Verhalten gegenüber Wasser	Keine Änderung	Folie wird glitschig und weicher
Abbaubarkeit	Nach 30 Tagen nicht abgebaut	Nach 30 Tagen abgebaut

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

Auswertung: Notiere Vor- und Nachteile der Stärkefolie.

Vorteile der Stärkefolie gegenüber der Frischhaltefolie	Nachteile der Stärkefolie gegenüber der Frischhaltefolie
Abbaubarkeit Aus nachwachsenden Rohstoffen	Nicht so leicht handhabbar Veränderung der Eigenschaften durch Wasser

Bewertung: Ist Bioplastik wirklich so „Bio“?

Lies den ausliegenden Comic.¹⁷ Notiere die hier genannten Vor- und Nachteile der Biokunststoffe bezüglich ihrer Ökobilanz.

	
<ul style="list-style-type: none">- Biologisch abbaubar (teilweise)- Aus nachwachsenden Rohstoffen (teilweise)- Bessere Ergebnisse in Kategorien Klima und Ressourcenverbrauch bei PLA-Bechern im Vgl. zu PS-Bechern	<ul style="list-style-type: none">- Nicht notwendigerweise biologisch abbaubar- Können auch aus fossilen Rohstoffen sein- Ressource Fläche = begrenzt- Verursachen auch Treibhausgasemissionen- Schlechtere Ergebnisse in Kategorien Versauerung und Eutrophierung bei PLA-Bechern im Vgl. zu PS-Bechern

Deine Meinung ist gefragt: Sind Biokunststoffe die Lösung für unser Plastik-Problem? Begründe deine Antwort. Wenn nicht, was könnte dann eine Lösung sein?

ZUSAMMENFASSUNG- Lösungen siehe Lösungszettel

¹⁷ mit Informationen aus: Detzel, Kauertz und Derreza-Greeven (2012, S. 40-85)

Mit „Bio“ gegen das Plastik-Problem?

Literaturverzeichnis

- Andrady, Anthony L. (2015): *Plastics and environmental sustainability*. Hoboken: Wiley.
- Beier, W. (2009): *Biologisch Abbaubare Kunststoffe*. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biologisch-abbaubare-kunststoffe>, zugegriffen am 01.02.2018.
- Bertocchini, F.; Howe, C. J.; Bombelli, P. (2017): Polyethylene bio-degradation by caterpillars of the wax moth *Galleria mellonella*. In: *Current Biology*, 27, R292-R293. Verfügbar unter https://ac.els-cdn.com/S0960982217302312/1-s2.0-S0960982217302312-main.pdf?_tid=c3dc9d88-0801-11e8-82a6-00000aacb35f&acdnat=1517566611_3d71f5495ff0f6a58b197ba2b286d22b, zugegriffen am 02.02.2018.
- Detzel, A.; Kauertz, B.; Derreza-Greeven, C. (2012): *Untersuchung der Umweltwirkungen von Verpackungen aus biologisch abbaubaren Kunststoffen*. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Groß, M. (2017): Raupen zerlegen PE: Eine hungrige kleine Raupe frisst Löcher in Plastiktüten - aber könnte sie auch helfen, unser Müllproblem zu lösen? In: *Chemie in unserer Zeit*, (51), S. 223. Verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ciuz.201770405/pdf>, zugegriffen am 02.02.2018.
- Struckemeier, S.; Sieve, B.; Kloppenburg, J. (2015): *Biokunststoffe: Eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen? Material - Zahlen und Daten*. In: *Unterricht Chemie: Nachwachsende Rohstoffe*, 26 (146), S. 34.
- Weber, C.; Pusch, S.; Opatz, T.: Polyethylene bio-degradation by caterpillars? In: *Current Biology*, 2017 (27). Verfügbar unter https://ac.els-cdn.com/S096098221730862X/1-s2.0-S096098221730862X-main.pdf?_tid=ffb87df4-0a8b-11e8-89b5-00000aab0f27&acdnat=1517845892_b933261b36c93a342e3ef13f1119b9fd, zugegriffen am 05.02.2018.
- Yang, Y.; Yang, J.; Wu, W.-M.; Zhao, J.; Song, Y.; Gao, L.; Yang, R.; Jiang, L. (2015): Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 1: Chemical and Physical Characterization and Isotopic Tests. In: *Environmental Science & Technology*, 49 (20). Verfügbar unter <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.5b02661>, zugegriffen am 02.02.2018.
- Yang, Y.; Yang, J.; Wu, W.-M.; Zhao, J.; Song, Y.; Gao, L.; Yang, R. (2015): Biodegradation and Mineralization of Polystyrene by Plastic-Eating Mealworms: Part 2: Role of Gut Microorganisms. In: *Environmental Science & Technology*, (49). Verfügbar unter <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.5b02663>, zugegriffen am 05.02.2018.

Zu viel Plastik –
Auf der Suche nach einem Ausweg

Für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufe 10



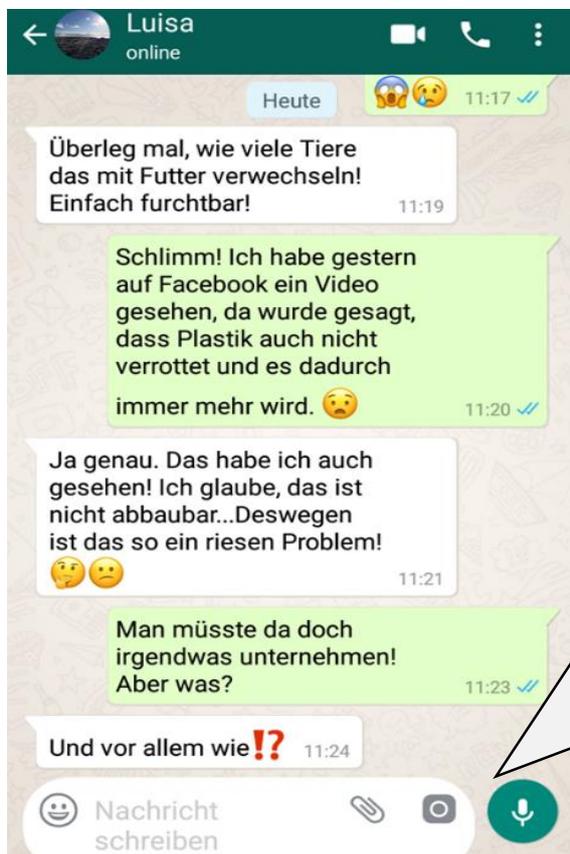
Enzyme gegen das Plastik-Problem?

Recycling gegen das Plastik-Problem?

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

-Plasticfacts-

2015 wurden allein in Deutschland 5,92 Mio. Tonnen Plastikmüll produziert.¹ In der Chemie wird Plastik meist als Kunststoff bezeichnet.



Kunststoffmüll und seine Auswirkungen auf die Umwelt sind problematisch. In dem Chat mit Luisa wird dies am Beispiel des Kunststoffmülls im Meer deutlich. Du sollst heute verschiedene Ansätze kennenlernen, in denen man versucht dem Plastik-Problem zu begegnen. Denn um wirklich etwas unternehmen zu können, ist Hintergrundwissen nötig! Schaffst du es im Labor, so viel zu lernen, dass du einen Ausweg aus dem Plastik-Problem findest?

¹⁸ mit Informationen aus: Struckemeier, Sieve und Kloppenburg (2015, S. 35)

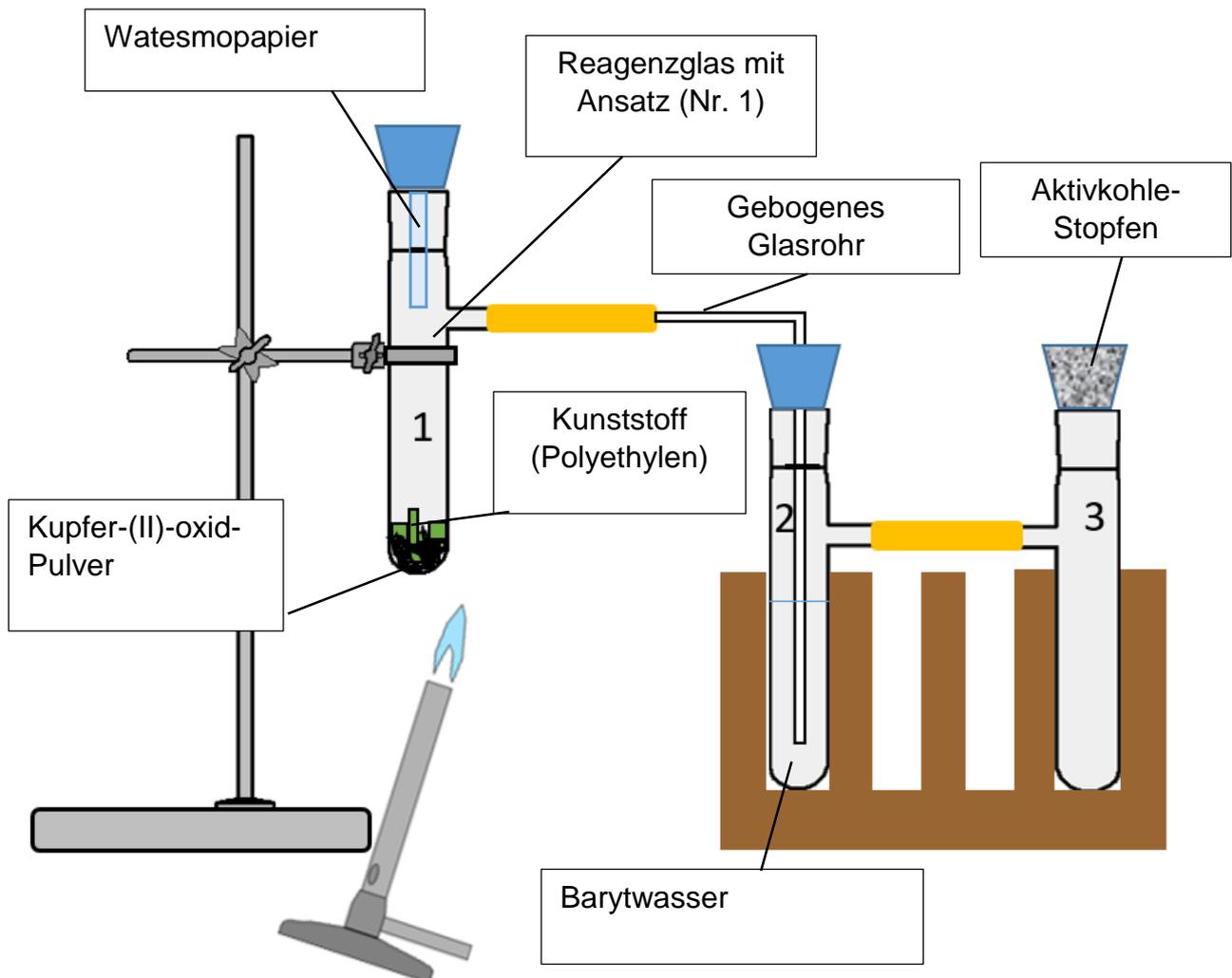
Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

Experiment: Kann Kunststoff abgebaut werden?

In dem Chat mit Luisa heißt es: „Ich glaube, das ist nicht abbaubar...“. Führe das Experiment durch, um herauszufinden, ob das wirklich stimmt.

Versuchsaufbau:

Beschrifte die Abbildung mit Hilfe der Versuchsanleitung.



Fakten-Box:

- Barytwasser bildet mit Kohlenstoffdioxid einen weißen Niederschlag.
- Wasser kann mit Watesmopapier durch eine dunkelblaue Färbung nachgewiesen werden.

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

Vorbereitung:

- Gib ca. einen Daumen breit von dem *zerschnittenen Kunststoff* in das *Reagenzglas mit Ansatz* (Reagenzglas **Nr. 1**).
- Gib 5 Spatel fein gepulvertes *Kupfer(II)-Oxid* hinzu.
- Klemme das Reagenzglas **Nr. 1** in das Stativ.
- Befülle das zweite Reagenzglas mit Ansatz (**Nr. 2**) mit 15 ml *Barytwasser* und stelle es in einen Reagenzglasständer.
- Tauche das eine Ende des *gebogenen Glasrohrs* in das Barytwasser und verbinde es durch das Schlauchstück mit dem Ansatz des Reagenzglases **Nr. 1**.
- Nimm ein Stück *Watesmopapier* und klemme es mithilfe eines Stopfens an den oberen Rand des Reagenzglases **Nr. 1**.
- Verbinde den Ansatz des Reagenzglases **Nr. 2** über einen Schlauch mit dem Ansatz des Reagenzglases **Nr. 3**.
- Setze einen *Aktivkohle-Stopfen* auf Reagenzglas **Nr. 3**.
- Alle Verbindungsstücke und Stopfen müssen möglichst fest sitzen.

Versuchsdurchführung:

- Entzünde den Brenner und erhitze mit rauschender Flamme das Kunststoff-Kupferoxid-Gemisch so lange, bis sich weiße Dämpfe bilden und nur noch ein schwarz-roter Rückstand im Reagenzglas zu sehen ist.
Nimm den Brenner dafür vorsichtig in die Hand und erhitze das Kunststoff-Kupferoxid-Gemisch im Reagenzglas schräg von unten.
- Stelle nun den Brenner aus.
- Lass die Apparatur nach Beenden des Experiments so stehen.

Beobachtung:

Das Watesmopapier färbt sich blau. Es entsteht ein weißer Niederschlag mit

Barytwasser. Der Kunststoff schmilzt erst, dann entstehen weiße Dämpfe.

Die Rückstände sind kupferfarben und schwarz.

Auswertung:

c) Vervollständige die Wortgleichungen.



Die ablaufende Reaktion nennt man Redoxreaktion.

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?

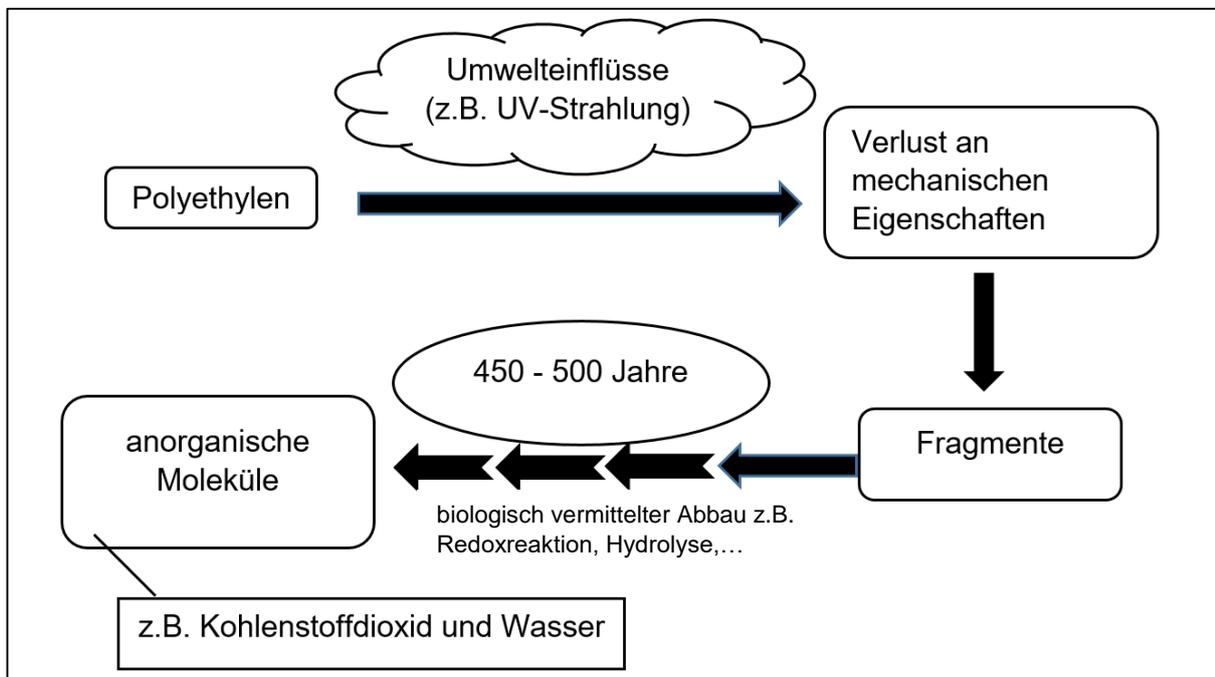
d) Ergänze den Lückentext

Kunststoffmoleküle bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoff –Atomen und Wasserstoff –Atomen. Je nach Kunststoffsorte können zusätzlich beispielsweise noch Sauerstoff-, Stickstoff- oder Chloratome vorhanden sein.

Schlussfolgerung: Vervollständige das Flussdiagramm¹⁹ zum Abbau von Kunststoff am

Beispiel von Polyethylen. Nutze dafür folgende Begriffe.

Polyethylen	450-500 Jahre
anorganische Moleküle	Kohlenstoffdioxid und Wasser



Der letzte Schritt eines solchen Abbaus wird *Mineralisierung* genannt. Dieser Prozess findet so bei allen Kunststoffarten statt, wobei die Dauer variiert.

Bewertung:

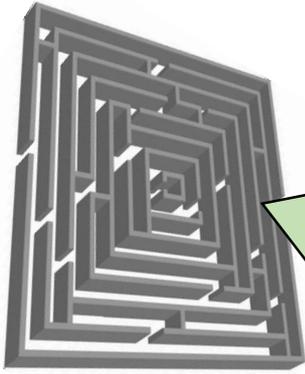
Hat Luisa mit ihrer Aussage „**Ich glaube, das ist nicht abbaubar...**“ recht? Begründe deine Antwort.

Da die Mineralisierung von Plastik meist sehr lange dauert (z.B. 450-500 Jahre bei Polyethylen), bezeichnen es viele als „nicht abbaubar“. Dies stimmt jedoch nicht.

Der Abbau findet statt, allerdings bei den meisten Kunststoffarten sehr langsam.

¹⁹ mit Informationen aus: Andradý (2015, S. 145-146)

Zu viel Plastik – Findest du einen Ausweg?



Das Problem ist deutlich: Zu viel Plastikmüll, zu viel davon in der Natur und zu lange Zeit, die es dort verbleibt. Begib dich nun auf die Suche nach einem Ausweg aus dem Plastik-Problem. Bearbeite dafür die verschiedenen Stationen. Die Reihenfolge ist dabei nicht wichtig. Lies die Aufgabenstellungen immer sorgfältig durch. Vielleicht findest du ja eine Lösung...

Enzyme gegen das Plastik-Problem?

-Plasticfacts-

Es wurden Enzyme in Pilzen und Bakterien entdeckt, die langkettige Kunststoffmoleküle hydrolysieren können. Ein solches Enzym ist beispielsweise das sogenannte *CalB*, welches Kunststoffe wie PET hydrolysieren kann.³

Frequently Asked Questions...

Was heißt „hydrolysieren“ und wofür ist das Ganze gut?

Bei der Hydrolyse werden die langkettigen Moleküle unter Beteiligung von Wasser in kleinere Moleküle gespalten.

Diese können dann in die Zellen aufgenommen und weiter verstoffwechselt werden.⁴ Abgesehen davon kann man, die entstandenen Moleküle auch isolieren und daraus wieder neue Kunststoffmoleküle herstellen.

Normalerweise erfolgt diese Art von Recycling unter hohen Drücken und Temperaturen, was die Umwelt allerdings sehr belastet.

Durch den Einsatz von Enzymen kann der Abbau unter mildereren Bedingungen stattfinden.⁵ Dieses Verfahren ist also umweltschonender. Hierzu ist aber noch weitere Forschung nötig.

Um ein solches Recycling möglichst einfach und günstig durchführen zu können, sind leicht handhabbare Enzyme hilfreich. Ein solches Enzym ist zum Beispiel *CalB*, das aus dem Pilz *Candida antarctica* gewonnen werden kann.²³

Experiment: Finde heraus, ob *CalB* den Kunststoff PCL hydrolysieren kann.

Fakten-Box:

- PCL findet hauptsächlich in der Medizin Anwendung (z.B. Wundkleber). Aber auch die sogenannten „Gorilla-Perlen“, die man zuhause als einfach formbare Modelliermasse benutzen kann, bestehen aus PCL.
- Aus „Gorilla-Perlen“ lassen sich Nanopartikel herstellen. Diese haben eine enorm große Oberfläche im Vergleich zu ihrem Volumen, was eine große Angriffsfläche für Enzyme bietet.

²⁰ mit Informationen aus: Wei und Zimmermann (2017b, S. 7)

²¹ mit Informationen aus: Wei und Zimmermann (2017b, S. 2-3)

²² mit Informationen aus: Wei und Zimmermann (2017a, S. 2)

²³ mit Informationen aus: Liu (2009, S. 2)

Enzyme gegen das Plastik-Problem?

Durchführung:

- Nutze das ausliegende Modell, um dich über die Funktionsweise eines Photometers zu informieren.

Woran kannst du erkennen, ob das PCL abgebaut wird? Kreuze an:

Im Falle der Hydrolyse... ... nimmt die Extinktion zu.

... bleibt die Extinktion gleich.

... nimmt die Extinktion ab.

- Verwende die ausliegende Versuchsanleitung für die Durchführung des Experiments. Nutze die Wartezeiten, um die nachfolgenden Aufgaben zu bearbeiten.

Messdaten:

Fülle die Tabellen aus.

Versuchsansatz mit <i>CalB</i>	
Zeit [Minuten]	Extinktion bei 600 nm
0	0,269
2	0,261
4	0,247
6	0,232
8	0,216

Gegenprobe ohne <i>CalB</i>	
Zeit [Minuten]	Extinktion bei 600 nm
0	0,269
2	0,270
4	0,269
6	0,268
8	0,268

Auswertung: Wird PCL durch *CalB* hydrolysiert?

Ja

**Frequently
Asked
Questions...**

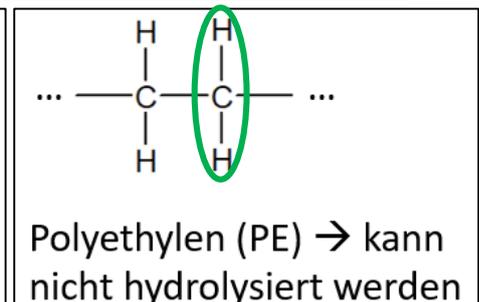
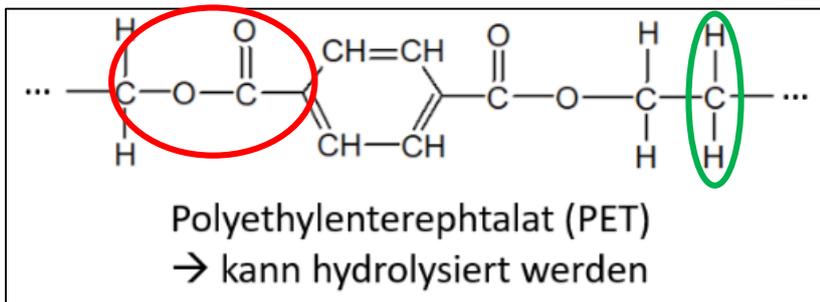
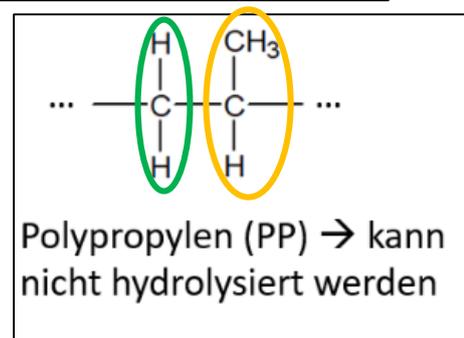
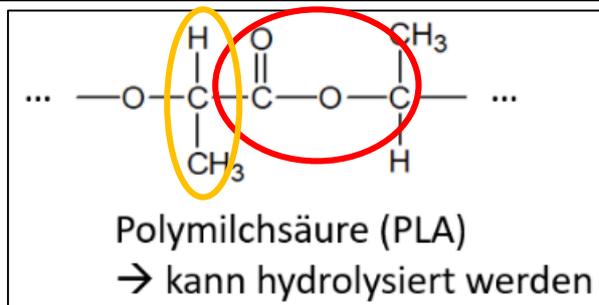
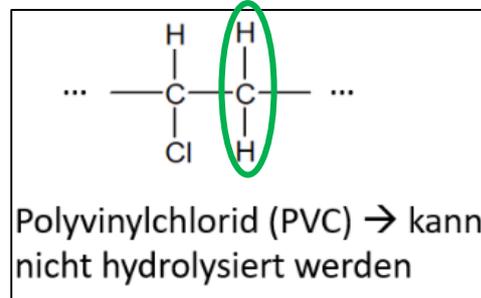
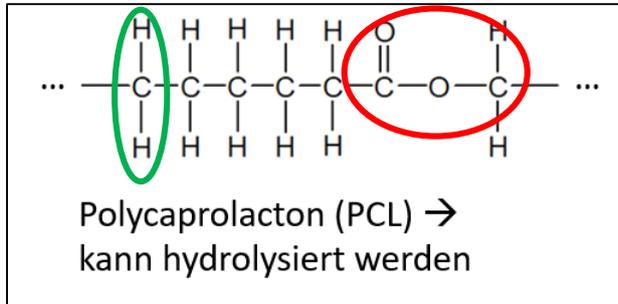
Bei der Hydrolyse werden langkettige Moleküle in kleinere Moleküle gespalten. Die Hydrolyse ist aber nicht bei allen Kunststoffen möglich. Was ist entscheidend dafür, dass die langkettigen Moleküle hydrolysiert werden können? Und wie läuft eine Hydrolyse genau ab?

Bearbeite die folgenden Aufgaben, um diese Fragen beantworten zu können!

Enzyme gegen das Plastik-Problem?

Aufgabe 1:

Unten sind Strukturformeln von Kunststoffen aufgezeichnet. Einige davon können hydrolysiert werden, Andere nicht.²⁴ Vergleiche die Strukturformeln. Markiere gleichartige Strukturelemente mit der gleichen Farbe.



Welches Strukturelement ist dafür verantwortlich, dass der Kunststoff hydrolysiert werden kann?

Estergruppe

IMPORTANT



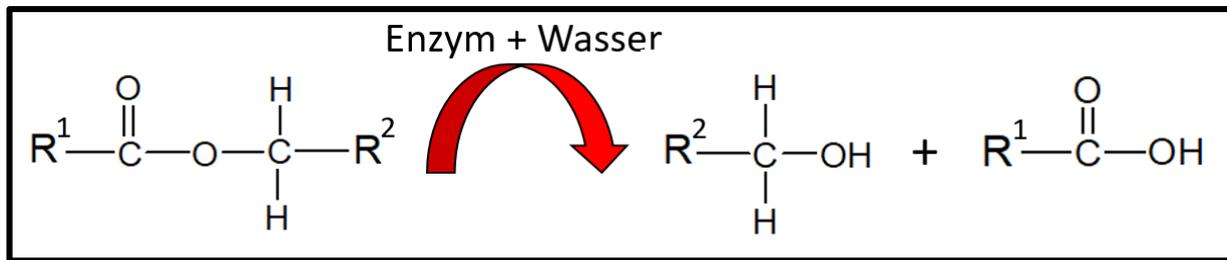
Damit die langkettigen Moleküle durch Hydrolyse in kleinere Moleküle gespalten werden können, um diese dann recyceln zu können, muss sich das gerade herausgefundene Strukturelement in der Hauptkette des Kunststoffmoleküls befinden.

²⁴ mit Informationen aus: Wei und Zimmermann (2017b, S. 1-4)

Enzyme gegen das Plastik-Problem?

Aufgabe 2:

Verwende das Schema, um den Lückentext zu ergänzen.



Bei der Hydrolyse von Kunststoffen durch Enzyme wird die

 Estergruppe gespalten. Es entstehen ein Alkohol und
eine Carbonsäure .

Deine Meinung ist gefragt: Ist die enzymatische Hydrolyse und das anschließende Recycling, der dabei entstandenen kleineren Moleküle, die Lösung für das Plastik-Problem?

- Ja
- Nein
- Teils

Kurze Begründung deiner Entscheidung:

 Eigene Entscheidung. Bei Begründung soll beachtet werden, dass die
 enzymatische Hydrolyse sehr lange dauert und für einen schnelleren Abbau eine
 Vorbehandlung (Herstellung von Nanopartikeln) nötig wäre. Außerdem ist sie nicht
 für alle Kunststoffe möglich, bietet aber sicher Potential.

Recycling gegen das Plastik-Problem?

-Plasticfacts-

Die Menge an Kunststoffabfall in Deutschland stieg im Zeitraum von 1994 bis 2015 von 2,80 auf ca. 5,92 Mio. Tonnen. Das ist ein Anstieg von über 100 %.⁸



Schau dir das Video zum Recycling an und beantworte die Fragen. Kreise die richtige Antwort ein.

<p>Plastik und Co</p> <p>Die Arten von Recycling sind: werkstoffliches Recycling, rohstoffliches Recycling und...?</p>	<p>Plastik und Co</p> <p>Beim rohstofflichen Recycling werden langkettige Kunststoffmoleküle...</p>
<p>feinstoffliches Recycling</p>	<p>energetische Verwertung</p>
<p>Biologische Verwertung</p>	<p>fossiles Recycling</p>
<p>in kleinere Moleküle gespalten.</p>	<p>wieder zu Erdöl verarbeitet.</p>
<p>mit Erdgas vermischt.</p>	<p>verkettet.</p>
<p>Plastik und Co</p> <p>Spritzgießen ist eine ausgefeilte Technik, bei der...?</p>	<p>Plastik und Co</p> <p>Eine verschlechterte Qualität von Recyclingprodukten entsteht unter anderem wodurch?</p>
<p>Kunststoff in dünne Fäden gezogen wird.</p>	<p>Kunststoff aufgeschäumt wird.</p>
<p>Kunststoff eingeschmolzen und neu geformt wird.</p>	<p>Kunststoff gepresst wird.</p>
<p>Größe des eingesetzten Granulats</p>	<p>Sortenunreinheit</p>
<p>Form des eingesetzten Granulats</p>	<p>Alter des Kunststoffabfalls</p>

²⁵ mit Informationen aus: Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016, S. 19)

Recycling gegen das Plastik-Problem?

Plastik und Co

Das Aufschmelzen von Kunststoff-Granulat beim Spritzgießen wird wie genannt?

verplastiken einplastizieren

plastieren **plastifizieren**

Im Film wird betont, dass für ein gutes werkstoffliches Recycling über die Spritzgießmethode sortenreines Ausgangsmaterial wichtig ist. Finde im nachfolgenden Experiment heraus warum.

Experiment: Warum ist Sortenreinheit wichtig?

Vorbereitung:

- Fette den Plätzchenausstecher aus Metall sorgfältig mit Creme ein.
- Fette die Fläche der Alufolie (ca. 10 cm x 10 cm) ebenfalls ein.
- Leg die Ausstechform auf die Alufolie und fülle sie mit **einer Sorte** Plastik. Die Form muss gleichmäßig und mindestens halbhoch gefüllt sein.
- Nimm die Alufolie vorsichtig mit zwei Händen so hoch, dass kein Plastik aus der Ausstechform rutscht.
- Lege die Folie samt gefüllter Ausstechform auf die Heizplatte.

Versuchsdurchführung:

- Schalte die Heizplatte ein (volle Heizleistung).
 - Warte, bis das Plastik komplett geschmolzen ist.
 - Schalte dann die Heizplatte aus und nimm die Ausstechform hinunter, indem du die Alufolie mit zwei Pinzetten vorsichtig anhebst.
 - Achte darauf, dass die Ausstechform nicht verrutscht und das Plastik nicht hinausfließt.
 - Lege die Alufolie samt Ausstechform auf den Labortisch und lass alles abkühlen.
 - Wenn die Ausstechform abgekühlt ist, zieh vorsichtig die Alufolie ab und löse das festgewordene Plastik heraus.
- ➔ Führe das Experiment nun mit der Mischung aus drei verschiedenen Plastiksorten durch.

Tipp: Nutze Wartezeiten, um bereits die nachfolgenden Aufgaben zu bearbeiten.

Recycling gegen das Plastik-Problem?

Beobachtung:

Vergleiche die entstandenen Recyclingprodukte aus den sortenreinen Materialien mit dem, welches aus der Mischung entstanden ist.

Sortenrein	Nicht Sortenrein
Gleichmäßige Farbe	Ungleichmäßige Farbe
Gleichmäßig verschmolzen	Ungleichmäßig verschmolzen
Keine einzelnen Stücke mehr erkennbar	Einzelne Sorten/Stücke teilweise erkennbar

Auswertung:

Begründe die Wichtigkeit der Sortenreinheit bei Werkstofflichem Recycling. Berücksichtige, was passiert, wenn das Material nicht sortenrein ist.

Für Qualitätssicherung wichtig. Wenn nicht sortenrein, verändert sich das

Aussehen des Produkts, man erkennt die einzelnen Bestandteile (keine

einheitliche Oberfläche)

Deutschland ist Recycling-Meister!

2015 wurden über 99 % des Plastikmülls recycelt.

Laut Umweltbundesamt wurden im Jahr 2015 unter voller Berücksichtigung von energetischer Verwertung in effizienten Müllverbrennungsanlagen mit Energiekopplung über 99 % des gesamten Kunststoffmülls verwertet. Von den ca. 5,92 Millionen Tonnen Plastikmüll wurden ca. 45 % werkstofflich, 1 % rohstofflich und 53 % energetisch verwertet.⁹

Die Zahlen in dem Artikel „Deutschland ist Recycling-Meister“ sind beeindruckend. Allerdings berücksichtigen sie auch Kunststoffabfälle, die nicht in Deutschland selbst recycelt wurden. Die Recyclingmengen repräsentieren also nicht die Mengen, die bei deutschen Recyclern verarbeitet werden. Deutschland exportiert ca. 1,4 Mio. Tonnen Kunststoffmüll in andere Länder, die diesen dann aber nur teilweise verwerten.¹⁰

²⁶ mit Informationen aus: Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016, S. 17)

²⁷ mit Informationen aus: Fulterer (18.01.2018, S. 26)

Recycling gegen das Plastik-Problem?

„**Deutschland ist Recycling-Meister!**“ Bewerte diese lobende Überschrift stichpunktartig. Nutze dafür die ausliegenden Infokärtchen und die Grafik zum Kunststoffmüllexport.

(Recycling schließt auch Verbrennung zur Energiegewinnung ein)

Es wird viel Abfall exportiert, wobei nicht immer transparent ist, wo der Müll landet.

In den Exportländern herrschen schlechtere Umwelt- und Sozialstandards. Häufig

wird der Abfall dort gar nicht recycelt, sondern vergraben o.Ä. Die deutschen

Firmen können nicht konkurrieren, weshalb hier weniger recycelt wird.

Das Lob ist also mit Vorsicht zu genießen!

Nutze die ausliegende Grafik und ergänze.

Die drei größten Importländer von deutschem Plastikmüll sind China

(inklusive Honkong), Niederlande und Malaysia.

Was tun mit unserem Müll?

China schließt die Tore

Die Weltmüllkippe schließt

Schlagzeilen dieser Art tauchen seit einiger Zeit vermehrt auf. China stoppt den Import von Plastikmüll. Damit fällt der größte Abnehmer deutschen Kunststoffmülls weg. Für Deutschland hat dies weitreichende Folgen. Im Jahr 2015 wurden schließlich 9,5 % der deutschen Kunststoffabfälle nach China exportiert. Das entspricht einer Menge von 564.523 Tonnen.

ZUSAMMENFASSUNG-Lösung siehe Lösungszettel

Literaturverzeichnis

- Andrady, Anthony L. (2015): *Plastics and environmental sustainability*. Hoboken: Wiley.
- Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2016): *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung* -. Verfügbar unter http://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Consultic_2015__23.09.2016__Kurzfassung.pdf.
- Fulterer, R. (2018): *Wohin mit unserem Müll?: Deutschland exportiert riesige Mengen Altverpackungen, vor allem nach China. Doch das wird jetzt schwieriger*. In: *Die Zeit*, Nr. 04/2018, S. 26. Verfügbar unter <http://www.zeit.de/2018/04/abfall-muell-deutschland-china-exporte>, zugegriffen am 02.02.2018.
- Lindner, C.; Hoffmann, C. (2015): *Analyse/Beschreibung der derzeitigen Situation der stofflichen und energetischen Verwertung von Kunststoffabfällen in Deutschland*. Erstellt für: Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V. Verfügbar unter <https://www.itad.de/information/studien/ITADConsulticKunststoffstudieApril2015.pdf>, veröffentlicht am 2015, zugegriffen am 01.02.2018.
- Liu, D. (2009): *Enzymes for Industrial Acrylation: Redesign of Candida antarctica Lipase B and Characterization of a New Cutinase from Alternaria brassicicola*. zur Erlangung der Würde eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung, Universität Stuttgart. Verfügbar unter https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/1224/1/diss_liu.pdf, zugegriffen am 26.02.2018.
- Struckemeier, S.; Sieve, B.; Kloppenburg, J. (2015): *Biokunststoffe: Eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen? Material - Zahlen und Daten*. In: *Unterricht Chemie: Nachwachsende Rohstoffe*, 26 (146), S. 34.
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2011): *Klimarelevanz der Abfallwirtschaft*. Dessau-Roßlau (Hintergrundpapier).
- Wei, R.; Zimmermann, W. (2017a): *Biocatalysis as a green route for recycling the recalcitrant plastic polyethylene terephthalate*. In: *Microbial Biotechnology*, 10 (6), 1302–7. doi: 10.1111/1751-7915.12714.
- Wei, R.; Zimmermann, W. (2017b): *Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: How far are we?* In: *Microbial Biotechnology*, 10 (6), 1308–22. doi: 10.1111/1751-7915.12710.