



Das Schülerlabor für Naturwissenschaften und Technik an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg als Partner beim TSP - Projekt

Informationen für TutorInnen
zum Thema „Klimagas Kohlendioxid“

Tobias Leonhard & Michael Schallies
Interdisziplinäres Institut für
Naturwissenschaften, Technik und Gesellschaft
(NTG-Institut)

129289-CP-1-2006-1-DE-COMENIUS-C21

Kohlenstoffdioxid und CO₂-Kreislauf

1 Sachinformationen

Begriffe:

Die Begriffe Kohlendioxid und Kohlenstoffdioxid werden synonym verwendet, die chemische Formel lautet CO₂, der englische Begriff heißt carbon dioxide. Die Schreib- und Sprechweise mit -y (also Kohlenstoffdioxyd) ist veraltet.

Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid:

Kohlenstoffdioxid ist ein farbloses, geruchloses und im wesentlichen geschmackloses Gas. Bei hohen Konzentration löst sich CO₂ in den Schleimhäuten zu HCO₃⁻ und H⁺, dadurch kommt der saure Geschmackseindruck zustande. Die viel beschriebene Kohlensäure („H₂CO₃“) ist hingegen nicht existent. Weitere Eigenschaften¹:

- farblos unter Druck verflüssigbares Gas, bei Umgebungsdruck nur fest (Trockeneis) oder gasförmig
- nicht brennbar
- schwerer als Luft im gasförmigen Zustand
- verdampft rasch beim Entspannen, kühlt sich dabei ab, bildet Kohlendioxidschnee (Trockeneis)
- Trockeneis ist tiefkalt (-78,5°C) und erzeugt Erfrierungen
- geht bei Erwärmung vom festen Zustand direkt in die Gasphase über (Sublimation)
- nicht giftig, jedoch Wirkung u.a. auf Herzrhythmus und Atemfrequenz
- bereits Konzentrationen von 8-10 % können nach 30-60 Minuten tödlich sein

Aussehen	farblos, in fester Form weiß, eisartig
Geruch	geruchlos
Molmasse	44,01 g/mol
Zustand bei 20 °C	gasförmig
Siedepunkt (Sublimation)	-78,5 °C
Explosionsgrenze (in Luft)	entfällt
Zündtemperatur	entfällt
Dichte, gasförmig (15 °C; 1 bar)	1,85 kg/m ³
Relative Dichte, gasförmig (Luft = 1)	1,53
Dichte, flüssig (-37,22 °C; 11,146 bar)	1101,1 kg/m ³
Dampfdruck bei 20 °C	57,4 bar
Löslichkeit in Wasser (20 °C; 1 bar)	0,851 L/kg

¹ <http://www.airliquide.de/loesungen/produkte/gase/gasekatalog/stoffe/kohlendioxid.html>

Nachweis von Kohlenstoffdioxid:

Ein Stoff, der mit den Sinnen praktisch nicht wahrnehmbar ist, wird in der Chemie mittels eines spezifischen Nachweisverfahrens festgestellt. Nachweise dienen dazu, die Entstehung solcher Stoffe bei unterschiedlichen Prozessen zu untersuchen. Nachweisreaktionen sind manchmal nicht eindeutig. In der Schulchemie lernen Schüler zumeist den Sauerstoffnachweis mittels „Glimmspanprobe“, den Wasserstoffnachweis mittels „Knallgasprobe“, evtl. den Wassernachweis mit Kobaltchlorid- bzw. Watesmo-Papier und den Kohlenstoffdioxidnachweis mit Kalkwasser. „Kalkwasser“ ist die Trivialbezeichnung für eine wässrige Lösung von Calciumoxid CaO. Das CaO löst sich in Wasser nur mäßig (1,65 g/cm³ bei 20°C). Zur Herstellung von Kalkwasser als Nachweismittel für CO₂ werden 2 g CaO in 1000 mL Wasser gerührt. Nicht lösliche Anteile werden mittels Nutsche und Wasserstrahlpumpe abfiltriert. So erhält man eine gesättigte Lösung. CaO reagiert mit Wasser unter Wärmeentwicklung zu Ca(OH)₂, dem sog. Calciumhydroxid.

Leitet man nun CO₂ in eine Ca(OH)₂-Lösung ein, trübt sich die Lösung weiß ein, weil schwerlösliches Calciumcarbonat (CaCO₃) entsteht: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Diese Trübung ist der Nachweis für Kohlenstoffdioxid, zeigt also, dass es sich dem eingeleiteten unbekanntem Gas um Kohlenstoffdioxid handelt.

Bei fortgesetzter Einleitung von CO₂ lässt sich beobachten, dass der Niederschlag wieder verschwindet. Das liegt daran, dass sich durch weiteres Lösen von CO₂ Calciumcarbonat (schwerlöslich) in Calciumhydrogencarbonat (leicht löslich) umwandelt. Der Niederschlag verschwindet. Es handelt sich um eine Gleichgewichtsreaktion.



Didaktische Anmerkung: In einer der vergangenen Labortage wurde deutlich, dass der Begriff „Kalkwasser“ bei Schülern nicht als Nachweismittel besetzt ist, sondern mit kalkhaltigem Wasser assoziiert wird, das eben Kalkflecken hinterlässt. Die TutorInnen sollten also den Begriff Kalkwasser nicht als selbstverständlich bekannt voraussetzen, sondern ihn erklären. Genauso sollte thematisiert werden, warum man Kohlenstoffdioxid überhaupt nachweisen muss.

Entstehung von Kohlenstoffdioxid:

Bei der Entstehung von Kohlenstoffdioxid auf der Erde unterscheidet man zwischen natürlichen Quellen und vom Menschen "künstlich" verursachten, sogenannten anthropogenen Quellen.

Natürliche Quellen:

Kohlenstoffdioxid ist ein Bestandteil der vulkanischen Gase. Bei der Zellatmung der Tiere

und Menschen werden die Kohlenhydrate durch Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser verbrannt. Die ausgeatmete Luft von Menschen besteht zu ca. 5% aus Kohlenstoffdioxid. Aber auch bei der alkoholischen Gärung sowie der Zersetzung und dem Faulen organischer Substanzen wird Kohlenstoffdioxid gebildet. Beim Arbeiten in Gärkellern, Grünfuttersilos, Faulgruben usw. ist daher größte Vorsicht geboten.

Anthropogene Quellen:

Bei der Verbrennung von Holz, Kohle und Erdöl beziehungsweise Erdölprodukten und Erdgas, kurz: immer dann, wenn organische Substanz verbrannt wird, entsteht Kohlenstoffdioxid. Vom Menschen verursachte Quellen für Kohlenstoffdioxid sind konventionelle Kraftwerke, der Straßenverkehr, die Heizungen der privaten Haushalte, Industrien, die mit Kohle, Öl oder Gas betrieben werden, aber auch Steppen- und Waldbrände sowie die Brandrodung von Urwäldern.

Das aus natürlichen oder vom Menschen verursachten Quellen entstehende Kohlenstoffdioxid geht zunächst in die Atmosphäre, kann sich anschließend in Gewässern lösen oder wird von grünen Pflanzen aufgenommen. Die Pflanzen bauen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser Biomasse auf und geben dabei Sauerstoff ab. Es ergibt sich ein Kreislauf des Kohlenstoffdioxids in der Natur. Ein Rest von 0,034% Kohlenstoffdioxid verbleibt in der Luft.

Die folgende Abbildung zeigt den Kohlenstoffkreislauf der Erde (Abbildung aus: <http://www.whrc.org/carbon/index.htm>): Die Zahlen quantifizieren die gespeicherten bzw. in einem Jahr umgesetzten Mengen (bezogen auf die Masse des Kohlenstoffs in der Einheit GtC = Gigatonnen Kohlenstoff = Milliarden Tonnen Kohlenstoff) im Kohlenstoffkreislauf. Als Bezugsgröße wählt man die Masse des Kohlenstoffs, weil diese in den Kreisläufen in den unterschiedlichen Verbindungen (als Kohlenhydrat, als Oxid, als Carbonat) erhalten bleibt. Eine Gigatonne Kohlenstoff entspricht ca. 3,6 Gigatonnen Kohlenstoffdioxid.

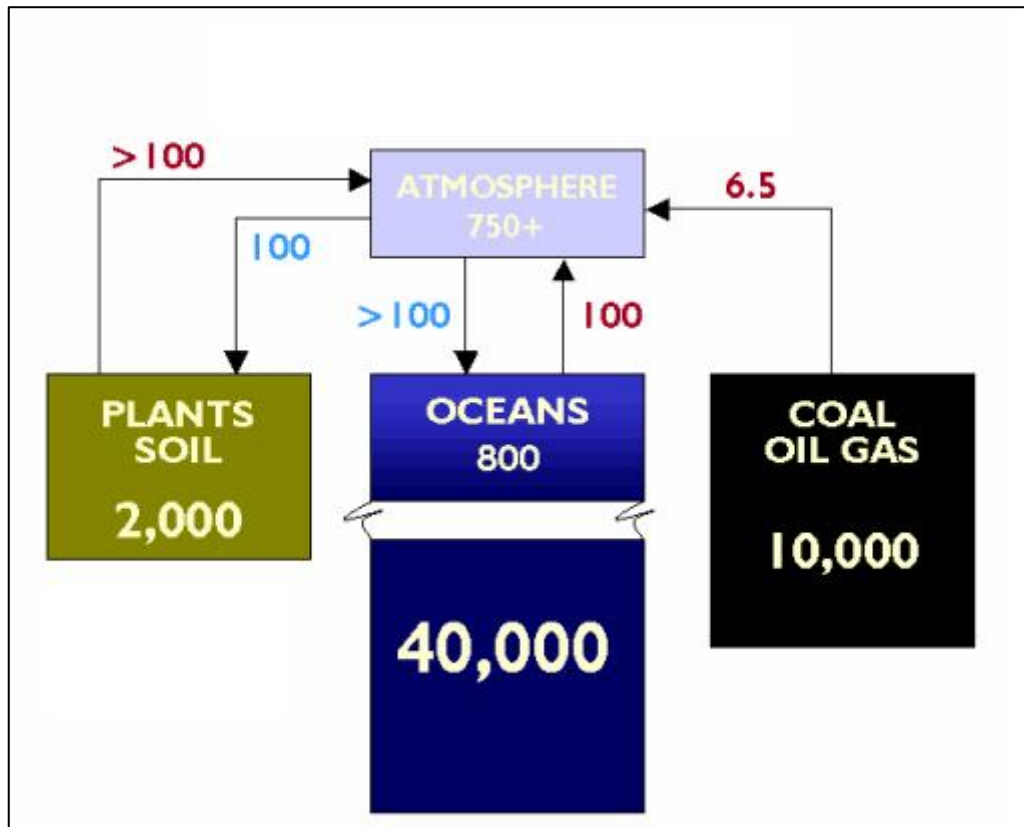


Abb. 1: Der globale Kohlenstoffkreislauf. Graphik ©Woods Hole Research Center, 2007.

Angaben in Milliarden Tonnen Kohlenstoff / Jahr

Die Abbildung zeigt mehrere bemerkenswerte Aspekte:

- **Bedeutung der Ozeane:** Ozeane sind die mit Abstand größten Kohlenstoffsinken. Davon sind 800 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in den oberflächennahen Abschnitten der Ozeane gebunden. Sie stehen im Austausch mit der Atmosphäre. Der größere Anteil von 40 000 Milliarden Tonnen ist in den tieferen Schichten und Sedimenten gebunden. Er ist nicht unmittelbar in den Kreislauf eingebunden.
- **Potential der fossilen Energieträger:** Auch wenn nicht alle der fossilen Energieträger wirtschaftlich nutzbar sind, zeigt sich doch, welches gewaltige Potential die weitere intensive Nutzung fossiler Energieträger in Hinblick auf die Erhöhung der Kohlenstoffmengen in der Atmosphäre hat.
- **Einbahnstraße fossile Energieträger:** Aufgrund der Pfeile wird deutlich, dass Biosphäre und Ozeane im Jahresverlauf eine im Wesentlichen ausgeglichene Bilanz aufweisen, wohingegen die Nutzung der fossilen Energieträger eine Einbahnstraße in Richtung Freisetzung zusätzlichen Kohlenstoffdioxids ist.

Der „Treibhauseffekt“:

Durch Vergleich von Erdoberfläche und unterer Atmosphäre mit einem Treibhaus soll eine Analogie geschaffen werden, die letztlich das Phänomen erklären soll, warum sich die Erde wie das Innere des Treibhauses bei Sonneneinstrahlung erwärmt. Das Funktionsprinzip des Treibhauses ist schnell erklärt. Glas lässt Licht durch, dieses Licht wird am Boden z.T. in Wärmestrahlung umgewandelt. Wärmestrahlung wird aber vom Glas nicht oder nur schlecht „durchgelassen“, sammelt sich so im Treibhaus und führt zur Erwärmung.

Die Vorgänge auf der Erde und in der unteren Atmosphäre sind wesentlich komplexer, weswegen die Analogiebildung nicht zu weit getrieben werden sollte.

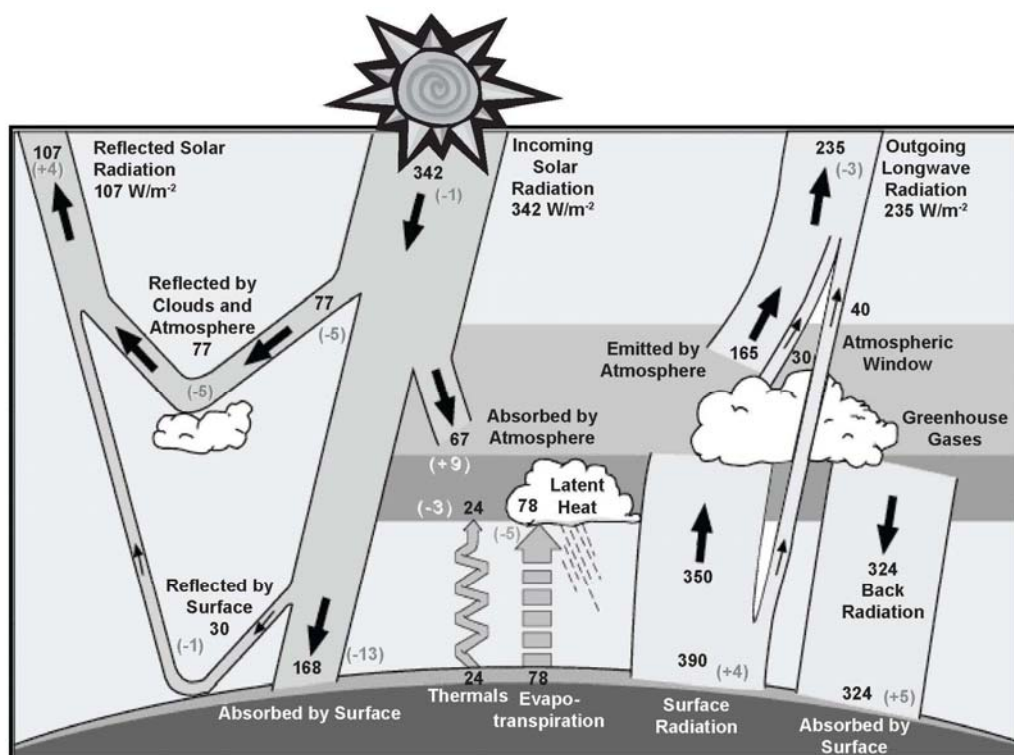


Abb. 2: Globale Energiebilanz. Graphik aus „Climate change 2007. The physical science basis“

Der „gute“ und der „böse“ Treibhauseffekt: Inzwischen ist der Begriff Treibhauseffekt als eine medial vermittelte Horrorvision etabliert. Für viele Schüler völlig neu ist hingegen, dass er (und seine Verursacher) gleichzeitig die Grundlage jeden Lebens auf der Erde darstellen. Der natürliche Treibhauseffekt sorgt dafür, dass sich die globale Jahresdurchschnittstemperatur von -18°C auf ca. $+15^{\circ}\text{C}$ erhöht, also um gewaltige 33° ! Ursache dieser Temperaturerhöhung sind vergleichsweise geringe Mengen sog. Spurengase, die zum einen Licht absorbieren und als Wärmestrahlung emittieren, zum anderen aber auch Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche emittiert wird, absorbieren und somit die Emission in den Weltraum teilweise verhindern. Die Hauptbestandteile der

Atmosphäre, also Stickstoff und Sauerstoff, die zusammen 99% der Atmosphäre bilden, haben diese Eigenschaft nicht. Als sogenannte Treibhausgase wirken:

Name	geschätzter Anteil am Treibhauseffekt in %
Wasser als Wasserdampf	65
Kohlenstoffdioxid	15
Ozon	10
Distickstoffoxid	3
Methan	3

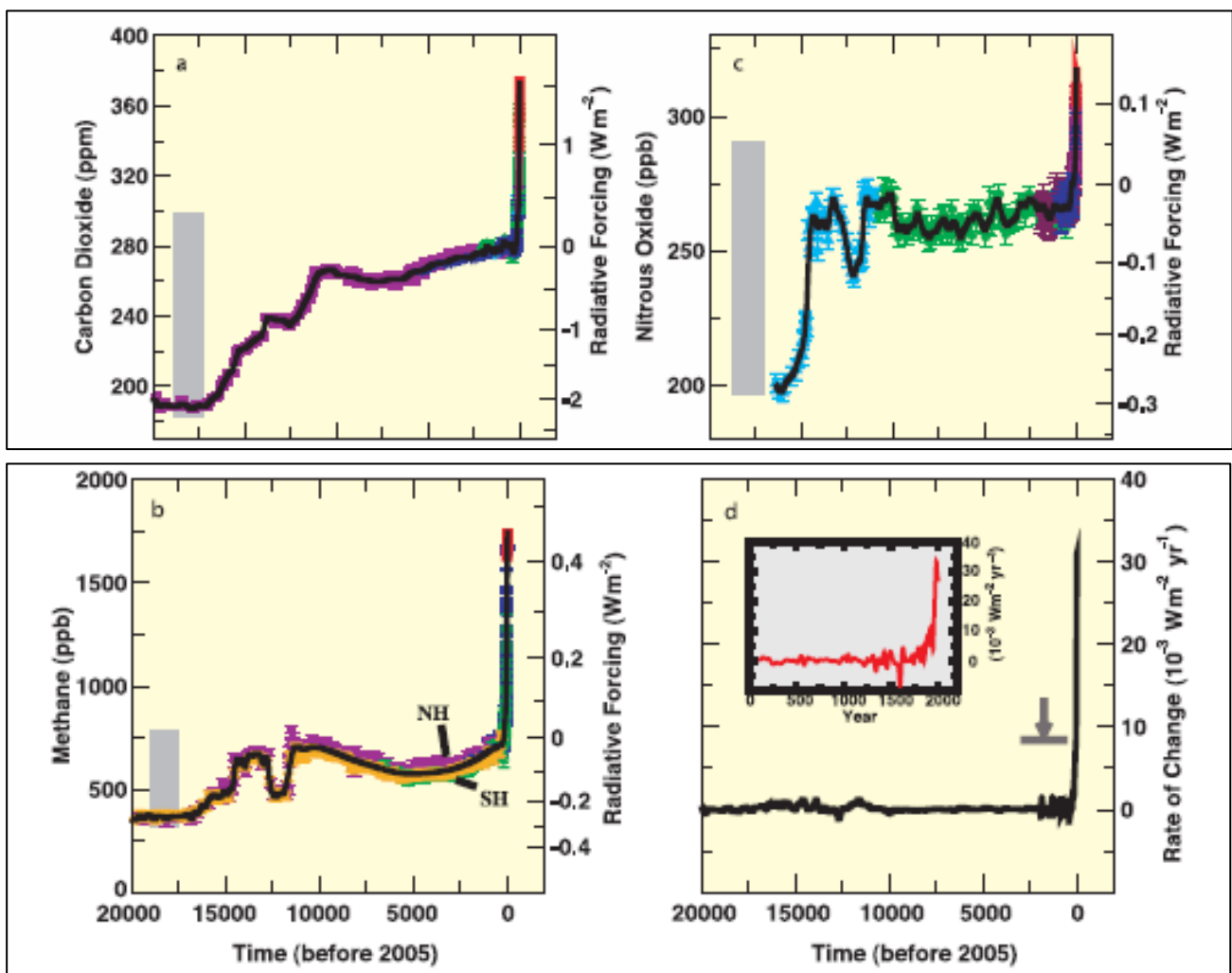


Abb. 3: Anstieg der Treibhausgase. Graphiken aus „Climate change 2007. The physical science basis“

So weit so gut und so natürlich. Der „schlechte“ (anthropogene, d.h. vom Menschen verursachte) Treibhauseffekt wird darauf zurückgeführt, dass der Mensch seit Beginn der Industrialisierung in zunehmendem Maße fossile Energieträger als Energiequelle nutzt und

die damit verbundene Freisetzung von Kohlenstoffdioxid billigend in Kauf nimmt. Auch die zunehmende Intensivierung der Land- und Viehwirtschaft trägt zum anthropogenen Treibhauseffekt durch die Freisetzung von Methan bei. Für diese Hypothese spricht der Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Atmosphäre von ca. 0,028% auf 0,036% und ein Temperaturanstieg um 0,6°C im Verlauf der letzten 150 Jahre. Die Folge der Erhöhung ist eine Temperaturänderung. Die Korrelation zwischen Kohlenstoffdioxid-Konzentration und Temperatur in diesem Zeitraum ist jedoch kein strenger Beweis über die Kausalität zwischen beiden Variablen. Als von Wissenschaftlern weitgehend akzeptierte Hypothese ist sie jedoch Grundlage aller Klimaschutzbemühungen auf nationaler wie internationaler Ebene. Denn die Konsequenz aus der Hypothese lautet: Der Mensch ist Verursacher, also muss der Mensch sein Konsum- und Energieverhalten ändern.

Es gibt eine Reihe von Gegenstimmen, die die vorhandenen Daten anders interpretieren, bzw. andere Daten verwenden. Laut Hypothese der Kritiker ist die Erwärmung der Erde nicht Folge der Zunahmen der Kohlenstoffdioxid-Konzentration, sondern deren Ursache. Begründung: Aufgrund höherer Sonnenaktivität entsteht die Klimaerwärmung, und diese Temperaturerhöhung bewirkt die Erhöhung der Kohlenstoffdioxidkonzentration dadurch, dass sich z.B. in wärmerem Wasser weniger Kohlenstoffdioxid löst als in kaltem. Beliebt ist auch der Verweis auf längere Zeiträume, so dass sich Entwicklungen der letzten 100 Jahre oder gar der letzten 30 Jahre statistisch gewaltig relativieren. Es ist relativ schwierig, die Daten der Befürworter wie Gegner des anthropogenen Treibhauseffekts im Detail miteinander zu vergleichen. In jedem Fall kann festgehalten werden, dass eine Verminderung des Kohlenstoffdioxidausstoßes bzw. die effizientere und sparsamere Verwendung von fossilen Energieträgern nur positive Effekte haben kann.

Auch der Begriff der Nachhaltigkeit, also nicht auf Kosten der zukünftigen Generationen zu leben, behält in jedem Fall seine Bedeutung. Die Endlichkeit der Ressourcen, ob man sie nun verbrennt oder als Grundstoff für die chemische Industrie nutzt, ist der limitierende Faktor, der einen sinnvollen Umgang mit eben diesen Ressourcen und die Suche nach alternativen Ressourcen erforderlich macht.

Folgen des Treibhauseffektes:

Man ist als Anhänger der Hypothese des anthropogenen Treibhauseffektes versucht, jedem besonderen klimatischen Ereignis das Gewicht eines Evidenzbeweises für die Hypothese zu geben. Ob Oderhochwasser 2002, „Dürresommer“ 2003 oder andere extreme Wetterereignisse, man kann glauben, dass diese ihre Ursache im Treibhauseffekt haben, belegbar und wissenschaftlich seriös sind solche Aussagen jedoch nicht. Auch im

Schülerlabor *science-live!* sollte nur von Hypothesen gesprochen werden. Auf die möglichen Folgen des anthropogenen Treibhauseffektes soll deswegen auch nicht vertieft eingegangen werden.

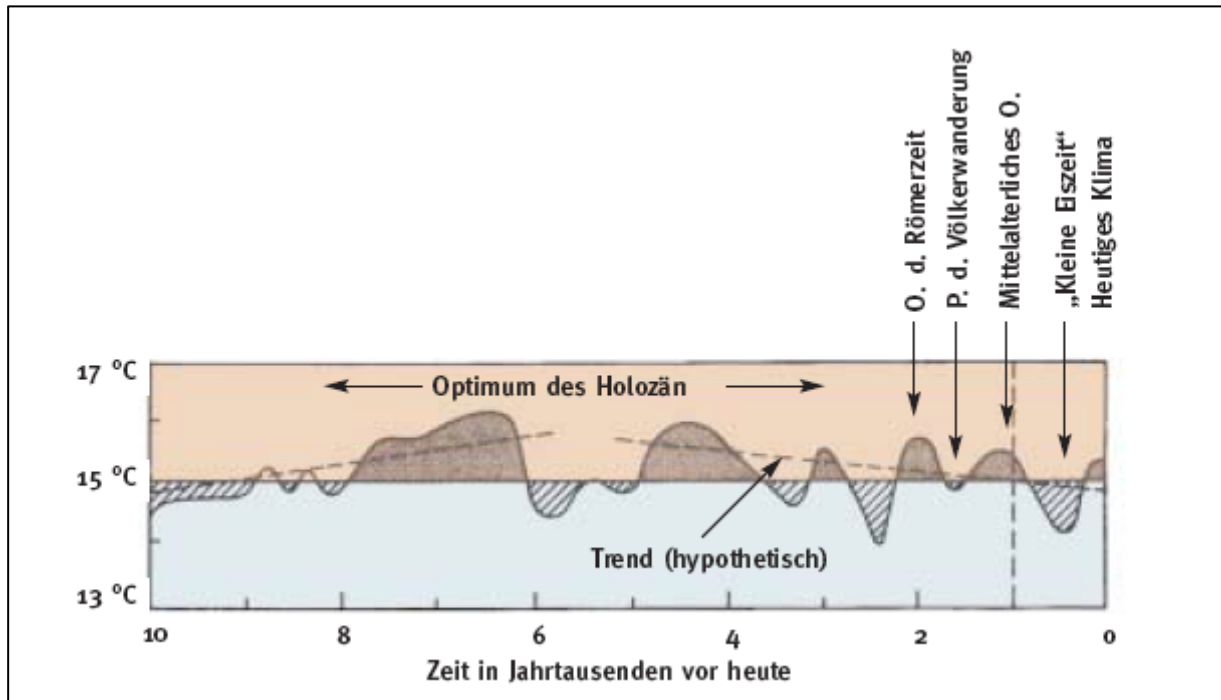


Abb. 4: Entwicklung der durchschnittlichen Temperaturen im Verlauf der Zeit. Nach Dansgaard et al. (1969) & Schönwiese (1995)

Technische Lösungen des Kohlenstoffdioxidproblems:

Ein Paradebeispiel technikinduzierten Vorgehens sind die Versuche, das bei der Verbrennung von fossilem Material entstehende Kohlenstoffdioxid herauszuwaschen, um es dann in unterirdische Lagerstätten zu verbringen. Es werden zwei chemische Verbindungen vorgeschlagen:

1. Monoethanolamin, das mit CO_2 zu einer Verbindung reagiert, aus der es durch Erhitzung wieder frei gesetzt werden kann.
2. kaltes Methanol, in dem sich CO_2 sehr gut löst.

Das so gewonnene CO_2 soll dann unter Druck verflüssigt werden und in ehemalige Bohrlöcher unter der Nordsee gepumpt werden. Eine zutreffende Vision? Details dazu unter

www.nzz.ch/2003/08/06/ft/page-article902Z1.html .

2 Kohlenstoffdioxid bei *science-live!*

2.1 Versuchsmöglichkeiten im Überblick

Versuche	Denkbare Ziele
Nachweis	Sinn einer Nachweisreaktion, Begründung über Eigenschaften, typische Nachweisreaktion kennen lernen
Eigenschaften	Feuerlöschermodell, größere Dichte als Luft, Löslichkeit in Abhängigkeit der Wassertemperatur, Farbe, Geruch Geschmack
Entstehung	Analyse von Verbrennungsprozessen, Atmung, Zellatmung bei Hefe
„Speicherung“	Vorkommen in Muscheln, Eierschalen, Brausetabletten
Treibhauseigenschaft	Begriff „Treibhauseffekt“, zwei Arten des Treibhauseffekts, Grenzen der Analogie, Veranschaulichung auf Plakat
Suche nach CO ₂ -Quellen	Konzentrationsbestimmung mit Messgerät, Verdünnung zu hoher Konzentrationen

2.2 Versuche zu den Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid

Anmerkung: Die folgenden Versuchsanleitungen stammen von Jasmin Borst, ihre Quellen sind im Verlauf zusätzlich angegeben. Nicht alle notierten Versuche lassen sich mit den zur Verfügung stehenden Materialien durchführen (so fehlt z.B. ein „Sodamax“ CO₂-Sprudler).

2.2.1 Nachweis von Kohlendioxid durch Kalkwasser (Ca(OH)₂)

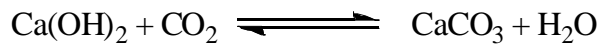
Beschreibung:

Mit einem Sodaclubgerät wird eine Flasche Sprudel hergestellt. Dies geschieht, indem man mit Hilfe des Gerätes Kohlendioxid aus einer Patrone in eine gefüllte Wasserflasche einleitet. Alternativ benutzt man eine Flasche Mineralwasser mit Kohlensäure. Das Kohlendioxid löst sich nach folgender Gleichung im Wasser:

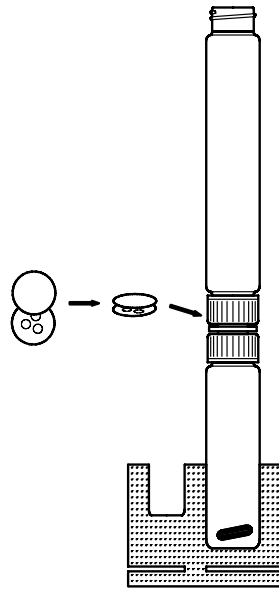


Anschließend gibt man etwas von dem Sprudel (etwa 10 mL) in ein Reaktionsgefäß des Minilabors sowie eine Magnetrührnadel. Dieses stellt man in einen Aluminiumblock auf einen Magnetheizrührer. Auf das Reaktionsgefäß schraubt man eine Kupplung mit Filterscheibe und PTFE-Membran und setzt ein Gewinderohr darauf. In das Gewinderohr gibt man etwa 2 Finger breit Kalkwasser. Nun erwärmt man das Sprudelwasser unter Rühren.

Beim Erwärmen entweicht das Gas aus dem Wasser und strömt durch das Kalkwasser, dieses trübt sich und es entsteht ein weißer Niederschlag:



Nach der Beobachtung können die Schüler anhand der Aufschrift auf der Gaspatrone kontrollieren, um welches Gas es sich handelt.



Aufbauvorschlag:

2.2.2 Ersticken einer Kerzenflamme durch Kohlendioxid

Beschreibung

Man füllt Kohlenstoffdioxid in einen Rundkolben. Diesen Rundkolben verschließt man mit einem Stopfen. Nun entzündet man ein Grablicht oder ein Teelicht (letzteres in kleines Becherglas stellen). Dann gießt man den Inhalt des Rundkolbens auf's Grablicht /Teelicht. Die Flamme erstickt. Mögliche Schlussfolgerungen: CO_2 ist nicht brennbar, CO_2 erstickt die Flamme, verdrängt die Luft; (aber auch nachträglicher und zusätzlicher Beweis für die höhere Dichte von CO_2 im Vergleich zu Luft).

In diesem Zusammenhang ist ein Verweis auf die Feuerlöscher im Labor angebracht, beide Löscher sind Kohlendioxidlöscher.

2.2.3 Dichte von Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid besitzt eine größere Dichte als Luft. Da der Begriff „Dichte“ ein schweres, weil abgeleitetes Konzept ist (Quotient aus Masse und Volumen), formulieren die Schüler zumeist nur die Frage, ob CO_2 leichter oder schwerer als Luft ist. Ein einfacher Versuch ist zunächst das Befüllen eines Luftballons mit CO_2 , die Tatsache, dass er nicht nach oben steigt, zeigt, dass er zumindest nicht leichter als Luft ist (genau: nicht wesentlich leichter,

wegen der Masse des Luftballons). Nun füllt man einen zweiten Ballon mit Luft (aufblasen). Durch gleichzeitiges Fallenlassen aus gleicher Höhe erkennt man, dass der mit Kohlenstoffdioxid gefüllte Ballon deutlich schneller fällt.

2.2.4 Sinnlich wahrnehmbare Eigenschaften

Dass CO_2 farblos ist, ist klar. Neu für Schüler ist aber, dass CO_2 in hoher Konzentration säuerlich riecht und schmeckt. Dazu einen leichten Gasstrom aus der Stahlflasche riechen bzw. schmecken lassen. Beschreibung der Schüler: „Wie Kohlensäure“. Tatsächlich löst sich CO_2 in den Schleimhäuten und bildet H^+ -Ionen und HCO_3^- -Ionen. Die H^+ -Ionen sind für den saueren Geschmackseindruck verantwortlich

2.2.5 Vorkommen und Darstellung von Kohlendioxid

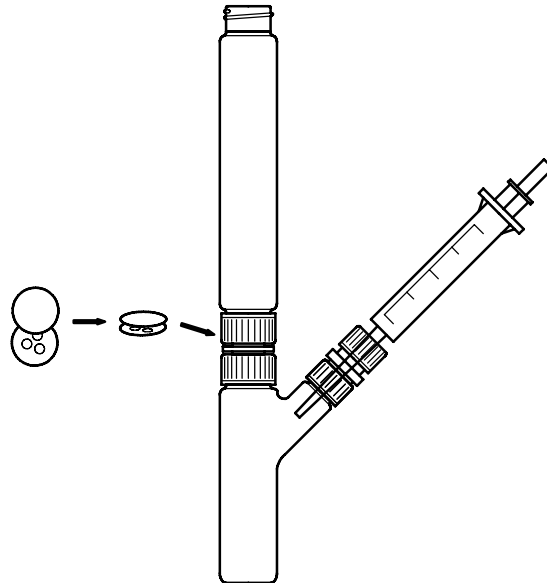
Die folgenden Versuche haben den Zweck, das vielfältige Vorkommen und Entstehen von Kohlendioxid im Umfeld der Schüler aufzuzeigen. Es sollen hierbei so viele Quellen für Kohlendioxid wie möglich gezeigt werden, wobei sich der Bogen von Gegenständen des täglichen Lebens, wie z.B. Brausetabletten und Mineralwasser, über Gegenstände, in denen man kein Gas vermutet hätte, wie Muscheln und Eierschalen, bis hin zu Lebewesen und dem Menschen selbst spannt. Natürlich wird auch die Hauptquelle für Kohlendioxid, der Verbrauch fossiler Brennstoffe gezeigt. Hier soll nicht nur ein qualitativer Nachweis erbracht, sondern auch die quantitative Dimension der Kohlendioxidproduktion aufgezeigt werden, um die Schüler für das resultierende Problem zu sensibilisieren. Auch die feste Form von Kohlendioxid, das Trockeneis, wird berücksichtigt. So erhalten die Schüler einen tiefen und breiten Einblick in die Thematik und werden zusätzlich in die Lage versetzt, das Problem der globalen Erwärmung und der Rolle des Menschen dabei zu erfassen.

2.2.6 Kohlendioxid aus Brausetabletten

Beschreibung:

Eine halbe Brausetablette wird zerbröselnd in ein Minilabor Reaktionsgefäß gegeben. Darüber wird ein Gewinderohr mit etwas Kalkwasser montiert. Über eine Spritze werden 5 mL Wasser zugegeben. Die Tablette löst sich unter Freisetzung von Kohlendioxid auf. Dieses strömt durch das Kalkwasser, es entsteht ein weißer Niederschlag aus Calciumcarbonat.

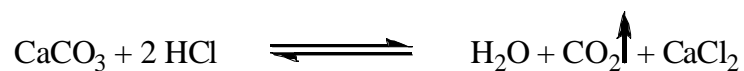
Aufbauvorschlag:



2.2.7 Freisetzung von Kohlendioxid aus Muscheln, Schneckenhäusern, Eierschalen und Kalkstein

Beschreibung:

In ein Minilabor Reaktionsgefäß wird eine zerkleinerte Muschel gegeben. Auf das Reaktionsgefäß wird ein Gewinderohr montiert, in dem sich etwas Kalkwasser befindet. Über eine Spritze werden 5 mL Salzsäure (9%) zugesetzt. Es entsteht ein Gas, dieses strömt durch das Kalkwasser, und ein weißer Niederschlag entsteht:



Anschließend wird der Versuch jeweils mit etwas Kalkstein, Eierschale und einem Schneckenhaus wiederholt.

Aufbauvorschlag:

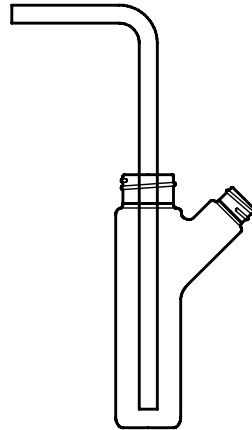
Wie bei Versuch 2.2.6

2.2.8 Kohlendioxid als Produkt der menschlichen Atmung

Beschreibung:

In ein Minilabor Reaktionsgefäß mit 45° Seitenarm wird zwei Finger breit Kalkwasser gegeben. Durch die Gefäßöffnung wird ein gebogenes Glasrohr (oder ein Strohhalm) bis in das Kalkwasser hinein gegeben. Durch dieses pustet man vorsichtig und stetig ins Kalkwasser. Dabei entsteht ein weißer Niederschlag.

Aufbauvorschlag:



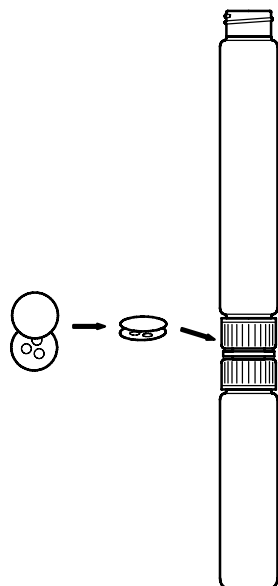
2.2.9 Kohlendioxid aus der Zellatmung von Hefe

Beschreibung:

Ein Gefrierbeutel mit 1 L Fassungsvermögen wird mit $\frac{1}{2}$ Würfel Hefe, 200 mL warmem Wasser aus der Leitung und 2 Löffeln Glukose gefüllt. Mit einem Haushaltsgummi wird ein dünner Silikonschlauch am Ausgang des Beutels befestigt. Dieser wird mit einer Schlauchklemme verschlossen, wobei man so wenig Luft wie möglich mit einschließen sollte. Man muss den Beutel etwa 10 min wärmen, etwa in den Händen. Dabei ist zu beobachten, wie sich der Beutel mit Gas füllt. In 10 min entstehen etwa 200 mL Gas. Anschließend wird die Schlauchklemme gelöst und der Schlauch in ein Minilabor Reaktionsgefäß mit Kalkwasser gehalten. Durch Druck auf den Beutel wird das Gas in das Kalkwasser eingeleitet, welches sich trübt.

Aufbau:**2.2.10 Festes Kohlendioxid****Beschreibung:**

Ein kleines Stück Trockeneis (festes Kohlendioxid) wird in ein Minilabor Reaktionsgefäß gegeben. Auf das Reaktionsgefäß wird ein Gewinderohr mit etwas Kalkwasser montiert. Beim Sublimieren wird das freigewordene Gas durch die Ausdehnung in das Gewinderohr gedrückt und strömt so durch das Kalkwasser. Dieses trübt sich.

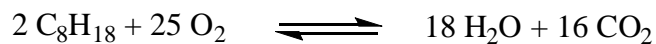
Aufbauvorschlag:

2.2.11 Kohlendioxid als Produkt der Verbrennung von Benzin

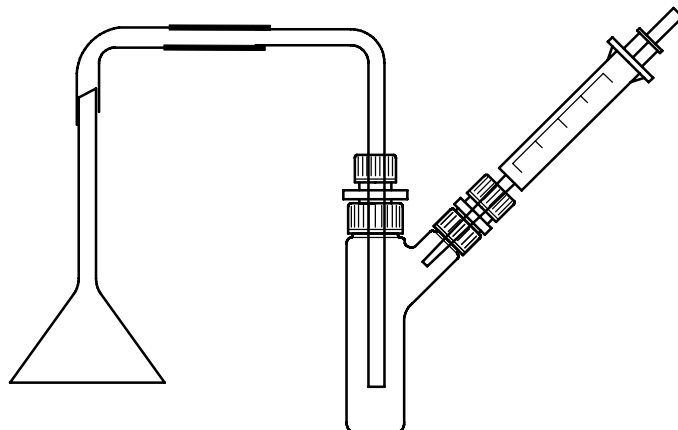
Beschreibung:

Ein Trichter wird über einen Schlauch an einem doppelt abgewinkelten Glasrohr befestigt. Das andere Ende des Glasrohres wird über eine Kupplung mit Dichtung mit einem Minilaborreaktionsgefäß mit Seitenarm verbunden. An den Seitenarm wird über eine Kupplung mit Dichtung eine leere Spritze angebracht. Ein Benzinfeuerzeug wird entzündet und unter dem Trichter platziert. Mit der Spritze wird durch Ziehen ein Unterdruck erzeugt. Dies muss mehrmals hintereinander geschehen. Zum Entleeren der Spritze wird sie aus der Kupplung genommen. Das entstehende Gas wird durch den Unterdruck in das Kalkwasser geleitet, welches sich trübt.

Reaktionsgleichung für die Verbrennung am Beispiel von Oktan:



Aufbauvorschlag:



2.3 Kohlenstoffdioxid als Klimagas, Kohlenstoffkreislauf

2.3.1 Die Treibhauseigenschaften von Kohlenstoffdioxid:

Bei diesem Versuch wird die Absorptionsfähigkeit bestimmter Gase für die von der Lichtquelle ausgesandte Strahlungsenergie untersucht. Die von den Gasen absorbierte Strahlungsenergie wird wiederum als Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) emittiert und heizt so die Umgebung auf. Für diesen Versuch stellen wir zunächst die Magnetwand mit Hilfe zweier Stative auf. 3 Glasröhren aus dem Minilabor werden an einer Seite mit einem Schraubdeckel dicht verschlossen, auf der anderen Seite wird eine Thermometerkupplung aufgeschraubt. Die Gläser werden nun mit Gasen gefüllt: ein Glas bleibt mit Luft gefüllt, es kann sofort durch Einstecken des Thermometers verschlossen und mittels Magnethalterung an der Experimentierwand befestigt werden. Das zweite Glasrohr wird mit Kohlenstoffdioxid

aus der Druckflasche befüllt (Einfüllschlauch und Glasspitze liegen im Schrank), ebenfalls mit einem Thermometer verschlossen und an der Magnetwand befestigt. Ebenso verfährt man mit dem dritten Glasrohr, das mit Methan (Erdgas aus der Leitung) gefüllt wird. Nun schaltet man die Thermometer ein und vergleicht die Ausgangswerte. Möglicherweise unterscheiden sie sich ein wenig durch die unterschiedlichen Gastemperaturen, das nivelliert sich aber wenn man die Glasröhren eine Weile unbeleuchtet stehen lässt. Die folgende Abbildung zeigt den Aufbau:

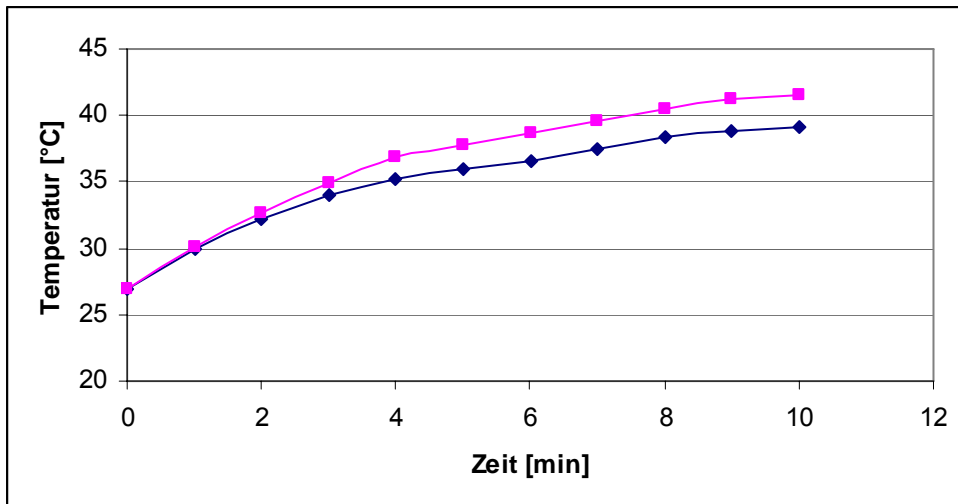


Bevor man den Halogenstrahler, der vor der Experimentierplatte aufgebaut wurde und frontal alle Glasröhren anstrahlt, einschaltet, sollten zunächst Analogien gefunden werden. Was an dem Aufbau entspricht denn welchen Gegebenheiten in der Wirklichkeit? Das Experiment vergleicht im Prinzip 3 unterschiedliche Atmosphären miteinander, der Einfluss der Erdoberfläche spielt bei dem Versuch keine Rolle (vgl. Alternativversuch). Auch bietet sich hier an, eine Hypothese zu bilden. („Bevor Ihr anfangt: Was erwartet Ihr als Ergebnisse? Wie kann man diese Erwartung begründen?“) Also statt sich „überraschen“ zu lassen und erst nach dem Ergebnis das Hirn zwecks Deutung einzuschalten, sollte vorher darüber nachgedacht werden, welche Ergebnisse erwartet werden. Auch das ist naturwissenschaftliches Vorgehen. Ein weiterer Aspekt, der vor dem eigentlichen Versuch geklärt werden muss, ist die Dokumentation der Ergebnisse. Dazu sollen die Schüler selbst überlegen, auf welche Weise man solche Ergebnisse am besten festhält. Von einer von

Beginn an grafischen Darstellung muss dabei abgeraten werden. Es bietet sich zunächst eine Tabelle an, in der der Zeitverlauf dem Temperaturverlauf in 3 unterschiedlichen Glasröhren gegenübergestellt werden soll. (Also: wie viele Zeilen, wie viele Spalten?) Ist die Tabelle fertig (Werte für $t=0$ min eintragen!), eine klare Hypothese formuliert und aufgeschrieben worden, kann der Versuch gestartet werden. Dazu wird der Halogenstrahler eingeschaltet und die Temperatur in allen drei Glasröhren jede Minute abgelesen und notiert. Nach 10 bis 12 Minuten ist der Effekt hinreichend deutlich geworden. Nun überträgt man die Ergebnisse in ein Schaubild. Auch hier stellt sich die Frage nach der optimalen Darstellung der Ergebnisse. (Wie müssen die Achsen beschriftet sein, wo fängt die Temperaturskala an?). Sind die Ergebnisse visualisiert geht es unter Rückgriff auf die Hypothese an die Deutung der Ergebnisse. Welchen Einfluss haben nun Klimagase wie Kohlenstoffdioxid und Methan auf die Atmosphäre? In wieweit lassen sich die Ergebnisse des Modellversuchs auf die Realität übertragen?

2.3.2 Alternativversuch:

Etwas anschaulicher (also weniger abstrakt) ist ein ähnlicher Versuch mit zwei gleich großen Standzylindern. Auf dem Boden der Standzylinder liegt eine schwarze Scheibe, die die Erdoberfläche darstellen soll, darüber befindet sich eine Atmosphäre, die sich wie im vorherigen Versuch mit unterschiedlichen Gasen gestalten lassen kann. Zur Vermeidung von Konvektionsverlusten in den Zylindern liegt ein (weißer) Deckel auf dem Standzylinder, durch dessen Mitte ein Thermometer in den Zylinder ragt. Die Beleuchtung erfolgt nun nicht frontal, sondern so schräg, dass sowohl die „Erdoberfläche“ als auch die Atmosphäre beleuchtet werden, aber nicht die Thermometergehäuse. Der Abstand sollte 30 cm nicht unterschreiten. Ein Standzylinder ist nur mit Luft gefüllt, er wird sofort verschlossen. Der zweite wird mit CO_2 aus der Gasflasche befüllt und dann ebenfalls verschlossen. Nachdem eine Tabelle erstellt und die Ausgangstemperatur beider Gläser ermittelt wurde, schaltet man den Halogenstrahler ein und liest jede Minute die Temperatur in beiden Gläsern. Die folgende Tabelle zeigt eine Beispielmessung: T 1 = Temperatur im luftgefüllten Standzylinder, T 2 = Temperatur der CO_2 Atmosphäre.



2.3.3 Messung unterschiedlicher Kohlenstoffdioxidkonzentrationen:

Mit Hilfe des Kohlenstoffdioxid-Messgeräts (Fabrikat Leybold Didactic) lassen sich Konzentration zwischen 0,01% und 10% in Gasproben messen. Der Messfühler arbeitet mit einem IR-Strahler/ IR-Empfänger nach dem Diffusionsprinzip, was zur Folge hat, dass es eine Weile dauert, bis die Messwerte konstant bleiben und die tatsächliche Konzentration anzeigen. Deswegen ist bei allen Versuchen mit dem Messgerät darauf zu achten, dass die zu messende Konzentration sich während der Messung nicht verändert. Zu diesem Zweck ist die Glasglocke gedacht, die sich oben mit dem am Messfühler befestigten Stopfen verschließen lässt. Hier füllt man die zu messende Gasprobe ein, steckt den Messfühler hinein und wartet, bis das Messgerät einen konstanten Wert anzeigt. Konzentrationen lassen sich messen in der Luft (0,04%), in der ausgeatmeten Luft (4-5%), bei der Verbrennung einer Kerze in der Glasglocke.

Das Messgerät eignet sich also hervorragend, um Kohlenstoffdioxidquellen auf die Spur zu kommen. Viele Quellen (Zigarettenrauch, Autoabgase) weisen höhere Konzentrationen als 10% auf, die mit dem Messgerät noch bestimmbar wären. Über eine entsprechende „Verdünnung“ der Probe kann man die Konzentration dennoch messen. Dazu misst man mit Hilfe von Wasser das Volumen der kleinen Glasglocke (umdrehen, Stopfen rein, Wasser mit skaliertem Becherglas einfüllen). Füllt man nun ein bestimmtes Volumen (z.B. einen Kolbenprober) mit dem zu messenden Gas und füllt dieses Volumen in die Glasglocke, ergibt der Quotient auf Luftvolumen und Gasvolumen den Faktor, mit dem man die gemessene Konzentration multiplizieren muss. Auch das ist „*science-live!*“.

2.3.4 Modellversuch zum Kohlenstoffkreislauf:

Grüne Pflanzen produzieren in der Hellreaktion der Photosynthese mit Hilfe der Sonne aus Wasser und Kohlenstoffdioxid Kohlenhydrate und Sauerstoff. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Messgeräte kann die Sauerstoff- und die Kohlenstoffdioxidkonzentration gemessen werden. Stellt man nun eine grüne Pflanze unter eine Glasglocke, füllt die Atmosphäre mit Kohlenstoffdioxid und beleuchtet das Ganze mit einer Lampe, kann man die Abnahme der CO₂-Konzentration und die Zunahme der Sauerstoff-Konzentration messen. Allerdings – und das schmälert die Aussagekraft im Rahmen von *science-live!* – sind signifikante Konzentrationsänderungen innerhalb einer Stunde nicht zu beobachten. Über längere Zeiträume sind sie messbar, aber nicht unmittelbar zu beobachten. Man kann den Aufbau trotzdem zeigen und Hypothesen über den Verlauf aufstellen lassen, deren Richtigkeit durch einen Langzeitversuch bestätigt werden sollte.

2.3.5 Alternativer Modellversuch zum Kohlenstoffkreislauf

Während die bisherigen Versuche jeweils Eigenschaften oder Quellen von Kohlendioxid gezeigt haben, verdeutlicht dieser Versuch, wie das Gas von der Natur verwertet wird. Er zeigt die Entstehung von Sauerstoff, dem wichtigsten Produkt der pflanzlichen Photosynthese für alle aeroben Lebewesen in unserer Umwelt. Damit wird das „Ende“ des Kreislaufes von Kohlendioxid, von der Entstehung bis zur Verwertung gezeigt.

Beschreibung:

Wasserpestpflanzen werden in zwei 300ml Bechergläser gegeben. Diese werden mit Sprudel gefüllt. In beide Gläser wird eine Sauerstoffelektrode (z.B. Fabrikat Cornelsen Experimenta mit Corex Datalogger) gehängt und der Sauerstoffgehalt des Sprudels ermittelt. Eines der beiden Gläser wird mit einem schwarzen Eimer abgedeckt, so dass kein Licht zu den Pflanzen durchdringen kann.

Das zweite Glas wird mit einem Halogenstrahler belichtet. In beiden Gläsern wird alle 2,5 Minuten der Sauerstoffgehalt gemessen. Im belichteten Glas nimmt der Sauerstoffgehalt des Sprudels um mehr als das Doppelte des Ausgangswertes zu, im unbelichteten Glas sind schwankende Werte zu messen, wobei der Sauerstoffgehalt eher abnimmt.

Aufbauvorschlag:**Vergleichsmessungen:**

Zeit in [min]	Sauerstoffgehalt in [mg/L]	
	Belichtetes Glas	Unbelichtetes Glas
0	1,01	1,31
2,5	1,63	0,60
5	2,03	0,63
7,5	2,46	0,69
10	2,82	0,80

Anmerkungen: Es existiert nur eine Sauerstoffsonde, so dass man die Blindprobe bzw. die Dunkelreaktion der Photosynthese bei der Wasserpest entweder weglässt oder später nachholt. Auch hier sollte vor dem eigentlichen Versuch eine Hypothese erarbeitet und die Dokumentation der Messwerte vorbereitet werden. Bei einem Messintervall von 2,5 Minuten kann eine Grafik auch schon während der Messphase erstellt werden.

2.4 Technische Hinweise zu den Kohlenstoffdioxidversuchen**2.4.1 Schutzbrillen:**

Bei beiden Kohlenstoffdioxid-Gruppen werden grundsätzlich Schutzbrillen getragen. Sie befinden sich in ausreichender Anzahl in den Schränken. Bitte bei Ausgabe zählen und auf vollständige Wiederkehr achten. Die Aufbewahrung in den Tüten verhindert, dass die Brillen verkratzen.

2.4.2 Umgang mit der CO₂-Gasflasche:

Zum Befüllen der Standzylinder bzw. der Glasrohre wird CO₂ aus der Druckgasflasche (grau)

verwendet. Zum Öffnen zunächst den silbernen Haupthahn öffnen, man sieht dann den Flascheninnendruck im linken Manometer. Dann dreht man das Reduzierventil gegen den Uhrzeigersinn. So kann man den Gasstrom sehr fein regulieren. Nach dem Befüllen des Standzylinders wird zunächst der Haupthahn geschlossen, das Reduzierventil bleibt so lange geöffnet, bis die Apparatur druckfrei ist (beide Manometer zeigen 0 an), dann schließt man auch das Reduzierventil, indem man es mit dem Uhrzeigersinn nach unten dreht.

2.4.3 Umgang mit dem Sauerstoffmessgerät:

Der Messfühler des Sauerstoffmessgerätes ist ein ausgesprochen empfindliches Gerät und sollte daher weder mit der Hand berührt, noch irgendwo angestoßen werden. Der Messfühler befindet sich im Koffer in einer schwarzen Schutzhülle, aus der er vorsichtig herausgezogen und in die er noch vorsichtiger wieder hineingesteckt wird. Die Messsonde muss während der Aufbewahrung feucht gehalten werden. Deswegen bitte bei jedem Gebrauch des Messgeräts die untere Kappe der schwarzen Fühlerschutzhülle abnehmen und auf Feuchtigkeit überprüfen. Bei Bedarf den Schwamm mit ein paar Tropfen Leitungswasser anfeuchten.

2.4.4 Umgang mit Chemikalien:

Besonders bei Versuchen mit verdünnter HCl und Benzin sind die entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen zu treffen. TutorInnen sind dabei absolute Vorbilder. Bei beiden Stoffen ist die Berührung mit der Haut und der Kleidung zu vermeiden. Das gilt auch für Kalkwasser. Brennversuche mit Benzin oder anderen Brennstoffen nur im Abzug durchführen. Auf die Verwendung möglichst kleiner Mengen achten.

2.4.5 Entsorgung:

Fachgerechte Entsorgung wird vorausgesetzt, Benzinreste in den Behälter „organische Lösemittel halogenfrei“ dekantieren. Feststoffreste (zermahlene Muschelschalen o.ä.) nicht in den Ausguss kippen, sondern in den Mülleimer.

2.4.6 Säubern:

Die Versuche zu den Eigenschaften des Kohlenstoffdioxids bringen den größten Reinigungsaufwand mit sich. Es ist trotzdem strikt auf absolute Reinheit der verwendeten Geräte zu achten. Insbesondere ist zu vermeiden, dass sich Kalkreste vom Kohlenstoffdioxidnachweis als Rückstände in den Glasgeräten sammeln. Normales Spülen reicht dazu nicht aus, deswegen die Gläser z.B. in einem der Einmachgläser in etwas verdünnte Salzsäure legen, so werden die Kalkablagerungen problemlos entfernt. Alle Geräte mit destilliertem Wasser

nachspülen.

2.4.7 Chemikalien-Nachschub:

Bitte direkt nach der Veranstaltung überprüfen, ob alle benötigten Chemikalien in ausreichender Menge vorhanden sind. Das macht bei der nächsten Veranstaltung dann ganz gelassen. Fehlt etwas, sofort den Laboranten Herrn Kunze um Nachschub bitten. Diese Aufgabe ist Teil der Nachbereitungsphase!

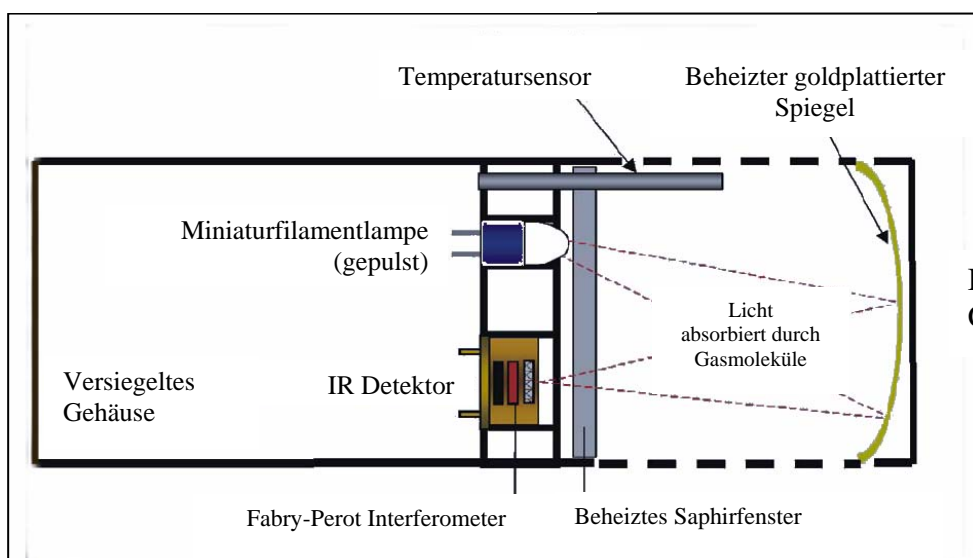
3 Kontinuierliche Messung des Kohlendioxidgehalts der Atmosphäre mit Sensoren

Zur kontinuierlichen Messung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre wurde ein Vaisala CO₂-Sensor GMP 343 angeschafft und auf dem Dach der Pädagogischen Hochschule Im Neuenheimer Feld installiert.



Vaisala sensor GMP 343 auf dem Gebäude INF 561.
Position: 44°25' 13.17N 8°40' 10.71O
Höhe: 110m über NN; Gebäudehöhe: 18m

CO₂-Gehalt in ppm und Temperatur in °C online



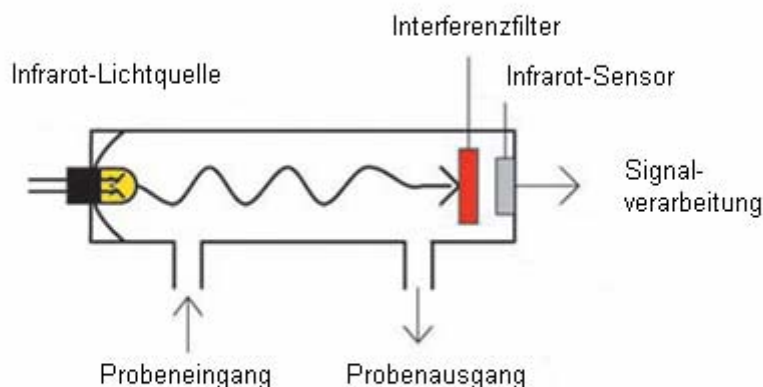
Bauweise Vaisala GMP 343

Das Instrument misst mittels eines Infrarotmessstrahles im Absorptionsmaximum von Kohlendioxid den CO_2 -Gehalt der Luft. Parallel zum CO_2 -Gehalt wird vom Instrument auch kontinuierlich die Lufttemperatur gemessen. Der Sensor ist bezüglich Messgenauigkeit von solcher Qualität, dass die Werte für eine Kooperation mit Wissenschaftlern akzeptabel sind. Das Gerät muss jedoch regelmäßig mit Prüfgasen geeicht werden. Dies wird in der Hochschule Mannheim in der Einrichtung von Prof. Kohl durchgeführt.

Das Gerät ist seit Januar 2008 im Dauereinsatz, es wird durch eine Abdeckung aus Edelstahl gegen Platzregen geschützt.

Die Messwerte werden per Kabel direkt an einen Computer im Gebäude weitergeleitet und dort gespeichert. Mittels Softwareprogramm werden die Werte grafisch auf der Website www.teacher-scientist-partnerships.eu online dargestellt. Einmal pro Tag werden alle registrierten Werte automatisch als E-Mail in Form einer Excel-Datei auf dem Server der Pädagogischen Hochschule Heidelberg abgespeichert. Somit können die numerischen Werte für eine spätere Weiterverarbeitung im Zusammenhang mit Projektarbeiten Verwendung finden und mit den Wetterdaten, die ebenfalls kontinuierlich parallel gemessen werden, verglichen werden.

Für kürzere Projektarbeiten stehen zwei transportable CO_2 – Sensoren (Carbocap Geräte Vaisala GM 70) zur Verfügung. Das Messprinzip ist in der folgenden Abbildung dargestellt:



Diese Geräte sind auch für schulische Zwecke im Rahmen der Projektarbeiten ausleihbar und werden an der Pädagogische Hochschule Heidelberg auch in Projektseminaren mit Studierenden eingesetzt. Die Messwerte können im Geräte gespeichert werden und sind mittels Computer und Programm weiterverarbeitbar.

4 Wetterstation Davis Vantage Pro 2

Die Wetterstation ist ein semiprofessionelles Gerät, das auch bei den Projektpartnern im TSP-Projekt benutzt wird und ebenfalls zur Interpretation von atmosphärischem Gehalt in Abhängigkeit von Wetterdaten zum Einsatz kommt. Die Wetterstation ist ebenfalls auf dem Dach der Pädagogischen Hochschule Heidelberg Im Neuenheimer Feld in der Nähe des

Vaisala Kohlendioxidsensors angebracht. Die Wetterstation kann die üblichen Daten wie Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlagsmenge, barometrischer Druck, relative Luftfeuchtigkeit, Taupunkt und andere messen. Die Daten werden drahtlos auf einen Computer der Pädagogischen Hochschule Heidelberg übertragen, stehen online über die Website www.teacher-scientist-partnerships.de in grafischer Darstellung zur Verfügung bzw. können in abgespeicherter Form als Excel-Datei zugänglich gemacht werden. Da die gesamte Website in englischer Sprache gehalten ist, können aktuelle Daten und gespeicherte Daten jederzeit von den Projektpartnern im europäischen Raum abgerufen werden.

Eine identische Einrichtung von Vaisala Kohlendioxidsensor und Davis Vantage Pro Wetterstation wurde auch auf dem Dach der Geschwister-Scholl-Realschule in Mannheim installiert. Die mit diesen Geräten anfallenden Daten stehen im Schulnetz zur Verfügung. Bedauerlicherweise ist es bislang nicht gelungen, die Daten über das Internet online zur Verfügung zu stellen, weil die Website über einen Server der Stadt Mannheim geschaltet ist. Dieser Server erlaubt einen Zugriff auf Daten von außen über das Web nicht. Eine kurzfristige Lösung des Problems ist bedauerlicherweise nicht gelungen.

5 Literatur und nützliche Links

Die Literaturliste bezieht sich auf die pädagogischen Ausführungen, die Links hingegen geben nur inhaltliche Fundstellen an, die während der Online-Recherche zur Erstellung dieser Handreichung als hilfreich, informativ und ausgewogen empfunden wurden.

5.1 Literatur

- Arnold, R., & Schüßler, I. (1998). Wandel der Lernkulturen. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Moller, J., & Langway Jr., C. C. (1969). One Thousand Centuries of Climatic Record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet. *Science*, 166 (3903), 377-380.
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, 39 (2), 224-238.
- Dietrich, S., Fuchs-Brüninghoff, E., & u.a. (1999). Selbstgesteuertes Lernen auf dem Weg zu einer neuen Lernkultur. Frankfurt / M.: Deutsches Institut für Erwachsenenbildung.
- Dohmen, G. (1999). Einleitung: Das selbstgesteuerte Lernen als unterstütztes Selbstlernen. In Günther Dohmen (Hrsg.), *Weiterbildungsinstitutionen, Medien, Lernumwelten*. (S.16-38). Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- Schallies, M., Wellensiek, A., & Lembens, A. (2002). The Development of Mature Capabilities for Understanding and Valuing in Technology Through School Project Work: Individual and Structural Preconditions. *International Journal of Technology and Design Education*, 1241-58.

- Schönwiese, C.-D. (1995). *Klimaänderungen. Fakten, Analysen, Prognosen*. Berlin: Springer.
- Simons, P. R. J. (1992). Lernen, selbständig zu lernen – ein Rahmenmodell. In Heinz Mandl & Helmut F. Friedrich (Hrsg.), *Lern- und Denkstrategien. Analyse und Intervention*. (S.251-264). Göttingen u.a.: Hogrefe.
- Skorupinski, B. (1999). Gentechnik und ethische Urteilsbildung - ein Beispiel aus der Landwirtschaft. In Michael Schallies & K. D. Wachlin (Hrsg.), *Biotechnologie und Gentechnik. Neue Technologien verstehen und beurteilen*. (S.131-144). Berlin: Springer.
- Wang, M. C. (1982). Entwicklung und Förderung von Kompetenzen zur Selbststeuerung und zum Selbst-Management bei Schülern. *Unterrichtswissenschaft*, 10 (2), 129-139.
- Weinert, F. E. (1982). Selbstgesteuertes Lernen als Voraussetzung, Methode und Ziel des Unterrichts. *Unterrichtswissenschaft*, 1099-110.
- Working group I IPCC. (2007). *Climate change 2007. The physical science basis*. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, Delhi: Cambridge university press.

5.2 Kommentierte Linkliste zum Thema Kohlenstoffdioxid:

- <http://www.hamburgerbildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/klimawandel/blk-co1.html>
10 Jahre alte, aber dennoch brauchbare Informationen zum Treibhauseffekt aus dem BLK Modellprojekt Energienutzung und Klima.
- <http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/lehre/iup-kolloq/lehre/Atmosphaerenphysik/script2/Carbon.pdf>
Detaillierte Darstellung des Kohlenstoffkreislaufes von der Uni Heidelberg (Atmosphärenphysik).
- http://www.dkrz.de/dkrz/intro_s
Homepage des Deutschen Klimarechenzentrums
- <http://www.dimagb.de/info/bauphys/mbklima3.html> Überwiegend kritische Sammlung von Artikeln zum Thema Treibhauseffekt und dessen Nichtexistenz
- <http://www.ipcc.ch/> UNO-Expertengremium zur Erforschung der Klimaveränderungen
- <http://cdiac.esd.ornl.gov/pns/top10.html> Carbon Dioxide Information Analysis Center. Wissenschaftliche Daten zu Kohlendioxid in der Atmosphäre
- <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html> Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I: The Physical Science Basis of Climate Change. Umfassende Datendarstellung und –diskussion.
- <http://www.carboschools.org/> Global Change and Research for secondary schools. Website aller am Projekt “carboschools” beteiligten Schulen. Zugang zu Meßdaten von Vaisalasonden an verschiedenen Standorten, Zugang zu Versuchsvorschlägen.
- <http://www.carboeurope.org/> Integrated Project CarboEurope-IP Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance. Website der Forschungseinrichtungen, die über Kohlendioxid in der Atmosphäre arbeiten.
- <http://www.carboocean.org/> Marine carbon sources and sinks assessment. Website der Forschungseinrichtungen, die über die Kohlenstoffbilanz in den Meeren arbeiten.