

# Plastik aus CO<sub>2</sub> – ein Weg zu mehr Umweltschutz?

Jochen Hermanns, Würselen

**Niveau:** Sek. II

**Dauer:** 12 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 5 Unterrichtsstunden)

**Kompetenzen:** Die Schüler\* können ...

- Informationen aus wissenschaftlichen (auch fremdsprachigen) Publikationen entnehmen und anhand dieser für sie und ihre Lebenswelt relevante Fragestellungen zum Umgang mit Kohlenstoffdioxid aufstellen.
- diese Fragestellungen anhand ihres chemischen Wissens theoretisch und experimentell untersuchen, um zu einem eigenen Standpunkt zu gelangen und diesen fachlich und sachlich fundiert zu vertreten.
- dabei Grenzen und Möglichkeiten zum Umgang mit Kohlenstoffdioxid begründet aufzeigen.
- innerhalb dieser Grenzen Reaktionen von Kohlenstoffverbindungen zu Reaktionsfolgen und Reaktionswegen verknüpfend entwickeln, um ein Polymer herzustellen.
- bei dieser Entwicklung die Synthese ausgewählter organischer Verbindungen im niedermolekularen- als auch im makromolekularen Bereich erläutern.
- so an einem wissenschaftlich aktuellen Beispiel den Umgang mit der Ressource Erdöl auch unter Berücksichtigung von Gesundheitsaspekten bewerten.
- auf diese Weise den Weg zu einem „maßgeschneiderten“ Molekül mit geeigneten Schemata nachvollziehen.

**Der Beitrag enthält Materialien für:**

- ✓ offene Unterrichtsformen
- ✓ Schülerversuche
- ✓ Abiturvorbereitung

## Hintergrundinformationen

Am 23.09.2011 lehnte der Bundesrat die Gesetzesvorlage zum Carbon Capture and Storage (CCS) ab. Wäre dies nicht so gekommen, wäre der Weg geebnet worden, ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen und Forschungen drei von 912 Millionen Tonnen jährlich (Stand 2014) des in Deutschland anfallenden Kohlenstoffdioxids in unterirdischen Lagerstätten unter unseren Häusern, Städten und Feldern zu verpressen und langfristig zu binden. Die bei der Entscheidung berücksichtigte Gefahr liegt auf der Hand: *Was, wenn dieses nahezu inerte Treibhausgas wieder in Massen an die Oberfläche gelangt?*

Es ergab sich für Politik, Wirtschaft und Forschung daraus die Herausforderung, Alternativen zum Umgang mit Kohlenstoffdioxid zu finden, um es dauerhaft – oder zumindest längerfristig – aus dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf zu entfernen. Ein politischer Kompromiss, bei dem den Ländern ein Verbotsrecht eingeräumt wird, wurde am 29.6.2012 beschlossen. Das Problem ist allerdings geblieben: Kohlenstoffdioxid ist reaktionsträge, entsteht aber nahezu bei jedem chemischen großtechnischen Prozess und bei alltäglichen Dingen wie Atmung oder Autofahrt.

Diese Unterrichtseinheit soll im Hinblick auf diese Problematik mehrere Ansätze und Ziele verfolgen. Sie soll auf Abiturniveau:

\* Im weiteren Verlauf wird aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit nur „Schüler“ verwendet. Schülerinnen sind genauso gemeint.

**North, Michael, und Pasquale, Riccardo:** Mechanism of Cyclic Carbonate Synthesis from Epoxides and CO<sub>2</sub>. *Angewandte Chemie. Int. Ed.* 2009, 48, S. 2946–2948. (online einsehbar unter [www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2898159](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2898159))

Und umgekehrt, tolle Informationen zur Ringöffnung und Polymerisation (passend zu M 9):

**Piesik, Dirk:** Ringöffnungspolymerisation polarer Monomere mit mono- und bimetalischen Initiatoren der Gruppen 2 und 12. Dissertation an der Universität Duisburg-Essen. 2010. (online unter: <http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DocumentServlet/Document-24191/PhD.pdf>).

Wer eine Hochschulbibliothek in der Nähe hat, findet gute weiterführende Informationen zur Prileschajew-Epoxidierung von Biodiesel (M 8) – zum Beispiel für einen Leistungskurs:

**Wilde, Nicole; Worch, Christian; Suprun, Wladimir, und Gläser, Roger:** Epoxidation of biodiesel with hydrogen peroxide over Ti-containing silicate catalysts. *Microporous and Mesoporous Materials*, Volume 164, 1 December 2012, S. 182–189.

## Internet

Informationen zum CCS Gesetz:

[www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2011/04/2011-04-15-kabinett-ccs.html](http://www.bundesregierung.de/ContentArchiv/DE/Archiv17/Artikel/2011/04/2011-04-15-kabinett-ccs.html)

Versuche mit Spritzentechnik von Gregor von Borstel zur Wiederholung des chemischen Gleichgewichtes: [www.chemz.de](http://www.chemz.de)

Informationen zum Gefährdungspotenzial von BPA (nötig für M 9):

[www.bfr.bund.de/de/fragen\\_und\\_antworten\\_zu\\_bisphenol\\_a\\_in\\_verbrauchernahen\\_produkten-7195.html](http://www.bfr.bund.de/de/fragen_und_antworten_zu_bisphenol_a_in_verbrauchernahen_produkten-7195.html)

## Materialübersicht

⌚ V = Vorbereitungszeit      SV = Schülerversuch      Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt

⌚ D = Durchführungszeit      Fo = Folie      GBU = Gefährdungsbeurteilung

# Die [Gefährdungsbeurteilung](#) finden Sie auf  **CD 52**.

<b>M 1</b>	<b>Fo</b>	<b><a href="#">An Kohlenstoff kommt keiner vorbei!</a></b>
⌚ D: 45 min		Wiederholung der Eigenschaften und Verwendung von Kohlenstoff
<b>M 2</b>	<b>Ab</b>	<b><a href="#">Carbon Capture and Use – how to use Carbondioxide?</a></b>
⌚ D: 60 min		Wissenschaftlicher Einstieg in die Thematik anhand von zwei Doktorarbeiten
<b>M 3</b>	<b>Ab (Info)</b>	<b><a href="#">Polymerisierung von Kohlenstoffdioxid – warum?</a></b>
⌚ D: 10 min		Ggf. auch Lehrervortrag über die Wirkung von Weichmachern in Kunststoffen
<b>M 4</b>	<b>Ab</b>	<b><a href="#">EXKURS – Herstellung klassischer Weichmacher</a></b>
⌚ D: 45 min		Anwendungsbezogene Wiederholung organischer Reaktionsmechanismen und des RedOx-Begriffes
<b>M 5</b>	<b>Ab</b>	<b><a href="#">Herstellung biologisch abbaubarer Weichmacher</a></b>
⌚ D: 90 min		Vorbereitung der Experimente durch Wiederholung rund um die Stoffklasse der Ester anhand von Fetten

<b>M 6</b>	<b>SV, GBU#</b>	<b><u>Herstellung von Biodiesel im Schülerversuch</u></b>
⌚ V: 10 min ⌚ D: 90 min	Basenkatalysierte Verseifung von Speisefetten zu Biodiesel und experimentelle Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> NaOH<sub>(s)</sub> </li> <li><input type="checkbox"/> Methanol   </li> <li><input type="checkbox"/> ggf. einige Tropfen Mineralöldiesel     für Kressewachstumsvergleich</li> <li><input type="checkbox"/> Reagenzgläser entsprechend der Probenanzahl</li> <li><input type="checkbox"/> durchbohrte Stopfen mit Glasrohr zu den Reagenzgläsern passend</li> <li><input type="checkbox"/> 1 Becherglas als Wasserbad</li> <li><input type="checkbox"/> Regelbare Heizvorrichtung (z. B. Heizplatte)</li> <li><input type="checkbox"/> Glasplatte und unbeschichteter Pappkarton zum Viskositätsvergleich</li> <li><input type="checkbox"/> Thermometer bis 500 °C für Flammpunktsbestimmungen</li> <li><input type="checkbox"/> Kammern für Beobachtung des Kressewachstums (z. B. Bechergläser mit Uhrglas)</li> <li><input type="checkbox"/> Pipetten, Waage, Stativmaterial, Spatel</li> </ul>
<b>M 7</b>	<b>Ab</b>	<b><u>Der Mechanismus der Umesterung</u></b>
⌚ D: 30 min	Partnerarbeit zum Mechanismus der Umesterung zur Wiederholung und Einübung der Fachsprache mit gegenseitiger Lernerfolgskontrolle	
<b>M 8</b>	<b>Ab</b>	<b><u>Wie wird aus Biodiesel ein Weichmacher?</u></b>
⌚ D: 60 min	Epoxidierung nach Prileschajew	
<b>M 9</b>	<b>Ab</b>	<b><u>Und wo bleibt das Kohlenstoffdioxid? Die Herstellung von Polyletherpolycarbonaten aus Epoxiden</u></b>
⌚ D: 30 min	Exkurs in die Polymerisation von Epoxiden zum Verständnis von <b>M 2</b>	
<b>M 10</b>	<b>Ab</b>	<b><u>Lernerfolgskontrolle</u></b>
⌚ D: 45 min	Eine interaktive Lernerfolgskontrolle durch Bewertung der einzelnen bisherigen Arbeitsschritte	

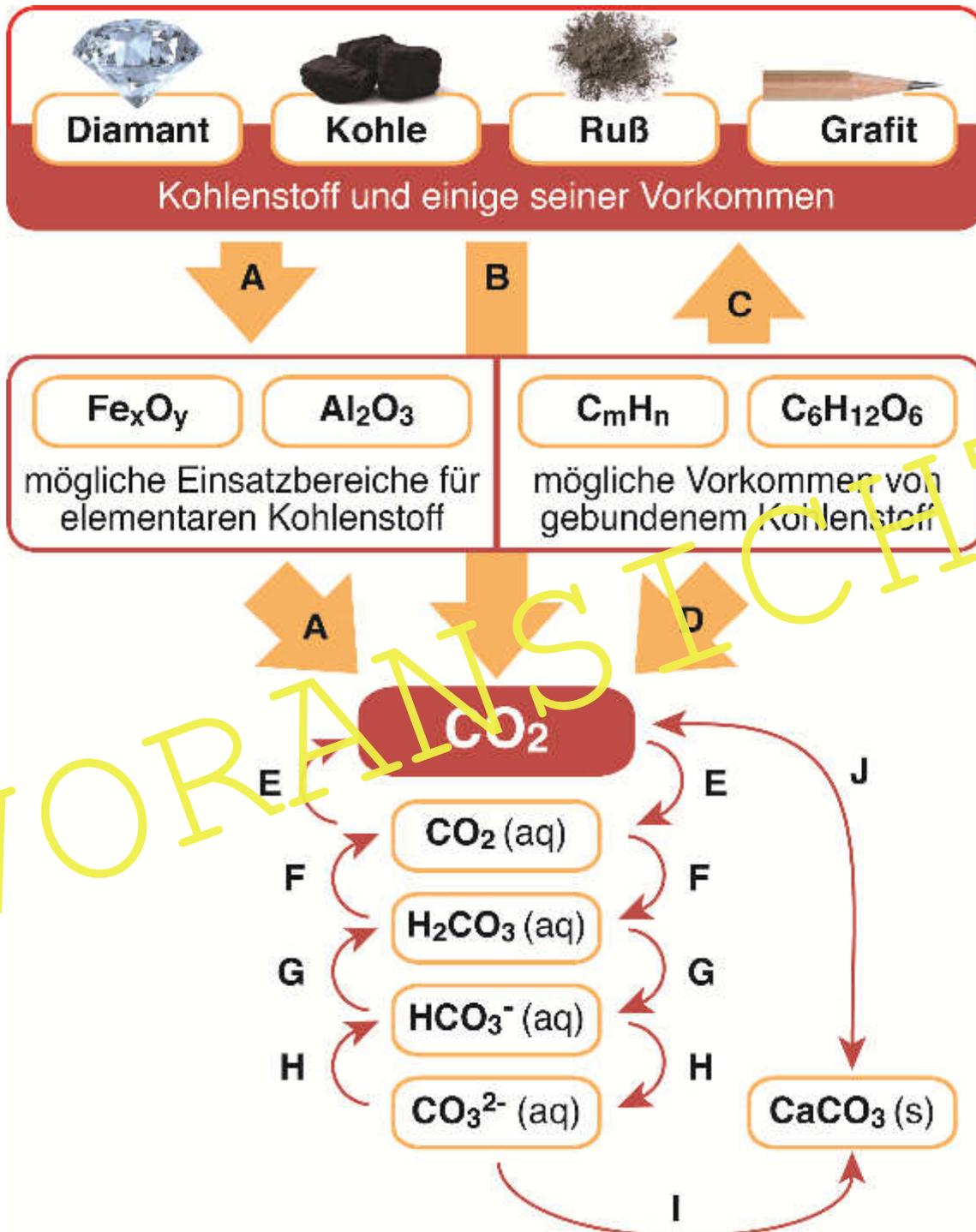
### Minimalplan

Ihnen steht nur wenig Zeit zur Verfügung? Dann lässt sich die Unterrichtseinheit auf **vier Stunden** kürzen. Die Planung sieht dann wie folgt aus:

<b>1. Stunde (M 1–3, evtl. M 4–5)</b>	Wiederholen Sie mit M 1 Wissen rund um den Kohlenstoff. Aufgabe 1 kann dazu auch eine vorbereitende Hausaufgabe sein, um Aufgabe 2 in der Stunde zu besprechen. Die Stunde kann mit einem Lehrervortrag zu M 2 u./o. M 3 abgeschlossen werden. Geben Sie zur nächsten Stunde M 4 u./o. M 5 auf, um Wissen rund um Reaktionen in der Organik zu wiederholen.
<b>2./3. Stunde (M 6–8)</b>	Hier müssten industrielle Fette vorgehalten werden, um den Bereitstellungsprozess abzukürzen. Während die Umesterung läuft, kann M 7 in Partnerarbeit bearbeitet werden. Die Auswertungsversuche können auf die Viskositätsmessung beschränkt werden. Bei einer Doppelstunde kann die Auswertung ausführlicher erfolgen, oder es kann z. B. die HA ausführlich besprochen werden. Geben Sie M 8 als neue Hausaufgabe auf.
<b>4. Stunde (M 9)</b>	Vergleichen Sie die noch nicht besprochenen Ergebnisse, und stellen Sie im Lehrervortrag kurz die Ringöffnungspolymerisation vor. Diskutieren Sie abschließend die Zukunftsaussichten der Grundidee.

Die Erläuterungen und Lösungen zu den Materialien finden Sie [hier](#).

## M 1 An Kohlenstoff kommt keiner vorbei!



Grafik: D. Köhl, Fotos: Thinkstock/Stock

### Aufgaben

1. **Erläutern** Sie jeden Pfeil mit mindestens einem Beispiel aus dem Chemieunterricht der letzten zwei Jahre. Das können konkrete Prozesse, wie das Haber-Bosch-Verfahren bei der Ammoniak-Synthese, komplizierte Reaktionsmechanismen oder einfache Reaktionen und Stoffbeispiele sein.
2. **Bewerten** Sie, welche der Möglichkeiten die sicherste (und damit langfristigste), die einfachste und die umweltschonendste Methode ist, Kohlenstoff langfristig zu binden.

## M 2 Carbon Capture and Use – how to use Carbondioxide?

Diese Frage stellen sich mittlerweile Forscher in aller Welt. Nachfolgend stehen dafür exemplarisch zwei Auszüge aus Doktorarbeiten, davon einer in englischer Sprache.

**Aufgabe: Übersetzen** Sie in Partnerarbeit den englischen Ausschnitt sinngemäß und **ergänzen** Sie die erhaltenen Informationen mit denen aus der deutschsprachigen Arbeit. **Fassen** Sie die Grundproblematik und den Lösungsansatz in einem Kurzvortrag **zusammen**. **Diskutieren** Sie im Plenum zu erwartende Probleme und stellen Sie sie den genannten Vorzügen gegenüber.

The use of CO<sub>2</sub> as a chemical feedstock will never be able to compensate emission-based CO<sub>2</sub>, however this strategy potentially provides access to high-value products from a non-toxic, renewable and low-cost resource. Current examples of the industrial utilization of CO<sub>2</sub> include the large-scale production of urea, salicylic acid and several carbonate-based materials [...]. A further large-scale industrial application of CO<sub>2</sub> potentially lies in the production of the biodegradable thermoplastics poly(propylene carbonate) [...] and poly(cyclohexene carbonate) [...]. The usage of CO<sub>2</sub> in this manner could substitute the environmentally malign industrial synthesis involving polycondensation of *trans*-diols (e.g. Bisphenol-A) with highly toxic phosgene by utilizing the energy rich three-membered, highly ring-strained oxiranes to react with CO<sub>2</sub>. The outstanding properties of polycarbonates such as strength, lightness, durability, biodegradability, heat resistance, easy processability, high transparency and good electrical insulation render these materials of high industrial importance with applications in the automotive, electronics, optical media, glazing and sheeting industries as well as the medical and healthcare sectors.

Aus: Stephan Klaus: Development of Efficient Catalysts for the CO<sub>2</sub>/Epoxide Copolymerization Reaction. Dissertation an der TU München 2011. Online einsehbar unter: <http://mediatum.ub.tum.de/doc/1079691/1079691.pdf>, Seite 2/3.

### Copolymerisation von CO<sub>2</sub> und Epoxiden: Verfahren und Anwendung

Beim Versuch, CO<sub>2</sub> nutzbar zu machen, stand dessen Reaktionsträgheit bisher wie eine große Hürde im Weg, aber durch Katalyse kann beispielsweise die chemische Umsetzung von CO<sub>2</sub> mit Epoxiden realisiert werden. Produkte sind cyclische Carbonate oder aliphatische Polyetherpolycarbonate, die Anwendung als Lösungsmittel bzw. Polymerbaustein finden. Im Labor sind diese Traumreaktionen bereits möglich geworden. Im Projekt „Dream Production“ soll nun die Copolymerisation von CO<sub>2</sub> und Epoxiden in den Technikumsmaßstab überführt werden. Neben der direkten Nutzung des CO<sub>2</sub> eröffnen sich weitere CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale durch Verwendung der aus den Polyetherpolycarbonaten hergestellten Polyurethane. Als effizientes organisches Dämmmaterial sparen Polyurethane während ihrer Nutzungsdauer etwa 80-mal mehr Energie ein als zu ihrer Herstellung benötigt wird. Somit erzielen Polyetherpolycarbonate einen doppelt positiven Effekt für den Klimaschutz. Neben der Gebäudedämmung tragen Leichtbauteile aus Polyurethanen etwa in der Automobilindustrie zu einer Gewichtsverringerung und damit zu signifikanten Energieeinsparungen bei. Der Einsatz von CO<sub>2</sub> als Rohstoff bei der Herstellung von Polymeren hilft, weniger konventionelle Rohstoffe und damit weniger fossile Energieträger zu verbrauchen. Mit diesem Ansatz wird auch für zukünftige Generationen ein nachhaltiger Umgang mit natürlichen Ressourcen aufgezeigt.

Aus: T. E. Müller und C. Gürtler: Copolymerisation von CO<sub>2</sub> und Epoxiden: Verfahren und Anwendung. Chemie Ingenieur Technik. 9/2010 [82. Jg.], S. 1327. Online einsehbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.201050637/epdf>

## M 6 Herstellung von Biodiesel im Schülerversuch

Biodiesel ist nichts anderes als das Ergebnis einer Veresterungsreaktion von Fettsäuren tierischen oder pflanzlichen Ursprungs und Methanol oder Ethanol.

### Schritt 1: Bereitstellung des Fettes

Einigen Sie sich im Kurs darauf, welches Fett für den Versuch verwendet werden soll. Es ist natürlich auch möglich, verschiedene Fette zu verwenden und die Ergebnisse anschließend zu vergleichen. Als gut umsetzbar haben sich unter anderem Raps- und Walnussöl herausgestellt. Hier können Sie auch aus frischen Walnüssen das Fett mit Ethanol extrahieren, indem eine Mischung aus zerkleinerten Nüssen und Ethanol aufgekocht und filtriert wird. Natürlich ist durch das Erhitzen schon ein Teil des Fettes mit Ethanol umgeestert! Alternativ muss das Fett herausgepresst werden. Auch zerlassener Speck oder Butter-schmalz sind geeignet.

Sie können auch quantitativ arbeiten und die Masse des herausgelösten Fettes im Verhältnis zur Ölsaart bestimmen, um einen Eindruck davon zu erhalten, wie viele Pflanzen notwendig sind, um die gewaltigen benötigten Ölmengen zur Spritherstellung zu substituieren.



Foto: Thinkstock / iStock

### Schritt 2: Bereitstellung der alkalischen Alkanolkomponente

In der Regel wird mit Methanol (**Gefahr!** ) gearbeitet.

Lösen Sie 0,1 g Natriumhydroxid in 100 ml Wasser und setzen Sie 25 ml Methanol zu. Pro Versuchsansatz werden hier von 4 ml benötigt.

### Schritt 3: Umesterung

Geben Sie die 4 ml der Alkanolkomponente in ein Reagenzglas mit etwa 2 ml des Fettes. Das Reagenzglas wird mit einem durchbohrten Stopfen und einem Glasrohr als Rückflusskühler verschlossen. Unter Rühren mithilfe eines Magnetrührers und Magnetrührkerns oder unter Schütteln wird bei 75 °C in einem Wasserbad die Mischung etwa 10 Minuten erhitzt. Notieren und vergleichen Sie hier die Beobachtungen – besonders bei verschiedenen Ansätzen.

### Schritt 4: Aufarbeitung

Füllen Sie das Reagenzglas mit Wasser auf und warten Sie, bis eine klare Phasentrennung stattgefunden hat. Pipettieren Sie die obere Phase in Probenbehälter zur Aufbewahrung ab.

### Schritt 5: Untersuchung des Biodiesels (im Vergleich)

Zur Untersuchung eignen sich unter anderem folgende Aspekte:

#### Viskosität

*Variante 1:* Lassen Sie einige Tropfen der Edukte und Produkte einen schräg geneigten Objektträger hinabgleiten.

*Variante 2:* Geben Sie einige Tropfen Edukte und Produkte auf eine unbeschichtete Pappe und ermitteln Sie die Zeit, die die Stoffe zum Durchtreten durch die Pappe benötigen.

## Umweltgefährdung

Nehmen Sie Kressesamen und lassen Sie diese auf feuchter Watte einige Tage keimen. Teilen Sie die Saat durch die Anzahl der Proben plus zwei. Verteilen Sie die Saat auf große Bechergläser und geben Sie pro Becherglas entweder nichts, 1 bis 2 Tropfen Probe, Edukt oder Diesel hinzu. Legen Sie ein Uhrglas darauf, um Verdunstung zu verhindern, und stellen Sie etwa eine Woche die Proben bis zum Vergleich in den Abzug (ggf. nachfeuchten).

## Flammpunkt

Stellen Sie zwei feuerfeste kleine Gefäße auf eine Heizplatte und füllen Sie einige Milliliter Probe hinein. Heizen Sie thermometergesteuert langsam beide Proben auf. Das Thermometer befindet sich in der einen Probe, etwa 1 cm über der anderen wird eine dauerhaft brennende Zündquelle befestigt. Die Temperatur, bei der genügend Dämpfe aufsteigen, dass sich die Probe entzündet und nach Entfernen der Zündquelle wieder erlischt, ist der *Flammpunkt*. Erlischt die Probe nicht, ist der *Brennpunkt* erreicht.

## Schritt 6: Auswertung auf chemischer und physikalischer Ebene

- **Stellen** Sie einander die Ergebnisse des Versuches **vor**. Gehen Sie dabei auch auf Beobachtungen wie Farbveränderungen, Dichteunterschiede oder Trübungen ein.
- **Diskutieren** Sie auch mögliche Fehlerquellen.
- **Fassen** Sie tabellarisch die Ergebnisse **zusammen**, die aus den Untersuchungen der Proben resultieren. Etwa so:

verwendete Probe	Fließdauer auf Glas in s (für 10 cm Strecke)	Dauer bis zum Durchweichen von Pappe in s	beobachtbarer Einfluss auf das Pflanzenwachstum	Flammpunkt in °C
Wasser				<i>entfällt</i>
reines Fett Edukt 1 bis ...)				
Probe (eigenes Produkt 1 bis ...)				
Mineralöldiesel				<i>entfällt wegen Gesundheitsgefährdung</i>

- **Ermitteln** Sie nun mögliche Ursachen für die Veränderungen durch die Reaktion. Gehen Sie dabei auf Kettenlängen der Fettsäuren (Hilfe liefert das Internet) und inter- sowie intramolekulare Wechselwirkungen und Bindungen ein.

## Schritt 7: Auswertung auf wirtschaftspolitischer Ebene

**Bewerten** Sie abschließend die Herstellung von Biodiesel als langfristigen Ersatz für den weltweiten Bedarf an Brennstoffen aufgrund der ermittelten Daten. **Gehen** Sie dabei ggf. auch auf die unterschiedlichen verwendeten Pflanzen (Ertrag, Wachstumsgeschwindigkeit etc.) **ein**.

## M 10 Lernerfolgskontrolle

Dissertationen (Doktorarbeiten) sind meist von sogenannten Drittmitteln abhängig. Doktoranden müssen also mit ihrer Idee Personen oder Firmen finden, die ihr Vorhaben als zukünftig profitabel ansehen.



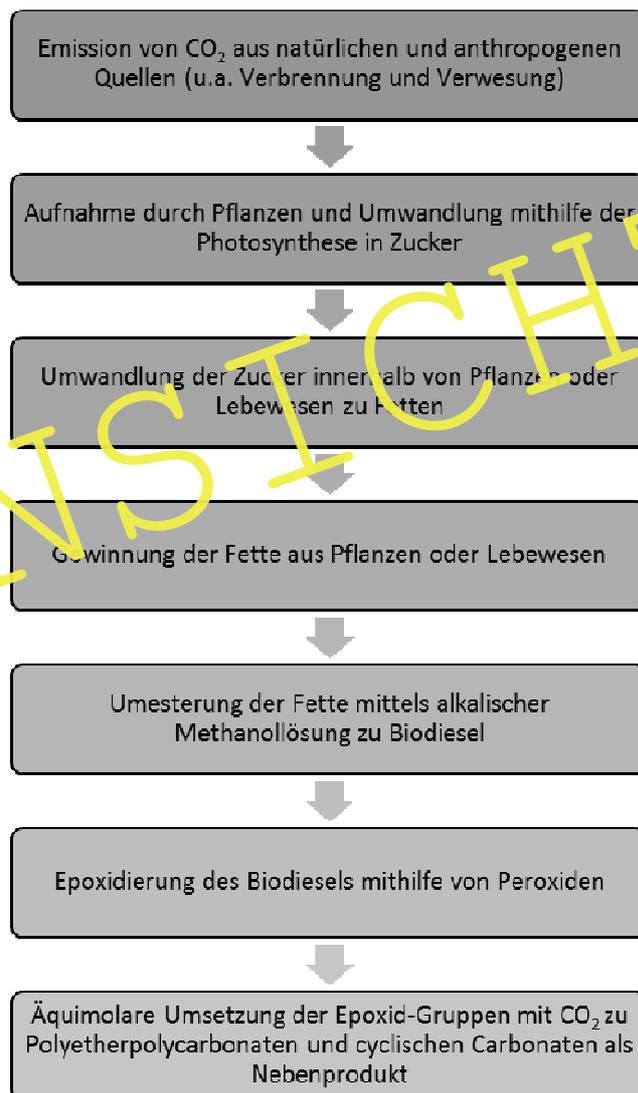
Thinkstock / Wavebreak Media

### Aufgaben

1. **Bewerten** Sie jeden Schritt des nebenstehenden Schemas der Herstellung von Polymeren aus Fetten einmal aus Sicht des Doktoranden (Vorteile des Verfahrens) und einmal aus Sicht eines Geldgebers (Gefahren/Nachteile des Vorhabens).
2. **Stimmen** Sie im Plenum **ab**, ob Sie ein solches Vorhaben finanziell unterstützen würden, nachdem alle Argumente vorgestellt wurden.

 **Tipp:** Gehen Sie bei der Betrachtung auf folgende Aspekte ein:

- Kosten
- Energieaufwand
- Zeitaufwand
- gefährliche Stoffe
- Gefahren (z. B. Hitze)
- nutzbare bzw. verkaufsfähige Neben- und Koppelprodukte
- Nutzen für Mensch, Umwelt und Natur durch das Endprodukt
- erwünschte oder unerwünschte Nebenreaktionen



VORANSICHT

## Erläuterungen und Lösungen

### Erläuterung (M 1)

Diese Folie bietet sich in mehreren Einsatzweisen an: als Ergebnissicherung, wenn nach der Bedeutung von CO<sub>2</sub> im Alltag und nach seiner Behandlung im bisherigen Chemieunterricht gefragt wurde, als Hilfe, wenn Schülern zu der Frage nichts mehr einfällt, und als Impuls, Schritt für Schritt die Bedeutung zu reflektieren und zu wiederholen.

Achten Sie beim Einsatz von **M 1** darauf, dass hier nicht oberflächlich gearbeitet wird. Eine Aussage wie „Ich atme CO<sub>2</sub> aus“ ist fachlich und sachlich sicherlich nicht falsch, wird aber dem Anspruch einer wissenschaftlichen Aussage qualitativ und quantitativ nicht gerecht. So sollte auf Antworten wie „Im Körper werden aufgenommene Kohlenhydrate verbrannt/oxidiert/umgesetzt, dabei entsteht zusammen mit dem in der eingeatmeten Luft befindlichen Sauerstoff Kohlenstoffdioxid“ bestanden werden.

### Beispielrechnung zur CO<sub>2</sub>-Emission im Alltag

Eine **Milchschnitte** enthält nach Herstellerangaben 9,7 g Kohlenhydrate, davon sind 8,2 g Zucker.

Geht man von Haushaltszucker (Saccharose) aus, liegt die molare Masse bei 342 g·mol<sup>-1</sup>.

Durch die Formel  $n = m \cdot M^{-1}$  erhält man eine Stoffmenge von 8,2 g  $\cdot 342^{-1} \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,024$  mol).

Diese Stoffmenge muss allerdings noch mit 12 multipliziert werden, da aus einem Mol Saccharose 12 Mol CO<sub>2</sub> werden (Summenformel C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>): 0,024 mol  $\cdot 12 = 0,288$  mol.

Mit dem molaren Volumen bei 25 °C (24,47 l·mol<sup>-1</sup>) ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Volumen von 0,288 mol  $\cdot 24,47 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} = 7,04$  l.

Fährt man in der gleichen Zeit mit einem kleinen **Mittelklassefahrzeug** (128 g CO<sub>2</sub>·km<sup>-1</sup>) eine Kurzstrecke von 0,1 Kilometer, emittiert man zusätzlich 128 g·km<sup>-1</sup>  $\cdot 0,1 \text{ km} \cdot 44^{-1} \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 24,47 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1} = 7,12$  l.

Eine **Tomatenpflanze** setzt durchschnittlich 10 mg CO<sub>2</sub> pro Stunde um. Mit obiger Formel sind das 0,010 g  $\cdot 44^{-1} \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,0002$  mol (= 0,2 mmol).

Eine Tomatenpflanze bräuchte also zum Recycling der Milchschnitte bzw. der Fahrtemissionen 288 mmol  $\cdot 0,2^{-1} \text{ mmol} \cdot \text{h}^{-1} = 1440$  h (etwa 2 Monate).

### Lösungen (M 1)

*Zu 1.: Erläutern Sie jeden Pfeil mit mindestens einem Beispiel aus dem Chemieunterricht der letzten zwei Jahre. Das können konkrete Prozesse wie das Haber-Bosch-Verfahren bei der Ammoniak-Synthese, komplizierte Reaktionsmechanismen oder einfache Reaktionen und Stoffbeispiele sein.*

- A** Kohlenstoff wird als Koks im Hochofen-Prozess (Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub>) zum Heizen und als Reduktionsmittel verwendet. Ebenso wird er als Söderberg-Elektrode im aluminothermischen Verfahren (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) oxidiert. Dabei entstehen große Mengen CO<sub>2</sub>.
- B** Bis auf Diamant (Schmuck) und Ruß (z. B. Autoreifen) werden die meisten Kohlevorkommen zur Energieerzeugung direkt oder indirekt genutzt, sei es als Stein-, Holz- oder Braunkohle.
- C** Die meisten kohlenwasserstoffhaltigen Verbindungen wie Alkane, Alkene und Alkine (C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>), ebenso wie solche mit Sauerstoff (z. B. Kunststoffe, Fette und Öle), werden ebenso wie der bei der Photosynthese gebildete Zucker (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) bei der unvollständigen Verbrennung als Verbrennungsrückstand teilweise zu Holzkohle und/oder Ruß.

## Lösung (M 10)

aus Sicht des Doktoranden:

läuft ohne weiteres von alleine und kostenfrei ab



läuft ohne weiteres von alleine und kostenfrei ab



läuft ohne weiteres von alleine und kostenfrei ab, überschüssiger Zucker und Biomasse sind wertvolle Nebenprodukte



schadstoffarm und geringer materieller und energetischer Aufwand, überschüssige Biomasse als erneutes wertvolles Nebenprodukt, kontinuierlicher Prozess möglich



schadstoffarm und geringer materieller und energetischer Aufwand, zusätzlich wird Glycerin erhalten, läuft dank Unlöslichkeit von Glycerin in nahezu einseitigem Gleichgewicht von alleine



Einsatz nur von Haushaltschemikalien, keine Entsorgungsprobleme, keine unerwünschten Nebenprodukte, einfache Reaktionsführung durch Konzentrationsänderung



zusätzliche Entsorgung von CO<sub>2</sub> zu einem stabilen, lagerfähigen, inerten und vielfältigen Produkt mit planbaren Eigenschaften, geringer Energieaufwand, einfache Reaktionsführung

aus Sicht des Geldgebers:

darf nicht absichtlich herbeigeführt werden, da Mengen und Energieemission zu groß



läuft zu langsam ab, Pflanzen dürfen dafür nicht genmanipuliert werden



läuft zu langsam ab, Bedarf an Platz, Wasser und Dünger



kein Umsatz von 100% möglich, ernteeabhängig und damit jahreszeiten- bzw. transport- und weltmarktabhängige Versorgung mit Rohstoffen



Einsatz ätzender Laugen, kaum kontinuierlich durchführbar, Erwärmen (=Energieeinsatz) notwendig, Glycerin ist ein fast wertloses Nebenprodukt



Qualität von natürlichen Rohstoffen (hier: Anzahl an Doppelbindungen und Kettenlänge) nicht immer gesichert, Peroxide können andere reaktive und u. U. explosive Stoffe bilden



nur ein CO<sub>2</sub>-Molekül pro Epoxidgruppe, somit vernachlässigbarer Umwelteinfluss, stabiles Produkt ist u.U. nicht biologisch abbaubar und somit wieder eine Umweltgefährdung

VORLESUNG