

Organisch-chemisches Praktikum für das Lehramt (LA)

Torsten Lasse

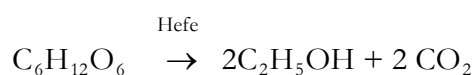
Leitung: Dr. P. Reiß

WS 2008/09

Assistentin: Beate Abé

**Schulversuch (Gruppe 6/Selbst):
Kohlendioxid aus alkoholischer Gärung zur Düngung von bepflanzten
Aquarien**

Eine Low-Cost-Variante zur Kohlendioxid-Düngung von Aquarien auf Basis einer alkoholischen Gärung wird auf die konstante Kohlendioxid-Produktion überprüft.

Reaktionsgleichung**Chemikalien und eingesetzte Substanzen**

| Eingesetzte Stoffe | Summenformel | Menge | R-Sätze | S-Sätze | Gefahrenkennzeichnung / Bemerkung | Schul-einsatz (HessGiss) |
|---|---|-------------|---------|-------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Haushaltszucker (Saccharose) | C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁ | 400 g | - | - | - | - |
| Calciumhydroxid, gesättigte wässr. Lsg. | Ca(OH) ₂ * H ₂ O | etwa 10 mL | 41 | 22-24-26-39 | Xi | SI |
| Bäckerhefe (Saccharomyces cerevisiae) | - | 1 Teelöffel | - | - | - | - |
| Tortengelee (Tortenguss) | | 12 g | | | | |

Geräte und Materialien

Für den Vergleich der alkoholischen Gärungen

Gärbehältnis¹ 2x (hier: Dennerle Bio-Line CO₂ 500 mL mit Schlauchadapter)

PVC-Schläuche (CO₂-dicht) 2x

Für den CO₂-Nachweis

Gärbehältnis 1x (hier: Dennerle Bio-Line CO₂ 500 mL mit Schlauchadapter)

PVC-Schlauch

Reagenzglas

¹ Als Gärbehältnis wurde hier eine leere 500-mL-PET-Flasche der Firma Dennerle mit einem aufschraubbaren Schlauchadapter verwendet. Alternativ können auch entsprechende Getränkeflaschen (PET) verwendet werden; in diesem Fall muss jedoch der Schlauchadapter selbst gebaut werden.

Für die Bestimmung der Menge an gebildetem CO₂

Gärbehälter 1x (hier: Dennerle Bio-Line CO₂ 500 mL mit Schlauchadapter)

PVC-Schlauch

Saugflasche 2 L

Messkolben 100 mL

Ergänzung zur Praxis: Für die Durchführung der CO₂-Düngung eines bepflanzen Aquariums

Gärbehälter 1x (hier: Dennerle Bio-Line CO₂ 500 mL mit Schlauchadapter)

CO₂-Ausströmer 2x (hier: Lindenholzausströmer)

PVC-Schläuche (CO₂-dicht) 2x

Rückschlagventil

Waschflasche

Versuchsaufbau

Vergleich der alkoholischen Gärungen



Abbildung 1

CO₂-Nachweis



Abbildung 2

Bestimmung der Menge an gebildetem CO₂



Abbildung 3

Durchführung und Beobachtung

Vergleich der alkoholischen Gärungen

In einem Kochtopf wurden 200 g Zucker (Haushaltszucker) in 250 mL Wasser gelöst. Dem Ansatz wurden nun 12 g Tortengelee zugefügt, das anschließend unter ständigem Rühren aufgekocht wurde. Vom dickflüssigen Ansatz wurden nun 200 mL noch heiß in das Gärbehältnis gefüllt. Der gleiche Ansatz, jedoch ohne das Tortengelee, wurde erneut hergestellt und in das zweite Gärbehältnis gegeben.

Nach dem Abkühlen über Nacht konnten den Gärbehältnissen jeweils 300 mL handwarmes Wasser bis zur oberen Markierung (bei 500 mL) zugefügt werden. Durch den Zusatz des Tortengelees war der erste Ansatz erhärtet. Schließlich wurde den Ansätzen jeweils $\frac{1}{2}$ Teelöffel Haushaltshefe zugesetzt, anschließend wurden sie mit einem Adapter versehen und an einen Schlauch angeschlossen. Die Schläuche mündeten am Boden in einem 1-L-Einweckglas (s. Abb. 4). Nachdem die Gärung in den Ansätzen einsetzte, konnte die Menge an gebildetem Kohlendioxid über die aufsteigenden Blasen im mit Wasser gefüllten Einweckglas dokumentiert und schließlich in der Anzahl verglichen werden.

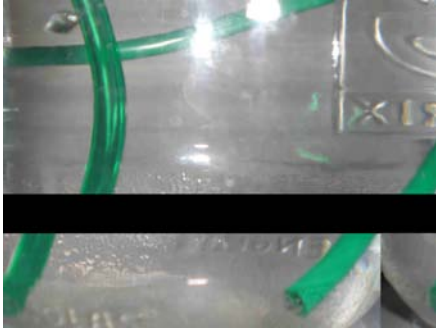


Abbildung 4

Die beiden Ansätze wurden den gleichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt, d.h. gleiche Raumtemperatur (20 °C), Belichtung sowie gleiche Schlauchlänge, Dicke und Eintauchtiefe im Einweckglas. Die Anzahl der gebildeten Blasen wurde jeweils abends um etwa 20.00 Uhr gemessen und über 4 Wochen dokumentiert² (s. Abb. 1, s. Diagramm 1). Es zeigte sich, dass der Ansatz ohne Tortengelee schon in den ersten 4 Tagen auf etwa 8 Blasen/Minute anstieg, schließlich am 7. Tag ein Maximum von 16 Blasen/Minute erreichte und von da an stetig bis auf den Stopp der CO₂-Produktion am 19. Tag absank. Hingegen setzte die Blasenanzahl bei dem Ansatz mit dem Tortengelee erst einen Tag später ein, erreichte einen Höhepunkt am 9. Tag und konnte sich ab diesem Zeitpunkt auf eine nahezu konstante Produktion von etwa 3-6 Blasen/Minute einpendeln. Auch nach 3 Wochen, zu einem Zeitpunkt, an dem bei dem Ansatz ohne Tortengelee die CO₂-Produktion schon gänzlich aufgehört hatte, konnte diese konstante Produktion noch beobachtet werden (s. Diagramm 1). Nach 4 Wochen wurde der Ansatz mit Tortengelee erneut beobachtet, es zeigte sich eine Produktion von 4 Blasen/Minute. Erst nach etwa 4½ Wochen sank schließlich die Produktion auf 0 Blasen/Minute (in der Abb. nicht aufgenommen).

Somit konnte durch die Verwendung des Tortengelees und der daraufhin erfolgten Härtung des Zuckergemisches eine konstantere Produktion an CO₂ gewährleistet werden. Der Ansatz ohne Tortengelee hingegen erreichte schnell einen sehr hohen Spitzenwert, fiel jedoch daraufhin stetig bis zur Einstellung der Produktion ab.

² Der Versuch begann bereits 2 Wochen vor der Versuchsabzeichnung.

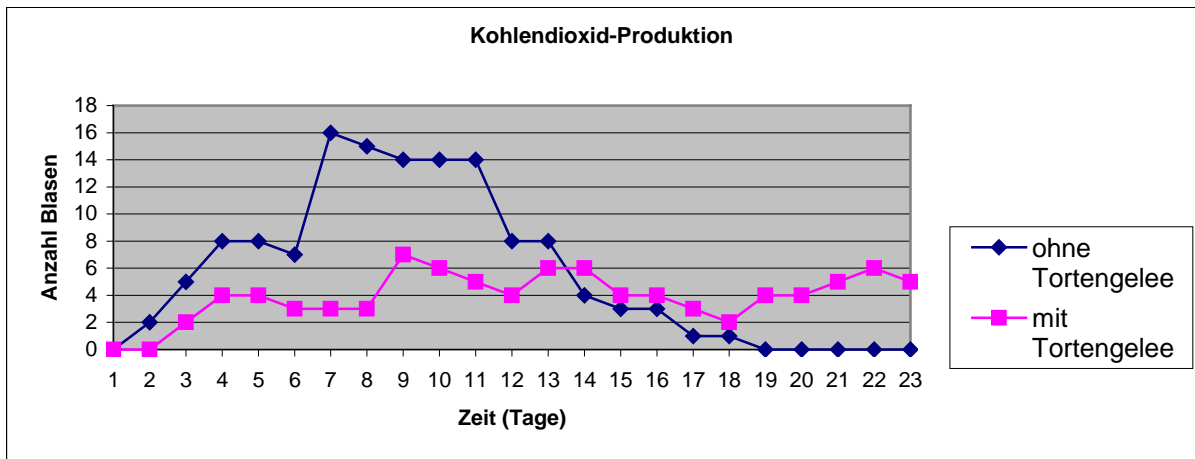


Diagramm 1

CO₂-Nachweis

Durch die Einleitung der entstehenden Blasen in ein mit Calciumhydroxid-Lösung ('Kalkwasser') gefülltes Reagenzglas konnte das CO₂ durch die entstehende Trübung qualitativ nachgewiesen werden (s. Abb. 2 und 5).

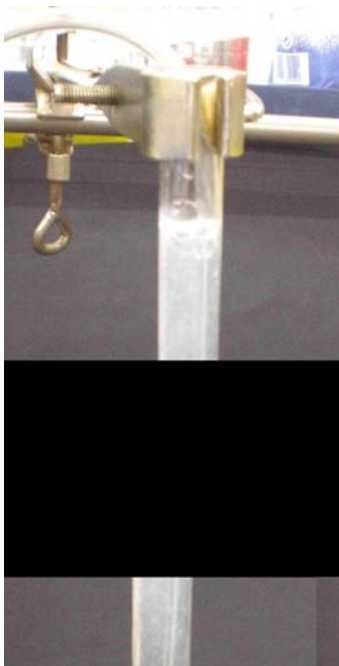


Abbildung 5

Bestimmung der Menge an gebildetem CO₂

Die Menge des gebildeten Kohlendioxids konnte durch eine improvisierte Apparatur, ähnlich einer pneumatischen Wanne, bestimmt werden. Dazu wurde eine Saugflasche zu etwa 2/3 mit

Wasser gefüllt und ein 100-mL-Messkolben umgekehrt in die Saugflasche gehängt (s. Abb. 3). Der Wasserspiegel im Messkolben entsprach dem umliegenden Wasserspiegel. Danach wurde ein PVC-Schlauch (CO₂-dicht) im wassergefüllten Bereich des Messkolbens fixiert. Am anderen Ende des Schlauches wurde das Gärbehältnis angeschlossen. Nachdem das Wasser und die Luft aus dem Schlauch verdrängt worden waren, wurde anhand der Markierungen auf dem Messkolben der Wasserstand beobachtet. Nun wurden die austretenden CO₂-Blasen gezählt, bis eine vordefinierte Menge an Gasvolumen – ablesbar an der Markierung des Messkolbens – übertragen worden war (s. Abb. 6). In diesem Falle konnte aus 3 durchgeführten Versuchen ein Wert von 2 mL = 24 Blasen gemittelt werden. Daraus ergibt sich 1 mL = 12 Blasen, folglich 0,083 mL = 1 Blase. In einer Blase sind demzufolge 0,083 mL CO₂ vorhanden.



Abbildung 6

Für die Durchführung der CO₂-Düngung eines bepflanztten Aquariums



Abbildung 7

Für die praktische Durchführung der CO₂-Düngung wird der Apparatur noch eine Waschflasche und ein Rückschlagventil zwischengeschaltet. Die Waschflasche hat den Zweck, dass evtl. überschäumendes Gärgemisch durch den Schlauch nicht in das Aquarium tritt; das Rückschlagventil dient dazu, dass kein Aquariumwasser in die Apparatur läuft. Am Ende des Schlauches wird ein CO₂-Verteiler, ein so genannter Diffusor, geschaltet (s. Abb. 7) und in das Aquarium in Bodennähe gehängt. Dieser soll bewirken, dass das CO₂ möglichst in kleinsten

Blasen ausgetrieben und während des Aufsteigens im Aquarium gelöst wird. In diesem Falle ist ein Diffusor aus Lindenholz dargestellt. Alternativ besteht die Möglichkeit, den austretenden Blasen einen möglichst langen Weg vom Austritt zur Wasseroberfläche zu ermöglichen. Dies gewährleisten so genannte Topper oder Flipper, die durch Führungsschienen einen Zickzack-Kurs der Blasen zur Oberfläche bewirken. Auf dem Weg zur Oberfläche verkleinern sich die Blasen, da das CO₂ im Wasser gelöst wird.

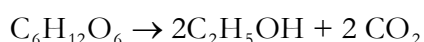
Entsorgung

Alle Ansätze können nach der Verwendung im Abfluss entsorgt werden.

Fachliche Analyse

Im Stoffwechsel der Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen stellt die Glykolyse den bedeutendsten anaeroben Abbauweg der Kohlenhydrate dar³. Hierdurch erlangen die Zellen die Fähigkeit zur Energiegewinnung aus dem enzymatischen Abbau der Glucose zu Pyruvat, bei dem in den folgenden Schritten der 'Kraftstoff' der Zellen, das ATP (Adenosintriphosphat), gebildet wird. Im Muskelgewebe wird durch die Milchsäuregärung anaerob aus Pyruvat Lactat gebildet, welches im Überschuss u.a. letztlich zu 'Muskelkater' führt. In den Hefepilzen hingegen kann durch die Decarboxylierung des Pyruvates Ethanol gewonnen werden. Diesen natürlichen Vorgang bezeichnet man als alkoholische Gärung. Im menschlichen Organismus findet die alkoholische Gärung nicht statt, da hier ein wichtiges Enzym nicht vorhanden ist. Durch ein anderes Enzym wird jedoch eine Umkehr dieser Reaktion erreicht, in der das aufgenommene Ethanol abgebaut werden kann. Diese Tatsache ist die entscheidende Voraussetzung, Trinkalkohol (Ethanol) als Genussmittel zu sich nehmen zu können.

Die Hefe dient, wie gesehen wurde, auch als Grundlage zur Herstellung von Trinkalkohol in Deutschland – hier ist es sogar gesetzlich untersagt, Trinkalkohol auf anderem Wege herzustellen. Unter anaeroben Bedingungen findet unter dem Einfluss der Hefe folgende Reaktion statt:



Den Hefepilzen können auch Fructose und Saccharose als Gärsubstrat dienen, wobei die Saccharose zunächst durch das Enzym Invertase in Glucose und Fructose gespalten wird. Im Laufe der Reaktion entsteht unter dem enzymatischen Einfluss der Hefe aus Glucose Ethanol

³ Für den biochemischen Ablauf der Glykolyse soll hier auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden.

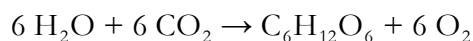
und Kohlendioxid. Unter geeigneten aeroben Bedingungen würde die Glucose vollständig zu Wasser und Kohlendioxid oxidiert werden (vereinfacht: $C_6H_{12}O_6 \rightarrow H_2O + CO_2$). Jedoch können hier Zwischenprodukte wie Ethansäure (Essigsäure) auftreten, welche bspw. bei der Weinherstellung durch eindringenden Sauerstoff in die Flaschen den Wein ‘umkippen’ lassen kann.

Es sollte bemerkt werden, dass bei einem Ethanol-Gehalt von etwa 15 bis 20 % die Hefen absterben – am eigenen Ausscheidungsprodukt. Daher können auf dem Wege der alkoholischen Gärung keine höherprozentigen Alkohole hergestellt werden. Ausnahmen bilden hier spezielle Zuchthefen, die bei der Produktion höherprozentiger Alkohole etwas toleranter sind.

Ist bei der Herstellung von Trinkalkohol der möglichst schnelle Ablauf der Reaktion mit der Bildung des Ethanols interessant, soll in diesem Versuch ein anderer Vorteil der Gärung genutzt werden. Das entstehende Nebenprodukt Kohlendioxid soll für die Düngung eines bepflanzten Aquariums genutzt werden. In diesem speziellen Fall ist somit das gebildete Ethanol das ‘unerwünschte’ Nebenprodukt.

Mit der Einführung von anspruchsvolleren Aquariumspflanzen sowie stärkeren Leuchtstoffröhren wurde vor einigen Jahren erkannt, dass Kohlendioxidmangel oftmals für Aquariumspflanzen einen begrenzenden Wachstumsfaktor darstellt. Dies zeigte sich auch bei vergleichenden Analysen in Naturbiotopen mit den CO_2 -Verhältnissen im Aquarium.

Kohlenstoff dient Pflanzen als bedeutender Nährstoff. Für photoautotrophe Organismen ist Licht als Energiequelle wesentlich; die zugrundeliegende Art der Assimilation wird daher als Photosynthese bezeichnet. So wird mithilfe von Lichtenergie aus Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) Glucose ($C_6H_{12}O_6$) gebildet:



Landpflanzen nehmen Kohlenstoff aus dem CO_2 -Gehalt der Luft auf, wohingegen sich den Wasserpflanzen grundsätzlich verschiedene Quellen bieten, einerseits das ‘freie’, im Wasser gelöste Kohlendioxid (CO_2), andererseits der flüssige Kohlenstoff der Kohlensäure, aber auch der gebundene Kohlenstoff in den Karbonaten.

Die letztgenannte Möglichkeit kommt insbesondere zum Tragen, wenn kein gasförmiges CO_2 zur Verfügung steht. Es sind in diesem Fall allerdings chemische Konsequenzen für das Aquarienwasser festzustellen: Der pH-Wert des Wassers steigt hoch in den alkalischen Bereich

an, wobei ggf. Werte von bis zu pH 8 bis 9 verzeichnet werden können. Aus diesem Grund ist das 'freie' CO₂ die für Aquarienpflanzen verträglichste Kohlenstoffquelle.

Aber auch die Karbonathärte und der pH-Wert werden vom Kohlendioxid beeinflusst. Je nach Höhe des Karbonatgehaltes ist eine bestimmte Menge an gasförmigem CO₂ im Wasser notwendig, um die Karbonate im Wasser in Lösung zu halten, aber auch um zu verhindern, dass sie als Salze ausfallen und den pH-Wert beeinträchtigen.

Ein Teil des im Wasser gelösten gasförmigen Kohlenstoffdioxids löst sich chemisch mit dem Wasser (ca. 0,7 %), was zur Entstehung von Kohlensäure (H₂CO₃) führt. Auch diese spielt im Aquarienwasser eine bedeutende Rolle: Sie sorgt für die Ansäuerung des Wassers, die Senkung des pH-Werts, die Lösung von evtl. vorhandenem Kalk (Bodengrund), und sie kann mehr oder weniger stark die Karbonathärte des Wassers beeinflussen.

Das CO₂ ist demnach für das Aquarium in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Erstens liefert es den Kohlenstoff und somit den wesentlichen Nährstoff für die Pflanzen, zweitens reguliert es den pH-Wert in eine bestimmte Richtung.

Auch aus praktischen Erfahrungen ist bekannt, dass nach längerer Zeit ohne künstliche CO₂-Zufuhr nur noch diejenigen Aquariumspflanzen überleben können, die auch die Kohlenstoffquellen in den Karbonaten nutzen können. Diese sind allerdings schwer zu erschließen. Grundsätzlich muss es sich dabei um Pflanzen handeln, die es 'gelernt' haben, in Wasser mit hohen pH-Werten zu überleben. Im Aquarium findet somit eine Art Konkurrenzkampf um den Kohlenstoff statt, der im Aquarium das chemische Milieu für Fische wie für Pflanzen beeinträchtigen kann. Ohne eine CO₂-Düngung bleibt im Aquarium das Pflanzenwachstum und die Pflanzenvielfalt relativ eingeschränkt.

Vergleich der alkoholischen Gärungen

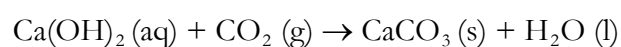
In dem Versuch wurden 2 Möglichkeiten der Kohlendioxid-Gewinnung durch alkoholische Gärung auf gleichmäßige und langanhaltende Kohlendioxid-Produktion untersucht. Dabei unterschieden sich beide Ansätze lediglich durch die Zugabe von Tortengelee, welches vorrangig aus Stärke besteht. Der wichtigste Bestandteil des Tortengelees jedoch ist das Geliermittel. Dadurch wird die Flüssigkeit, in der Regel Wasser oder Fruchtsaft mit einer Zuckerart, gebunden. Häufigste Stoffe sind Pektin, Johannisbrotkernmehl, Carrageen sowie seltener Agar Agar. In diesem Fall war dem Tortenguss Carrageen zugesetzt. In dem Ansatz mit Tortengelee konnte somit vor der Zugabe des Wassers und der Hefe eine Härtung des Zuckergemisches erreicht werden.

Erstrebenswert für die Düngung eines Aquariums ist aus nachvollziehbaren Gründen die gleichmäßige und langfristige Produktion des Kohlendioxides: gleichmäßig, weil dadurch letztlich (ggf. zusätzlich durch Variation der verwendeten Zucker- bzw. Hefemengen) eine größere Kontrolle über den Gaseintrag stattfinden kann; langfristig, weil dadurch die Notwendigkeit verringert wird, nach kurzer Zeit wieder neue Ansätze herstellen zu müssen.

Es bestätigte sich die Vermutung, dass durch die Zugabe des Tortengelees und dadurch bedingter Aushärtung des Zuckergemisches eine gleichmäßigere und länger anhaltendere Kohlendioxid-Produktion gewährleistet werden kann.

Die volumetrischen Messungen ergaben, dass eine austretende Gasblase ein Volumen von etwa 0,083 mL CO₂ beinhaltete. Über 4 Wochen schwankte die Anzahl gebildeter Kohlendioxid-Blasen nahezu konstant zwischen 3 bis 6 Blasen/Minute, entsprechend 0,25 bis 0,5 mL CO₂/Minute. Hingegen konnte bei dem Ansatz ohne Tortengelee eine anfänglich starke Produktion (bis zu 16 Blasen/Minute, entsprechend 1,3 mL CO₂/Minute) mit einer anschließenden stetigen Abnahme, bis nach etwa 3 Wochen das Ende der Gärung erreicht wurde, beobachtet werden. Die längere Laufzeit des Ansatzes mit dem Tortenguss lässt sich vermutlich auf eine Depotwirkung des Zuckergemisches zurückführen. Die Hefe kann das erhärtete Zuckergemisch nur schrittweise abbauen. Im gelösten Zuckergemisch hingegen kann eine rapide Vermehrung der Hefezellen, bedingt durch ein sofort erschließbares Nährsubstrat, stattfinden. Die geringfügig höhere Menge an Zuckern im Ansatz mit dem Tortengelee (12 g) dürfte keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben. Somit eignet sich der modifizierte Ansatz besser für die Kohlendioxid-Düngung in Aquarien. Diese Tatsache nutzen ebenfalls Firmen, die kommerzielle Gärbehältnisse für die Kohlendioxid-Düngung anbieten. Das Zuckergemisch ist hier in einer festen Masse am Boden der Behältnisse eingelassen und nach Zugabe von Wasser und Hefe gebrauchsfertig. Leider findet man dabei keine Angaben über die Herstellung bzw. Zutaten; vermutlich handelt es sich hier ebenfalls um ein durch ein geeignetes Geliermittel erhärtetes Zuckergemisch.

Durch die 'Kalkwasser-Probe' konnte Kohlendioxid als austretendes Gas bei der Gärung qualitativ nachgewiesen werden. Dabei bildet sich aus Calciumhydroxid und CO₂ Wasser und Calciumcarbonat, welches als weiße Trübung beim Durchtritt des Gases durch die Lösung ausfällt.



Methodisch-didaktische Analyse

Für den Vergleich der alkoholischen Gärungen wird eine relativ kurze Vorbereitungszeit (30 Minuten) benötigt, jedoch ist bei der Durchführung zu beachten, dass die statistische Datenerhebung höchst zeitaufwendig ist und eine regelmäßige Datenerfassung erfordert. Die Nachbereitung dauert lediglich 20 Minuten. Eine praktische Umsetzung des Versuches wäre realisierbar, indem man in einer Einzelstunde die Ansätze vorbereitet und an den darauf folgenden Tagen bzw. Wochen zu festgelegten Zeiten eine Datenerfassung vornimmt. Es wurde deutlich, dass für eine komplette Datenauswertung unter den angeführten Versuchsbedingungen durchaus eine Zeitspanne von etwa 4 Wochen eingeplant werden muss. Die weiteren Versuche mit dem gebildeten CO₂ (Nachweis und Volumenbestimmung) sind hingegen in äußerst kurzer Zeit durchführbar. Insgesamt sind für die beiden Versuche etwa 15 Minuten einzuplanen.

Aufgrund der verwendeten Materialien und Chemikalien ist die Durchführung als Schülerversuch unbedenklich; zudem sollten alle verwendeten Materialien der Schule entweder zur Verfügung stehen oder durch eigene Herstellung (Gärbehältnis aus PET-Flasche, Anleitung im Internet) kostengünstig beschafft werden können.

Im Rahmen der Einführung in die organische Chemie in der 10. Jahrgangsstufe kann diese Versuchsreihe zum Thema der alkoholischen Gärung durchgenommen werden und stellt somit eine Alternative zu den prominenteren Schulversuchen zur alkoholischen Gärung, hier vorrangig der Herstellung von Wein oder Bier, dar. Problematisch ist dabei allerdings, dass Ethanol in diesem Versuch eher nebensächlich behandelt wird, wohingegen das Kohlendioxid das eigentliche 'Hauptprodukt' darstellt. Somit fällt letztlich eine definitive Einordnung in den Lehrplan schwer. Durch den Bezug zu biologischen Sachverhalten bietet sich allerdings eine fächerübergreifende Thematisierung an (z.B. Photosynthese). Sollte ein Schulaquarium zur Verfügung stehen, erweitert dies das Spektrum der Möglichkeiten mit einem direkten praktischen Bezug – hier könnte eine CO₂-Düngung installiert werden.

Literatur

McMurry J: Organic Chemistry; 4. Auflage 1996, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, CA, USA

Taiz L, Zeiger E: Physiologie der Pflanzen; 2000, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin

Idee aus:

Diverse Quellen über CO₂-Düngung im Internet, z.B. <http://www.aquaristik.de/artikel/suss3.htm> ;
Zugriff am 16.12.08

Weitere Quellen:

Hessisches Gefahrstoffinformationssystem Schule; <http://www.hessgiss.de/> ; Version 2006

Hessischer Lehrplan Chemie G8; unter <http://www.kultusministerium.hessen.de/> ; Zugriff am 9.12.08

http://www.chemie.uni-regensburg.de/Organische_Chemie/Didaktik/Keusch/D-Backhefe-d.htm ;
Zugriff am 20.11.08

<http://www.aquaristik.de/artikel/suss3.htm> ; Zugriff am 19.11.08