

Philipps-Universität Marburg

Fachbereich Chemie

SoSe 2007

Übungen im Experimentalvortrag

# **Kohlenstoffdioxid**

## **- lebenswichtiger Klimakiller -**

ausgearbeitet und vorgelegt von:

Anne Bönisch

L3 Chemie/ Geschichte

7. Fachsemester

Schlosstreppe 7

35037 Marburg

## Gliederung

1. Einleitung	3
2. Vorkommen	4
<i>Versuch 1: Darstellung von Kohlenstoffdioxid</i>	5
3. Eigenschaften	7
<i>Demonstration 1: Die Kerzentreppe</i>	9
<i>Versuch 2: Magnesium im Trockeneisblock</i>	11
<i>Versuch 3: Säure- Base- Verhalten</i>	14
4. Bedeutung	17
4.1 Technische Prozesse	18
<i>Versuch 4: Boudouard- Gleichgewicht</i>	20
4.2 Klimawandel	24
<i>Demonstration 2: Treibhaus- effekt</i>	25
4.3 Luftqualität	31
<i>Versuch 5: Bestimmung des CO<sub>2</sub>- Gehaltes in der Raumluft</i>	32
<i>Demonstration 3: Die physiologische Wirkung von CO<sub>2</sub></i>	36
5. Schulrelevanz	38
6. Quellennachweise	39

## 1. Einleitung

„Klimakiller Kohlendioxid“ (BILD, 4. Februar 2007),

„CO<sub>2</sub>-Ausstoß: Tiefensee will Klima-Pass für Neuwagen“ (Spiegel Online 7. April 2007),

„30 Tipps für Klimaretter, so können Sie CO<sub>2</sub> einparen!“ (DieZeit 2/2007)

Schlagzeilen dieser Art haben in den letzten Monaten und Jahren immer wieder die Zeitungen und die öffentliche Diskussion beherrscht und haben damit Kohlenstoffdioxid als Synonym für die anthropogen veränderten Umweltbedingungen etabliert. Das Gas CO<sub>2</sub> ist demnach in aller Munde, ohne dass jedoch wissenschaftliche Hintergründe oder auch nur Erklärungsversuche damit verbunden sind, die Zusammenhänge verdeutlichen wollen. An diesem Punkt kann Schule ansetzen und allgemeine chemische Prinzipien und Modelle anhand einer aktuellen und demnach von Schülern mit Interesse verfolgten Thematik erläutern.

Doch auch abseits der in den letzten Monaten verstärkt diskutierten Klimaproblematik bietet Kohlenstoffdioxid zahlreiche Ansätze und Bezüge in die Lebenswelt der Schüler, die den Zugang zu chemischen Problemstellungen erleichtern oder gar erst ermöglichen. So gibt es unter anderem mit Kohlenstoffdioxid versetztes Mineralwasser, CO<sub>2</sub>-Waffen, CO<sub>2</sub>-Feuerlöscher und Pflanzendünger auf CO<sub>2</sub>-Basis.

Diesen lebensweltlichen Bezügen folgend, möchte ich in meinem Vortrag von einer Gliederung nach chemischen Gesichtspunkten absehen und vielmehr Schwerpunkte setzen, die für den Einsatz in der Schule besonders geeignet scheinen. Demzufolge werde ich zunächst allgemein auf den Stoff eingehen und die grundlegenden Reaktionen behandeln, welche dann die Grundlage für den zweiten Teil bilden, in dem die Bedeutung des betrachteten Stoffes im Vordergrund stehen soll. Dabei werden die technischen Prozesse, an denen Kohlenstoffdioxid beteiligt ist, anhand einiger Beispiele betrachtet. Dann wird etwas ausführlicher auf die Erderwärmung im Zusammenhang mit Kohlenstoffdioxid eingegangen und die Problematik der Luftqualität, z.B. in Klassenräumen, besprochen. Als Abschluss werden alle behandelten Themen und die durchgeführten Versuche auf ihre Schulrelevanz hin untersucht und ihre Lehrplankompatibilität überprüft.



bedeutendste ist. Dabei wird elektromagnetische Strahlung in Form des Sonnenlichtes von den Organismen mit Hilfe von Farbstoffen aufgenommen und in chemische Energie umgewandelt. Diese wird anschließend dazu verwendet, aus der energiearmen, anorganischen Verbindung  $\text{CO}_2$  eine komplexere, energiereiche, organische Verbindung aufzubauen, welche dann im Organismus zur Energiegewinnung und zum Aufbau von Biomasse genutzt wird. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff frei, der dann von aeroben Lebewesen (u.a. dem Menschen) ebenfalls zur Energiegewinnung durch Atmung genutzt wird. Bei der Zersetzung der energiereichen organischen Verbindungen zum Zwecke der Energiegewinnung entsteht wiederum Kohlenstoffdioxid, was somit zurück in die Atmosphäre gelangt.

Diese Vorgänge finden sowohl an Land als auch im Wasser statt. Im Wasser, z.B. der Weltmeere, existiert allerdings noch eine weitere Möglichkeit Kohlenstoffdioxid zu binden.  $\text{CO}_2$  ist sehr gut in Wasser löslich und demnach, wie oben schon erwähnt, im Meerwasser enthalten. Dort wird es von verschiedenen Meereslebewesen in Kalk umgewandelt und zum Aufbau von Carbonathüllen verwendet. So bilden sich nach dem Tod von z.B. Muscheln am Grund von Meeren Kalkablagerungen, die schließlich zu Gesteinsschichten verfestigt werden.

Die durch Photosynthese und Atmung erzeugte Biomasse wird durch Nahrungsaufnahme zum Aufbau weiterer Organismen benötigt, sinkt jedoch nach dem Tod des Organismus zu Boden. In den meisten Fällen fällt sie dort der Verwesung und somit der Zersetzung in kleinere Moleküle anheim, wobei neben Kohlenstoffdioxid auch Wasser und Harnstoff entsteht. Bei vollständiger Zersetzung eines abgestorbenen Organismus unter Feuchtigkeitsabschluss entstehen andere Produkte und unter Einwirkung von hohen Temperaturen und Druck entstehen im Verlauf von mehreren Millionen Jahren Stoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl, die dann von den Menschen abgebaut und zur Energiegewinnung verbrannt werden. Dabei werden in kurzer Zeit große Mengen Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre freigesetzt. Neben der menschlichen Aktivität führen z.B. auch Vulkanausbrüche oder tiefe Erdspalten zum Ausgasen und zum teilweise explosionsartigen Freiwerden von Großen Mengen  $\text{CO}_2$ .

Zum Einstieg und zur Verdeutlichung der vom Menschen überwiegend durchgeführten Darstellung wurde der erste Versuch gewählt.

## Versuch 1: Darstellung von Kohlenstoffdioxid

### Geräte

- Gasbombe Sauerstoff
- Druckminderer
- Reaktionsrohr aus Quarzglas
- 3 Gaswaschflaschen
- Stativmaterial

### Chemikalien

- gekörnte Aktivkohle
- Sauerstoffgas
- Calciumhydroxidlösung
- konzentrierte Schwefelsäure
- Magnesiumoxidplättchen

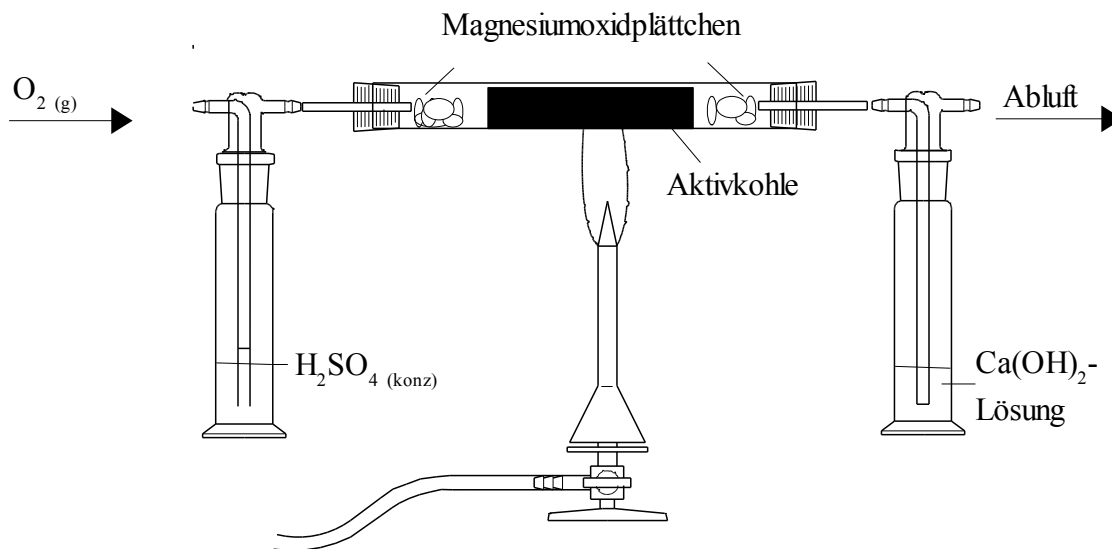


Abb. 2: Aufbau zur Darstellung von Kohlenstoffdioxid

### Durchführung:

Die Apparatur wird wie oben vorgegeben aufgebaut und ein gleichmäßig-schwacher Sauerstoffstrom eingestellt (ca. ein bis zwei Bläschen pro Sekunde). Zur Sicherung vor Rückfluss der Schwefelsäure kann außerdem noch eine leere Gaswaschflasche vorgeschaltet werden. Nachdem die Apparatur mit Sauerstoff gespült ist, wird die Aktivkohle im Reaktionsraum mit Hilfe des Bunsenbrenners bis zur Rotglut erhitzt.

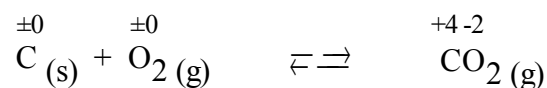
### Beobachtung:

Im Reaktionsraum sind neben der Rotglut der Aktivkohle mit dem bloßen Auge

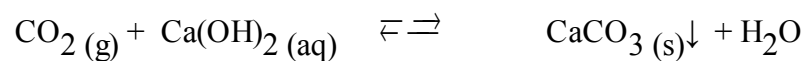
keine Veränderungen festzustellen, nach einigen Minuten fällt aus der Calciumhydroxidlösung ein weißer Niederschlag aus.

Auswertung:

Die Aktivkohle wird im Sauerstoffstrom zu Kohlenstoffdioxid verbrannt.



Das entstandene Gas wird daraufhin mit Hilfe der Calciumhydroxidlösung als Kohlenstoffdioxid identifiziert, welches als weißes Calciumcarbonat ausfällt:



### 3. Eigenschaften

Physikalische Eigenschaften:

Bei Kohlenstoffdioxid handelt es sich um ein farbloses, geruchloses Gas. Es kann mit Hilfe eines Zustandsdiagrammes beschrieben werden:

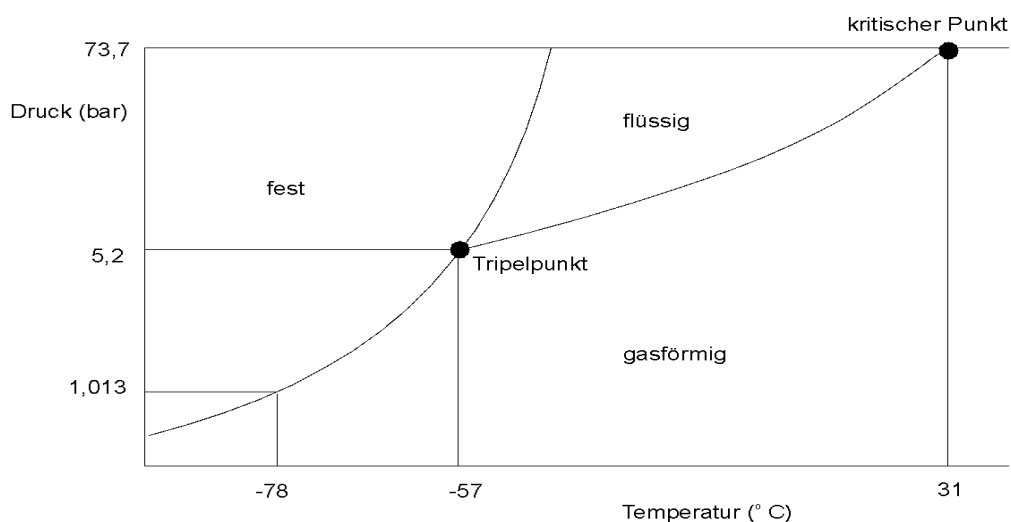
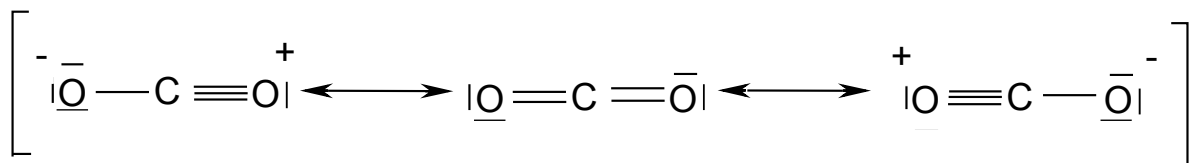


Abb. 3: Zustandsdiagramm von Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid ist unter Normaldruck auch bei niedrigen Temperaturen nicht in den flüssigen Aggregatzustand zu überführen, da der Tripelpunkt der Verbindung bei einem Druck von 5,2 bar und einer Temperatur von  $-57^{\circ}\text{C}$  liegt. Das bedeutet, dass das Gas bei Erniedrigung der Temperatur unter  $-78^{\circ}\text{C}$  sofort in seinen festen Zustand übergeht, der Trockeneis genannt wird, weil beim „Auftauen“ lediglich das Gas entweicht jedoch keine Flüssigkeit entsteht und er somit „trocken“ bleibt. Der Feststoff ist weiß und „dampft“, da das sublimierte  $\text{CO}_2$  immer noch so kalt ist, dass das Wasser in der Luft in kleinen Tröpfchen kondensiert und somit sichtbar wird. Flüssiges Kohlenstoffdioxid wird aber z.B. zum Transport der Verbindung hergestellt und dabei in Druckgasflaschen gefüllt.

Die Verbindung weist keinen Dipol auf, obwohl die einzelnen Bestandteile durchaus geladen sind. Allerdings werden die Partialladungen durch die lineare Struktur der Verbindung gegenseitig aufgehoben. Die Ladungsverteilung lässt sich anhand der Grenzstrukturen aufzeigen, die jedoch für die chemische Reaktivität der Verbindung wenig Bedeutung haben.



Die Tatsache, dass der Stoff Kohlenstoffdioxid unter den Bedingungen, die in der Schule möglich sind, farblos und geruchlos und dazu als Gas nicht allzu leicht handhabbar ist, macht es schwierig, dessen Eigenschaften für Schüler sichtbar zu machen.



## Demonstration 1: Die Kerzentreppe

Geräte

- Becherglas 2L

- 3 Kerzen

- Kerzentreppe

- Gasbombe CO<sub>2</sub>

Aufbau:

↓ CO<sub>2</sub>- Strom

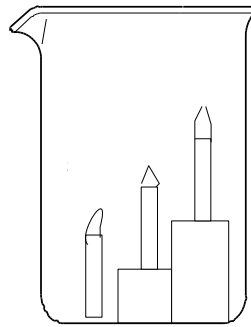


Abb. 4: Aufbau der Kerzentreppe

Zur Abschätzung der Intensität des Gasstromes kann eine mit Wasser gefüllte Gaswaschflasche zwischen Gasbombe und Reaktionsgefäß gebaut werden. Allerdings muss dann vor Versuchsbeginn einige Zeit Kohlenstoffdioxid durch das Wasser geleitet werden, um die Löslichkeit zu überschreiten.

Durchführung:

Die Kerzen werden angezündet und es wird ein gleichmäßiger Kohlenstoffdioxidstrom von oben in das Gefäß hinein geleitet.

Beobachtung:

Die Kerzen beginnen nach einiger Zeit zu flackern und gehen schließlich nacheinander, von unten nach oben, aus.

Erklärung:

Die Dichte von Kohlenstoffdioxid beträgt  $1,97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  und ist somit höher als die

von Luft. Aufgründdessen sinkt das zugeführte Gas zu Boden und verdrängt die leichtere Luft und mit ihr den für die Verbrennung notwendigen Sauerstoff. Je nach Füllstand des Gefäßes gehen die Kerze aus.

Diese Eigenschaft macht man sich bei der Brandbekämpfung zu Nutze und so setzen einige Feuerlöscher große Mengen an  $\text{CO}_2$  frei, welches dann mit Hilfe eines Schaumes auf die Oberfläche des brennenden Gegenstandes aufgebracht wird und diesen vom Sauerstoff der Umgebungsluft abschirmt.

Die hohe Dichte des Kohlenstoffdioxids birgt aber auch einige Gefahren, da sich somit das schwere Gas in Senken und Kellern sammeln und den lebenswichtigen Sauerstoff verdrängen kann. So kommt es immer wieder zu Erstickungsunfällen in Gärkellern, in denen große Mengen  $\text{CO}_2$  freiwird. Berühmtheit hat auch die sogenannte Hundsgrotte bei Neapel erlangt, in der Kohlenstoffdioxid aus der Erde austritt, welches sich am Boden der Grotte sammelt. Menschen können sich ungehindert dort bewegen, da höhere Luftschichten durch Winde ausgetauscht werden, Hunde jedoch werden vollständig vom  $\text{CO}_2$  umgeben und ersticken.

#### Chemische Eigenschaften:

Kohlenstoffdioxid ist eine sehr beständige Verbindung, die sogar als Inertgas eingesetzt wird, da sie erst bei Temperaturen ab  $1200^\circ\text{C}$  in Kohlenmonoxid und Sauerstoff und erst ab einer Temperatur von über  $3000^\circ\text{C}$  in die Elemente zerfällt. Diese hohe Stabilität wird durch die großen Bindungsenergien zwischen Sauerstoff und Kohlenstoff hervorgerufen und sorgt dafür, dass Kohlenstoffdioxid ein träger Reaktionspartner bei Redoxreaktionen ist und nur als sehr schwaches Oxidationsmittel auftritt.

Diese Reaktivität lässt sich allerdings auch im Schulumfeld demonstrieren.

## **Versuch 2: glühendes Trockeneis**

Geräte	Chemikalien
- Dewar	- Magnesiumband
- Tiegelzange	- Magnesiumpulver
- verdunkelte Schutzbrille	- Magnesiumspäne
- Handschuhe gegen Erfrierungen	- Kaliumnitrat
- Bunsenbrenner	- Trockeneis (zwei ca. gleichgroße Blöcke)

### Aufbau:

Vor Beginn des Versuches wird in einem Trockeneisblock eine Mulde ausgehoben, die bei einem Durchmesser von ca. 3 cm etwa 2 cm tief sein sollte. Desweiteren wird eine Mischung aus Magnesiumspänen und Magnesiumpulver hergestellt und bereitgestellt. Eine weitere Mischung aus Magnesiumpulver und Kaliumnitrat sollte aufgrund der Feuchtigkeit der Umgebungsluft erst unmittelbar vor dem Versuch hergestellt werden, um ein Verklumpen zu verhindern.

Achtung: Im Abzug arbeiten, wegen großer Raumentwicklung!

Nicht direkt in die Flamme sehen (Magnesiumbrand)! Erst nach Abdecken des Reaktionsraumes mit dem 2. Trockeneisblock ist Hinschauen für Zuschauer ungefährlich.

Verdunkeln des Raumes vor Beginn des Versuches.

### Durchführung:

Der Trockeneisblock, indem sich die Mulde befindet, wird mit der Aushöhlung nach oben auf die Laborbank gelegt. In die Öffnung wird zuerst das Magnesiumpulver-Magnesiumspäne- Gemisch geschichtet, bis diese nahezu gefüllt ist. Darauf wird die Zündkirsche (Magnesiumpulver vermischt mit Kaliumnitrat) verteilt und mit einem

Magnesiumband als Lunte versehen. Nachdem der Experimentierende seine Augen mit einer verdunkelten Schutzbrille geschützt hat, kann die Lunte mit Hilfe des Bunsenbrenners entzündet werden. Sobald die Funken das Reaktionsgemisch erreicht haben, wird der zweite Trockeneisblock auf den ersten gelegt, sodass der Reaktionsraum von der Umgebung abgeschlossen ist.

Beobachtung:

Das Magnesiumband verbrennt hell leuchtend. Sobald die Flamme das Reaktionsgemisch erreicht hat, beginnt eine heftige Reaktion, die nach Verschluss des Reaktionsraumes anhand des Leuchtens beider Trockeneisblöcke sichtbar bleibt.

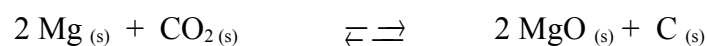
Die Lichterscheinung hält etwa 15 Sekunden an. Nach Abklingen der Reaktion sind in der Mulde im Trockeneis sowohl schwarze als auch weiße Feststoffe zu erkennen.



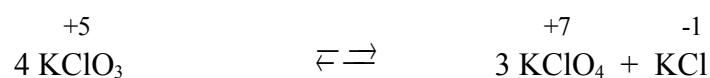
Abb. 5: Reaktion von Magnesium im Trockeneisblock

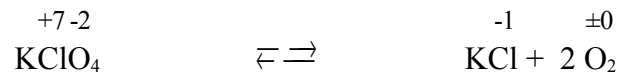
Erklärung:

Das als Feststoff vorliegende Kohlenstoffdioxid reagiert gegenüber dem elementaren Magnesium oxidierend. Dabei entsteht weißes Magnesiumoxid und  $\text{CO}_2$  wird zu schwarzem Kohlenstoff reduziert.

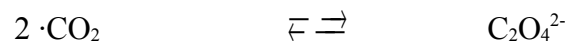
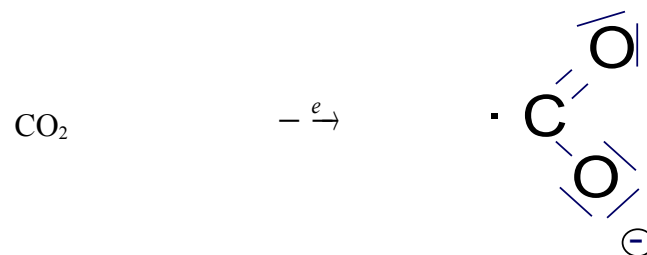


Die Reaktion wird mit Hilfe der Zündkerze gestartet:





Der genaue Reaktionsmechanismus ist allerdings etwas komplizierter und verläuft über eine radikalische Zwischenstufe, aus der dann Oxalationen gebildet werden, welche dann im Anschluss das metalische Magnesium oxidieren.



Weitere mögliche Reaktionspartner des Kohlenstoffdioxids neben Magnesium sind Natrium, Kalium, Kohlenstoff und Wasserstoff, wobei vor allem die Reduktion mit Kohle großtechnische Bedeutung hat<sup>1</sup>.

Neben der Redoxchemie, ist vor allem das Reaktionsverhalten von Kohlenstoffdioxid in Wasser für den Chemieunterricht bedeutsam, nicht zuletzt weil hier in besonderem Maße die Lebenswelt der



Abb. 6: Mineralwasser

Schüler als Anknüpfungspunkt dient. Das allseits bekannte Sprudelwasser ist entweder natürlichen Mineralquellen entnommen in die Kohlenstoffdioxidgas aus einer Erdspalte ausgegast ist oder es wurde dem Wasser im Nachhinein künstlich Gas zugesetzt wurde. Schon die Bezeichnung „mit Kohlensäure versetzt“ legt eine Vermutung über das Säure-Base Verhalten des Gases nahe, das sich aber auch mit einfachen Experimenten untersuchen lässt.

<sup>1</sup> Siehe 4.1 und zugehörigen Versuch

### **Versuch 3: Säure-Base-Verhalten**

#### Geräte

- 2 Demonstrationsreagenzgläser
- Pipetten
- Reagenzglasständer

#### Chemikalien

- Mineralwasser
- Natronlauge  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$
- Phenolphthaleinlösung
- destilliertes Wasser

#### Durchführung:

Zu Beginn werden zwei Demonstrationsreagenzgläser bereitgestellt, von denen das eine mit destilliertem Wasser, das andere mit Mineralwasser, aus einer frisch geöffneten Flasche, bis auf eine Füllhöhe von ca. 5 cm gefüllt wird. Schütteln der Reagenzgläser sollte vermieden werden. Beide Wasserproben werden mit einigen Tropfen Phenolphthalein versetzt und im Anschluss daran wird in beide Proben gleichzeitig ca. 1 mL Natronlauge zugegeben.

#### Beobachtung:

Die beiden Wasserproben sind zu Beginn des Versuches lediglich dadurch zu unterscheiden, dass im Mineralwasser Bläschen aufsteigen. Auch das Zugabe der Phenolphthaleinlösung bewirkt keinerlei sichtbare Veränderung. Bei Zugabe der Natronlauge ergibt sich jedoch bei beiden Lösungen ein Farbumschlag von farblos nach pink, der allerdings lediglich bei der Probe mit destilliertem Wasser Bestand hat, sodass nach etwa 15 Sekunden eine pinke Lösung (dest. Wasser) und eine farblose Lösung vorliegen.

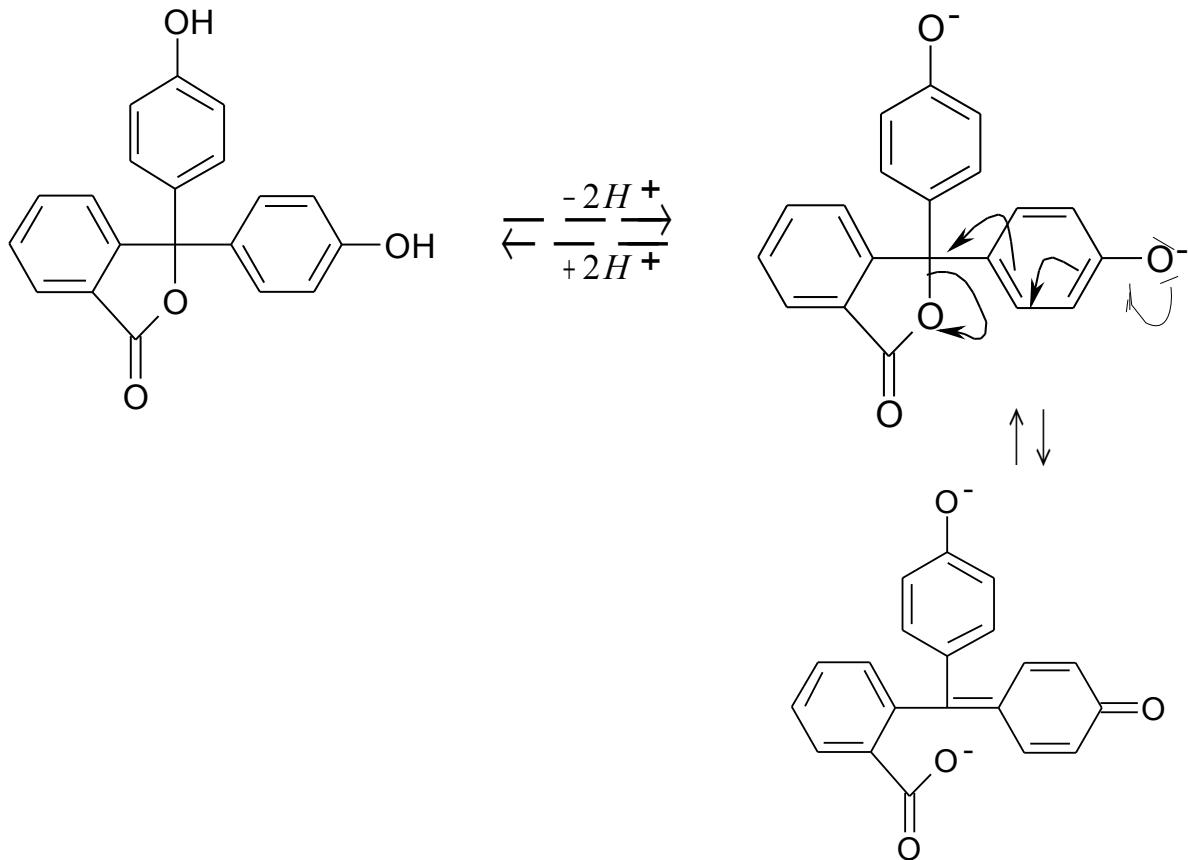
#### Erklärung:

In der verdünnten Natronlauge liegen Natriumionen und Hydroxidionen solvatisiert vor.

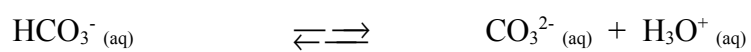
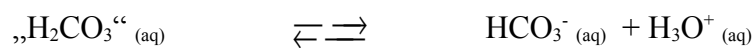
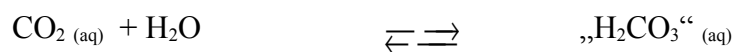


Die Hydroxidionen in der Lösung bewirken eine basische Reaktion, die mit Hilfe von Phenolphthalein, welches als Indikator im Basischen von farblos nach pink umschlägt, angezeigt werden kann.

Die Farbigkeit entsteht dabei durch ein konjugiertes  $\pi$ -System. Je nach Größe dieses Systems werden bestimmte Wellenlängen der uns umgebenden Strahlung absorbiert, um Elektronen anzuregen. Je größer das System aus konjugierten Doppelbindungen ist, desto weniger energiereiche Strahlung wird benötigt, um eine Anregung zu erreichen. Im Falle des Phenolphthaleins erfolgt im basischen Milieu die Deprotonierung einer Phenylgruppe, durch die darauf folgende Elektronendichteverchiebung entsteht ein großes  $\pi$ -System, in dem Elektronen schon durch sichtbares Licht angehoben werden können. Das Licht der entsprechenden Wellenlänge wird absorbiert und die restlichen Wellenlängen werden reflektiert und sind somit für uns als pinke Farbe sichtbar.



Im destillierten Wasser sind neben den Produkten der Eigendissoziation von Wasser (Hydroxidionen und Protonen, beide in gleicher Menge) keine Ionen enthalten, weshalb die Zugabe von Hydroxidionen zu einer basischen Reaktion führt, ebenso wie das Phenolphthalein das auch angezeigt hat. Dem Mineralwasser ist jedoch Kohlenstoffdioxid zugegeben, welches in wässriger Lösung zu Ionen dissoziieren kann.





Offensichtlich liegen diese Hydrogencarbonat und Carbonationen jedoch gar nicht oder nur in sehr kleinen Mengen in der Lösung vor, denn bei ihrer Entstehung werden auch Hydroniumionen frei, die eine saure Reaktion hervorrufen und somit die zugegebenen Hydroxidionen neutralisieren würden, was den Farbumschlag verhindert hätte. Dass aber eben diese Neutralisation nach einigen Sekunden dennoch zu beobachten ist, legt die Vermutung nahe, dass das im Wasser gelöste  $\text{CO}_2$  nur zu kleinen Teilen dissoziiert vorliegt. Werden aus diesem Gleichgewicht jedoch die Hydroniumionen durch zugegebene Hydroxidionen entfernt, erfolgt die Nachdissoziation, was Schritt für Schritt zur Neutralisation der zugegebenen Natronlauge führt.

Kohlenstoffdioxid ist gut in Wasser löslich. Allerdings sind lediglich wenige Moleküle dissoziiert, sodass es sich bei Kohlensäure lediglich um eine schwache Säure handelt, die auch nicht aus wässriger Lösung isoliert werden kann.

## 4. Bedeutung

Die Anwendungsfelder von Kohlenstoffdioxid sind zahlreich und lassen sich der Übersichtlichkeit halber anhand der Funktion des Gases gliedern. Dabei kann hier kein Anspruch auf Vollständigkeit bestehen, sondern lediglich versucht werden, die wichtigsten Bereiche anzureißen.

Der Einsatz als Nahrungsmittel wird vor allem in der Getränkeindustrie praktiziert. So wird Kohlenstoffdioxid verschiedenen alkoholfreien Getränken, wie z.B. Mineralwasser oder Softdrinks, zugesetzt, da durch die Bläschenbildung und den leicht säuerlichen Geschmack, der Eindruck der Erfrischung beim Konsumenten hervorgerufen wird. In ähnlicher Funktion findet es beim „Auffrischen müder Weine“ Einsatz.



Abb. 7: verschiedene Weine

Außerdem wird  $\text{CO}_2$  in festem Aggregatzustand als Kühlmedium eingesetzt. Dabei nutzt man die Tatsache, dass dieser Zustand relativ einfach, nämlich schon bei relativ hohen Temperaturen und Normaldruck, erreicht werden kann, was Transport und Handhabung erleichtert. Somit findet festes Kohlenstoffdioxid im chemischen Labor bei der Kühlung von Reaktionsprozessen Anwendung, wird aber auch in großen Mengen z.B. beim Transport von Lebensmitteln eingesetzt, um die Frischerhaltung des jeweiligen Transportgutes möglichst lange zu gewährleisten. Auch die Eigenschaft, „rückstandslos“ zu verschwinden, also keine flüssigen Rückstände zu hinterlassen, wie es ja z.B. bei Wassereis der Fall wäre, sondern als Gas nahezu unbemerkt zu entschwenden, ist hier von Vorteil.

Die hohe Stabilität des Gases bedingt seine Nutzung als Inertgas. So kann das relativ billig zu gewinnende Kohlenstoffdioxid anstelle von Stickstoff oder Edelgasen z.B. bei Schweißprozessen Einsatz finden, um den Reaktionsraum vor reaktiveren Substanzen, wie u.a. dem Luftsauerstoff, abzusichern.

Auch als Druckmedium tritt es häufig auf und wird ebenso als  $\text{CO}_2$ -Gaspatrone für die verschiedensten Zwecke verkauft. In Kohlenstoffdioxidwaffen sorgt das stark komprimierte Gas bei seiner schlagartigen Ausdehnung für den Abschuss der Patrone und als Treibmittel in Aerosolen

bewirkt es die Zerstäubung z.B. in Sprayflaschen oder es ist bei der Schaumbildung beteiligt.



Abb. 8: CO<sub>2</sub>-Dünger  
für „spezielle“  
Pflanzen

Als Reaktionspartner tritt CO<sub>2</sub> bei zahlreichen chemischen Prozessen auf. Besonders bedeutsam ist dabei die Verwendung als Pflanzendünger, vor allem in Räumen mit geringem Luftaustausch (z.B. Gewächshäuser), oder aber bei der Wiederaufbereitung verunreinigter Abwässer, wo Kohlenstoffdioxid zur Neutralisation von basischen Flüssigkeiten eingesetzt wird, was lediglich zur Entstehung von Carbonaten führt, die im Anschluss problemlos ausgefällt werden können.

Zahlreiche dieser genannten Anwendungsfelder bieten in der Schule die Möglichkeit, den lebensweltlichen Bezug der chemischen Thematik für die Schüler zu verdeutlichen und die Besprechung der Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid zu veranschaulichen. Im Folgenden wird aber weniger auf diese Einsatzmöglichkeiten eingegangen, sondern vielmehr soll versucht werden, die einzelnen Anwendungen und Eigenschaften in einen größeren Kontext einzuordnen.

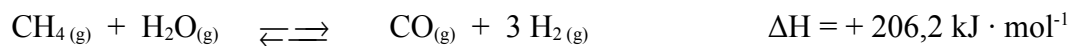
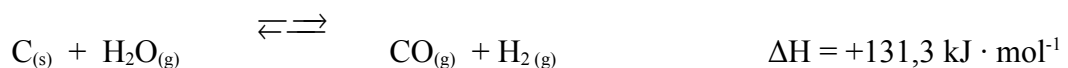
## 4.1 Technische Prozesse

Kohlenstoffdioxid entsteht als energiearme, stabile Verbindung bei nahezu allen chemischen Prozessen, bei denen Kohlenstoff oder Kohlenstoffverbindungen beteiligt sind. Jahrzehntlang war dieses Nebenprodukt gern gesehen, da es doch ungefährlich ohne großen Entsorgungsaufwand in die Atmosphäre entlassen werden konnte. Erst im Laufe der letzten Jahre und der immer stärkeren Sensibilisierung der Wissenschaft und der Öffentlichkeit für die Veränderungen des Klimas, die durch große CO<sub>2</sub>-Emissionen hervorgerufen werden können, gelangte das an vielen Stellen in großen Mengen frei werdende Gas in den Blickpunkt<sup>2</sup>. Um bei den Schülern ein Verständniss für das Ausmaß der Problematik zu erlangen, erscheint es unerlässlich, auch technische Prozesse näher zu betrachten, bei denen Kohlenstoffdioxid eine Rolle spielt. Dabei kann anhand von lehrplanrelevanten Themen wie der Wasserstoffgewinnung, im Zuge der Nutzung neuer Energieträger, und dem Boudouard-Gleichgewicht, welches im Zusammenhang mit dem

<sup>2</sup> siehe auch Kapitel 3.2.

Hochofenprozess behandelt wird, eine Sensibilisierung der Schüler für technologisch-chemische Fragestellungen erreicht werden.

Das Element Wasserstoff wird oft als Energieträger der Zukunft bezeichnet und wohlklingende Meldungen, wonach diese saubere Methode der Energiegewinnung lediglich Wasser als Produkt aufweist, erreichen immer mal wieder die Nachrichten. Dabei wird aber meistens außer acht gelassen, dass auch Wasserstoff in unserer Umgebung nur in sehr geringen Mengen als Element vorliegt. Vielmehr ist es chemisch in zahlreichen Verbindungen gebunden, aus denen es zuerst einmal gewonnen werden muss. Eine heute gebräuchliche Methode ist dabei die so genannte Dampfreformierung bei der Kohle oder Methan (z.B durch Vergasung von Biomasse dargestellt) mit Wasserdampf umgesetzt werden, wobei ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff entsteht

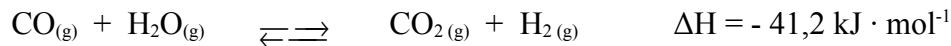


Beide Reaktionen sind stark endotherm, sodass große Mengen Energie z.B. in Form der Reaktionstemperatur zugegeben werden müssen. Auch das entstandene Gasgemisch kann so für die Umsetzung in einer Brennstoffzelle oder auch in einem Verbrennungsmotor nicht eingesetzt werden, da es noch mit dem giftigen und sehr reaktiven Kohlenmonoxid versetzt ist.

Um dessen Anteil zu verringern wird das entstandene Gas wiederum mit Wasserdampf versetzt, wobei das Kohlenmonoxid zu Kohlenstoffdioxid oxidiert wird und der Wasserstoff, welcher im Wasser gebunden ist zum elementaren Wasserstoff reduziert wird.



Abb. 9: Mercedes Benz F-Cell, Bsp. für ein Wasserstofffahrzeug



Diese leicht exotherme Reaktion verläuft weder bei hohen noch bei niedrigen Reaktionstemperaturen ideal. Bei niedrigen Temperaturen liegt das Gleichgewicht auf der Seite der Produkte, allerdings kann die Aktivierungsenergie nicht erreicht werden. Bei hohen Temperaturen ist die Kinetik günstig, allerdings liegt das Gleichgewicht auf der Seite der Edukte. Durch Kombination von Hoch- und Niedrigtemperaturreaktoren lässt sich der Kohlenmonoxidgehalt in diesem so genannten Wassergasgleichgewicht jedoch auf unter ein Volumenprozent absenken.

Es entsteht bei der Darstellung von Wasserstoff auf diesem Wege also zwangsläufig auch Kohlenstoffdioxid, welches man ja durch den Einsatz nicht-fossiler Energieträger gerade zu vermeiden suchte.

Ein weiterer Prozess, der in großem Umfang weltweit durchgeführt wird, ist die Gewinnung von Roheisen aus Erzen, der so genannte Hochofenprozess. Die Bedeutung von Kohlenstoffdioxid in diesem Zusammenhang lässt sich mit Hilfe des Boudouard-Gleichgewichtes beschreiben, das auch bei anderen Reaktionen eine Rolle spielt, sobald Sauerstoffverbindungen mit überschüssiger Kohle reduziert werden. Das Boudouard-Gleichgewicht wird, dem Lehrplan folgend, in der Schulchemie besprochen, dabei aber äußerst selten mit Experimenten veranschaulicht, da die Reaktionsbedingungen in der Schule nur unter Schwierigkeiten zu realisieren sind.

#### **Versuch 4: Das Boudouard-Gleichgewicht**

##### Geräte

- Gasbombe Sauerstoff
- Druckminderer
- Reaktionsrohr aus Quarzglas
- 2 Gaswaschflaschen
- Stativmaterial
- Dreiwegehahn

##### Chemikalien

- gekörnte Aktivkohle
- Sauerstoffgas
- konzentrierte Schwefelsäure
- Magnesiumoxidplättchen

#### Aufbau:

Der Aufbau von Versuch 1 wird übernommen und leicht verändert. Dazu wird das aus dem Quarzrohr austretende Gas nicht wie zuvor durch eine Lösung geleitet, sondern nach oben durch eine ausgezogene Spitze in den Abzug entlassen. Die Umstellung von Versuch 1 auf Versuch 4 kann mithilfe eines Drei-Wegehahns erfolgen, der den Gasstrom erst in die Gaswaschflasche und dann in die Spitze leitet.

Achtung: Aufgrund von entstehendem Kohlenmonoxid im Abzug arbeiten!

Verdunkeln des Raumes vor Beginn des Versuches.

#### Durchführung:

Der Sauerstoffstrom wird zu Beginn so eingestellt, dass sich eine Intensität von ca. 2 Bläschen pro Sekunde ergibt. Wenn ein gleichmäßiger Gasstrom erreicht ist, wird der Reaktionsraum, der mit der Aktivkohle gefüllt ist, mit Hilfe des Bunsenbrenners erhitzt, bis die Kohle rot glüht. Im Anschluss daran wird versucht, das entstandene Gas am Ende der Glasspitze anzuzünden.

Im zweiten Teil des Versuches wird nun die Intensität des Sauerstoffstromes verstärkt, sodass die Kohle weißglühend verbrennt. Ein Erhitzen der Kohle ist zumeist nicht nötig, da die Temperatur aus dem ersten Versuchsteil ausreicht, um die Reaktion zu starten. Sollte man die beiden Teile getrennt durchführen bzw. nach dem ersten Teil längere Zeit warten, ist ein erneutes Erhitzen mit Hilfe des Bunsenbrenners vonnöten.

Nachdem die Kohle einige Sekunden weiß geblüht hat, soll auch hier versucht werden, das entstandene Gas an der Austrittsstelle anzuzünden.

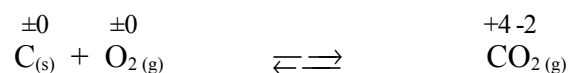
#### Beobachtung:

Die Kohle verbrennt im ersten Teil rot glühend. Das entstandene Gas kann nicht entzündet werden. Beim zweiten Teil jedoch, bei dem die Kohle weiß leuchtend

glüht, verbrennt das Gas mit blauer Flamme.

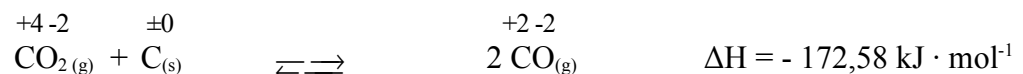
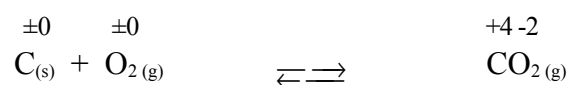
Erklärung:

In diesem Versuch wurde zwei Mal die gleiche Reaktion unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt. Durch die Intensität des Sauerstoffstromes konnte dabei die Temperatur im Reaktionsraum reguliert werden. Im ersten Teil wurde bei Zugabe von wenig Sauerstoff eine Reaktionstemperatur von ca. 400 °C erreicht. Dabei setzt sich die Kohle, wie auch schon in Versuch 1 beschrieben, nahezu vollständig zu Kohlenstoffdioxid um.



Das entstehende Gas erstickt die Flamme, lässt sich demnach also nicht entzünden.

Im zweiten Teil konnte durch Zugabe von viel Sauerstoff eine Reaktionstemperatur von ca. 1000 °C erreicht werden. Auch dabei wird die Kohle mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid umgesetzt, allerdings setzt aufgrund der hohen Temperaturen eine Folgereaktion ein. Das entstehende CO<sub>2</sub> wird an der überschüssigen Kohle reduziert, wobei Kohlenmonoxid entsteht, was mit blauer Flamme verbrennt.



Dieses letzte Gleichgewicht wird Boudouard-Gleichgewicht genannt nach dem französischen Chemiker Octav Leopold Boudouard, der es zu Beginn des 20. Jahrhunderts erforschte. Schon anhand der Reaktionsgleichung ist erkennbar, dass

sich das Gleichgewicht bei erhöhtem Druck in Richtung der Edukte verschiebt. Bei Normaldruck, wie ja im Versuch gegeben, kann das Gleichgewicht dann mit einem Graphen beschrieben werden.

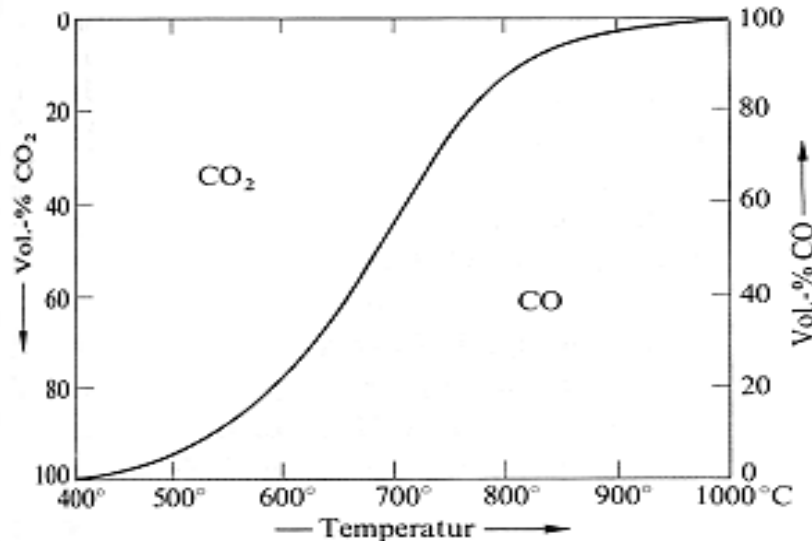


Abb. 10: Verhältnis von Kohlenstoffdioxid und Kohlenstoffmonooxid bei verschiedenen Temperaturen unter Normaldruck

Anhand dieses Graphen ist deutlich zu erkennen, dass bei einer Temperatur von ca. 400 °C fast vollständig Kohlenstoffdioxid entsteht, während sich das Gleichgewicht bei höheren Temperaturen immer weiter in Richtung des Kohlenmonoxids verschiebt.

Mit Hilfe dieses Gleichgewichtes ist es möglich, Reaktionsprodukte vorherzusagen und vor allem durch Einstellung bestimmter Reaktionsbedingungen die Entstehung von großen Mengen des reaktiven und giftigen Kohlenmonoxid zu verhindern.

Beim Hochofenprozess spielt das Gleichgewicht eine große Rolle, da in einem Hochofen, der abwechselnd mit Eisenerzen und Koks beschickt ist, verschiedene Temperaturzonen existieren und somit je nach Zone

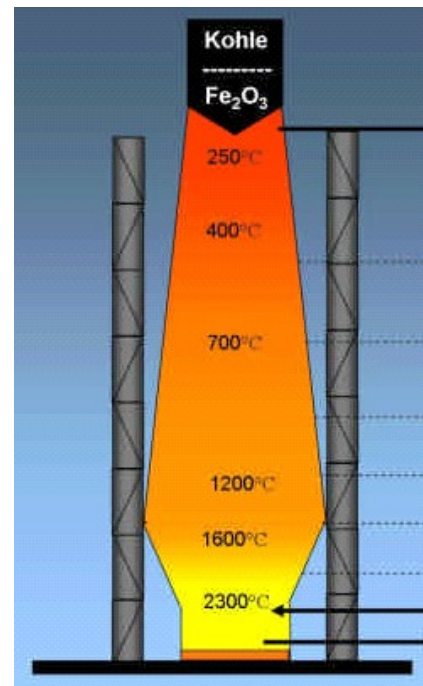


Abb. 11: schematische Darstellung eines Hochofens



unterschiedliche Stoffe vorliegen, die in die Reaktionsprozesse eingreifen können. So wird zuerst bei niedrigen Temperaturen zugegebener Sauerstoff an Kohle zu Kohlenstoffdioxid verbrannt. Dieses gelangt in heißere Zonen und wird dort zu Kohlenmonoxid reduziert. Das Kohlenmonoxid wirkt wie die Kohle als Reduktionsmittel und reduziert die verschiedenen Eisenoxide in verschiedenen Schritten, sodass Roheisen und Kohlenstoffdioxid entstehen.

Bei der Eisengewinnung werden dementsprechend große Mengen Kohlenstoffdioxid frei. Die Bedeutung dieser CO<sub>2</sub>- Quelle lässt sich daran abschätzen, dass die jährliche weltweite Stahlproduktion 1,2 Milliarden Tonnen beträgt.

## 4.2. Klimawandel

Das Weltklima verändert sich. Polkappen und Gletscher schmelzen, es kommt regelmäßig zu Rekordsommern und Überschwemmungen und andere Umweltkatastrophen suchen die Menschen immer häufiger heim. Die Veränderungen sind kaum zu bestreiten, das zu erwartende Ausmaß und vor allem der Einfluss des Menschen darauf steht allerdings immer wieder zur Diskussion. Kohlenstoffdioxid ist im Rahmen der zahlreichen medienwirksamen Thematisierung und Problematisierung von Klimawandel und Global Warming zum Schlagwort geworden, das die anthropogenen Einflüsse auf die Natur beschreibt. Umrahmt von den unverrückbaren Fakten, dass sich Klimaveränderungen ergeben und dass sich im gleichen Zeitraum der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre um ein Drittel erhöht hat, haben sich vor allem im Internet aber auch in anderen Medien immer wieder zahlreiche Kritiker zu Wort gemeldet, die den Zusammenhang dieser beiden Tatsachen bestreiten und die Ursachen der Klimaveränderung vielmehr in ganz normalen Temperaturschwankungen suchen, denen die Erde seit ihrer Entstehung unterworfen ist<sup>3</sup>.

---

3 Einige Beispiele für Kritiker des Klimawandels im Internet: <http://www.schulphysik.de/klima/alvens/klima.html>;  
<http://blog.jan-filter.de/2007/06/12/kohlendiooxid-und-klima-wahrheit-oder-schwindel/> ausführliche  
Gegendarstellung des Umweltbundesamtes:  
<http://www.umweltbundesamt.de/klimaschutz/klimaaenderungen/faq/skeptiker.htm>; eine Gegenüberstellung beider  
Seiten: <http://global-warning.eu/category/kohlendioxid/>  
alle besucht am 12. August um 20:00 Uhr



Abb. 12: Eisbären in ihrem natürlichen Lebensraum

Spätestens aber seit dem Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change, der im Frühjahr 2007 erschien, ist der Zusammenhang zwischen menschenverursachten Emissionen, steigendem Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft und Klimaerwärmung wissenschaftlicher Konsens und es übersteigt den Rahmen dieser Ausarbeitung, alle Argumente beider Seiten darzustellen oder gar auf ihre Richtigkeit zu überprüfen. Demnach wird hier dem Konsens der Wissenschaftler Folge geleistet und vor allem der Versuch unternommen, die Hintergründe zu erläutern.

### **Demonstration 2: der Treibhauseffekt**

- Kohlenstoffdioxidbombe
- Einleitungsrohr
- große Glaswanne
- kleine Glaswanne
- Stativmaterial
- UV- Lampe
- schwarze Pappe
- Thermometer

Aufbau:

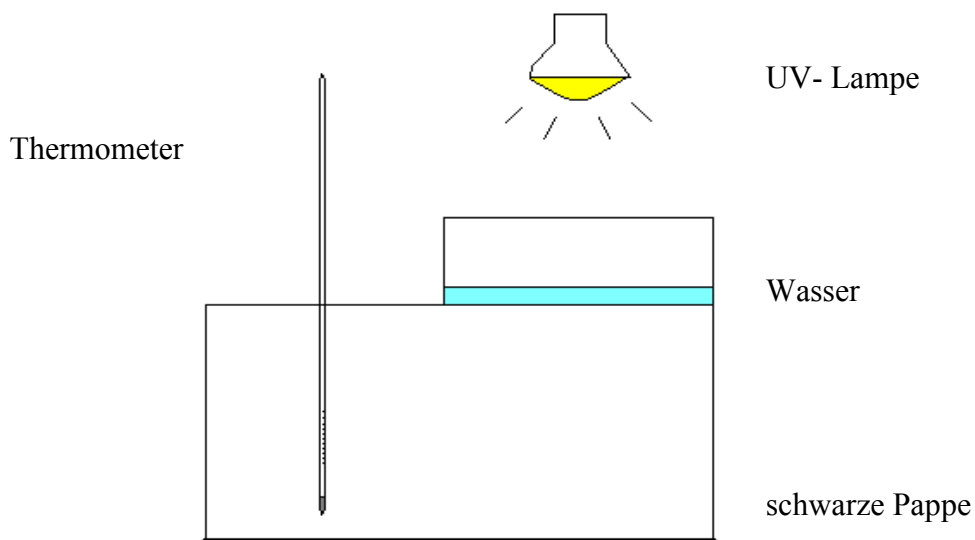
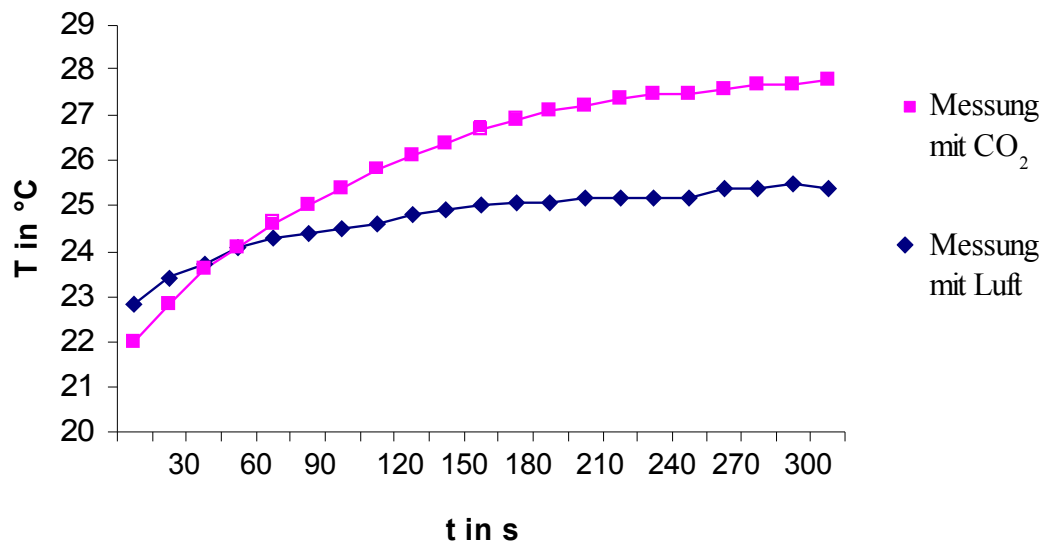


Abb.: 13 Aufbau zum Modellversuch Treibhauseffekt

Durchführung:

Vor Beginn des Versuches wird die bestehende Temperatur des in der großen Wanne befindlichen Gases (zu Beginn Luft) gemessen. Dann wird die UV-Lampe eingeschaltet und alle 15 Sekunden erneut die Temperatur abgelesen und in ein Diagramm eingetragen. Die Messung kann beliebig lange fortgesetzt werden, es genügt allerdings ca. drei bis fünf Minuten die Werte zu dokumentieren. Nach Ende der Messung wird die Lampe ausgeschaltet und so lange gewartet bis sich die Temperatur im Gefäß der Umgebungstemperatur angeglichen hat. Im Anschluss daran kann die Zweite Untersuchung erfolgen. Dazu wird wie im ersten Teil des Versuches verfahren, allerdings wird in diesem Fall die große Glaswanne mit Kohlenstoffdioxid bis kurz unter den Rand gefüllt (Kerzenprobe) und erneut Messwerte abgelesen.

Zur Temperaturmessung wurde ein Thermofühler verwendet, der die Temperatur auf eine Nachkommastelle genau angeben konnte. Das Ablesen eines herkömmlichen Thermometers ist in diesem Falle zu ungenau, weil es sich bei den Temperaturänderungen nur um wenige Grad handelt.



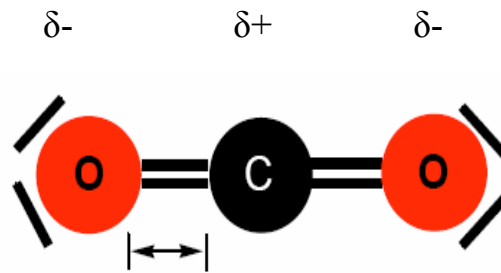
Es ist dabei auch ohne weiteres möglich eine komplexere Versuchsreihe aufzubauen in dem andere Gase ebenfalls untersucht werden oder aber der Boden der Glaswanne von der schwarzen Pappe befreit oder z.B. mit Aluminiumfolie ausgelegt wird. Im Rahmen des Experimentalvortrages würden diese Versuche allerdings zu weit führen. Aus diesem Grund habe ich mich auf die beiden zuerst beschriebenen Messungen beschränkt und im Vortrag lediglich die Messung mit Kohlendioxid durchgeführt und gegen kurz zuvor mit Luft aufgenommene Werte aufgetragen.

#### Beobachtung:

Die kurz nacheinander aufgenommenen Temperaturkurven lassen erkennen, dass Geschwindigkeit und Intensität der Erwärmung des Versuchsraumes vom veränderten Parameter der beiden Untersuchungen abhängig ist, also von der Art des eingefüllten Gases. Zwar ist bei beiden Durchführungen ein Temperaturanstieg durch Bestrahlung mit UV- Licht festzustellen, der jedoch nach fünf Minuten bei Befüllung mit Luft lediglich  $2,5^{\circ}\text{C}$  bei Befüllung mit Kohlenstoffdioxid jedoch  $5,8^{\circ}\text{C}$  beträgt. Die unterschiedlichen Auswirkungen der Strahlungseinwirkung lassen sich mit den verschiedenen Absorptionsvermögen der einzelnen Gase erklären.

Luft besteht zu 78,1 Volumenprozent aus Stickstoff und zu 20,9 Volumenprozent aus Sauerstoff. Diese beiden Hauptbestandteile sind zweiatomige Gase, die nicht IR-aktiv, also nicht durch infrarote Strahlung anregbar sind. Die IR- Aktivität hängt von den Bindungsverhältnissen und der Ladungsverteilung im Molekül ab. Ist die Ladung ungleichmäßig verteilt, sodass ein Dipol ausgebildet wird, reicht die Energie der infraroten Strahlung aus um die Anregung des Moleküls zu erreichen. Sowohl Sauerstoff als auch Stickstoff bestehen jedoch aus zwei gleichen Atomen, sodass kein Dipolmoment vorliegt.

Beim Kohlenstoffdioxid liegt ein anderer Fall vor. Das drei-atomige Molekül ist aus Atomen aufgebaut, die unterschiedliche Elektronegativitäten aufweisen. Der lineare Aufbau des Moleküls verhindert dennoch die Ausbildung eines Dipols, da sich die negativen Partiaalladungen der Sauerstoffatome gegenüber der positiven Partiaalladung des zentralen Kohlenstoffatoms aufheben und das Dipolmoment null beträgt.



Allerdings kann durch Schwingungen der einzelnen Atome ein temporärer Dipol induziert werden, sodass eine IR- Aktivität des Kohlenstoffdioxidmoleküls gegeben ist. Bei den verschiedenen Schwingungen handelt es sich um Streck- und Beugeschwingungen, die jedoch nicht alle zur Induktion eines Dipols führen. So bewirkt die symmetrische Streckschwingung zwar eine Veränderung der Bindungslängen zwischen den Atomen, die Ladungsverteilung verändert sich jedoch keineswegs. Anders ist das bei der asymmetrischen Streckschwingung und auch der Beugeschwingung, bei der sich die Bindungswinkel verändern. Beide Schwingungen sind demnach IR- aktiv.

Anhand des Modellversuches kann man nun erkennen, welchen Einfluss das Gas in der Atmosphäre auf die klimatischen Bedingungen auf der Erdoberfläche haben kann. Die Sonnenstrahlen (hier von der Lampe ausgesendet) treffen auf die Erde, wo durch Wasser in der Atmosphäre (z.B. Wolken, im Modellversuch durch die Schale mit Wasser dargestellt) und IR-aktive Gase der größte Teil der infraroten Strahlung ins Weltall reflektiert wird. Energiereichere Strahlung gelangt in Form von Licht auf die Erdoberfläche (hier durch die schwarze Pappe symbolisiert). Dort wird ein Teil der Energie absorbiert, was zur Aufwärmung des Erdbodens führt, die restliche Energie wird u. a. in Form von Wärmestrahlung (IR- Strahlung) zurückgeworfen und könnte nun ins Weltall entweichen.

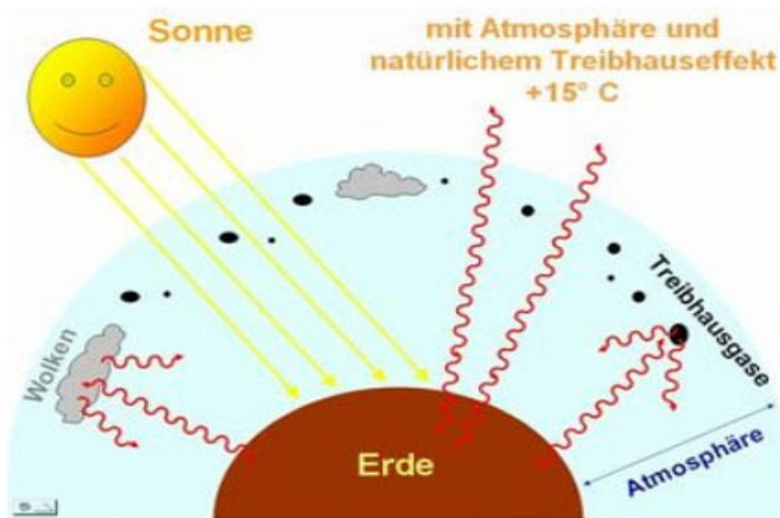


Abb. 14: Einfluss der Sonnenstrahlung auf die Erdatmosphäre

Befinden sich allerdings IR-aktive Substanzen in der Atmosphäre, absorbieren diese die Strahlung und reflektieren sie zum Teil, sodass die Energie der Strahlung in der Atmosphäre verbleibt und somit zu einer Erwärmung führt. Je mehr IR-aktive Substanzen sich in der Atmosphäre befinden, desto weniger Energie kann entweichen und trägt stattdessen zu einer Erwärmung bei. Dieser Effekt ist auch in einem Treibhaus zu beobachten, in dem die Glasscheiben die gleich bleibend hohen Temperaturen bewirken, und wird danach benannt.

Der Treibhauseffekt ist, auch wenn so manche Schlagzeile anderes vermuten lässt, ein natürlicher Effekt, der erst das Leben auf der Erde möglich gemacht hat. Der so genannte „natürliche Treibhauseffekt“ hervorgerufen durch Wasser und Gase in der Atmosphäre hat dazu geführt dass sich die Durchschnittstemperatur auf der Erde um ca.  $33^{\circ}\text{C}$  auf die heutigen  $+15^{\circ}\text{C}$  erhöht hat. Ohne diese Veränderung wäre bei einer Durchschnittstemperatur der Erde um  $-18^{\circ}\text{C}$  die Entwicklung der Vielfalt der Lebewesen auf der Erde nur eingeschränkt möglich gewesen.

Durch die Erhöhung der Kohlenstoffdioxidkonzentrationen in der Atmosphäre wird eine weitere Erwärmung stattfinden, wie stark diese jedoch ausfällt ist umstritten. Klimaforscher geben für die nächsten hundert Jahre Prognosen von  $+1,5^{\circ}\text{C}$  bis  $+6,5^{\circ}\text{C}$  an. Allein die große Differenz dieser

Werte zeigt die offensichtliche Schwierigkeit die Auswirkungen verschiedener Komponenten auf ein solch komplexes Konstrukt wie das Weltklima vorherzusehen.

Dass allerdings schon kleinste Temperaturveränderungen die Lebensbedingungen von Tieren und Pflanzen drastisch modifizieren und auch die menschliche Entwicklung von klimatischen Einflüssen bestimmt ist, zeigt sich darin, dass die Durchschnittstemperatur in der letzten Eiszeit, bei der riesige Eismassen bis weit in den europäischen Kontinent hineinragten, lediglich 6°C unterhalb der heutigen lag und sich damit schon sehr einschneidende Veränderungen ergaben.

Gegenmaßnahmen:

Der Versuch der Erwärmung der Erde und dem verstärkten Ausstoß von Kohlendioxid in unsere Umwelt entgegen zu wirken, haben sich zahlreiche Umweltorganisationen und andere Klimaschützer auf die Fahnen geschrieben. Dabei wird zumeist auf die Möglichkeiten jedes einzelnen verwiesen, Energie zu sparen und somit den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu verringern. Auch eine verstärkte Konzentration auf alternative Formen der Energiegewinnung, die nicht auf fossilen Brennstoffen basieren, wird hier häufig angeführt. Neben der Vermeidung und Verringerung des Ausstoßes von Kohlenstoffdioxid besteht auch die Möglichkeit, bereits frei gewordenen CO<sub>2</sub> zu binden und auf diese Weise die Konzentration des Klimagases in der Atmosphäre so klein wie möglich zu halten. So sollen neben natürlichen Speichern, wie dem Meerwasser der Weltmeere, auch Lagerstätten unter Tage entstehen. Die Diskussion dieser Maßnahmen in der Öffentlichkeit lässt aber zu diesem Zeitpunkt keinerlei Mutmaßung zu, wie realistisch oder auch wirtschaftlich die einzelnen Vorschläge sind oder welche Möglichkeit sich in Zukunft als durchführbar herausstellt.

### 4.3 Luftqualität

Die Luftqualität zum Beispiel im Klassenraum ist ein Thema, das von jedem Schüler aus eigener Erfahrung nachvollzogen werden kann und welches auch mit einem gewissen Eigeninteresse verfolgt wird. So besteht die Möglichkeit, eine gemeinsame Problemstellung zu entwickeln und mit den Schülern gemeinsam Untersuchungen durchzuführen und Maßnahmen zu erarbeiten, die die Luftqualität verbessern. Diese können dann unverzüglich ausprobiert und auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden.

Welchen Einfluss Kohlenstoffdioxid auf die Qualität von Raumluft hat, wurde schon vom Apotheker Max von Pettenkofer Mitte des 19. Jahrhunderts festgestellt. Dieser hatte sich mit Hygiene befasst, weil sich im Zuge der Industriellen Revolution die Lebensbedingungen weiter Teile der Bevölkerung veränderten und es immer wieder zu verheerenden Seuchen und Krankheiten kam. Die technischen Veränderungen hatten es mit sich gebracht, dass viele Menschen nun in geschlossenen Räumen (z.B. Fabriken) arbeiten mussten oder auch auf engstem Raum in schlecht belüftbaren Mietskasernen hausten. Max von Pettenkofer fand heraus, dass eine unzureichende Lüftung zu einer Anreicherung der von ihm so betitelten „Kohlensäure“ führt und das der Gesundheit nicht förderlich wäre. Er legte damals eine Höchstkonzentration für  $\text{CO}_2$  in der Luft mit 1 Volumenprozent fest (die so genannte Pettenkoferzahl), deren Überschreitung zur Gesunderhaltung der im Raum befindlichen Personen vor allem bei dauerhaftem Aufenthalt nicht zu empfehlen war.

Auch heute sind die maximalzulässigen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen für verschiedene Räume genauestens mit Hilfe von DIN- Normen festgelegt, deren Werte sich jedoch nur sehr geringfügig von denen Pettenkofers unterscheiden (nach DIN 1946 sind bis zu 1,5 Volumenprozent  $\text{CO}_2$  nicht gesundheitsbedenklich).

Wie schnell dieser Wert erreicht ist, ist am besten mit einer Bestimmung des aktuellen Kohlenstoffdioxidgehaltes im Klassenraum zeigen.



## **Versuch 5: CO<sub>2</sub>- Gehalt in der Raumluft**

### Geräte

- Einmachglas mit luftdichtem Verschluss
- Magnetrührer
- Rührfisch
- 2 Einwegspritzen 60 mL
- Einwegspritze 10 mL

### Chemikalien

- Natronlauge ( $c = 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )
- Salzsäure ( $c = 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )
- Phenolphthalein ( $w = 0,001$  in Ethanol  
 $w = 0,7$ )

### Aufbau:

Als Reaktionsgefäß wurde in diesem Fall ein Einmachglas verwendet, das mit so vielen, eigentlich zur Abdichtung gedachten Gummiringen versehen wird, dass durch die entstandene Gummischicht ganz leicht mit einer Einwegspritze in den Reaktionsraum eingestochen werden kann und trotzdem noch ein luftdichter Verschluss mit dem vorgesehenen Mechanismus möglich ist. Mit dem offenen Gefäß wird eine Luftprobe genommen und nach Zugabe des Rührfisches dicht verschlossen. Der Probe werden 40 mL Natronlauge ( $c = 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) mit Hilfe einer Einwegspritze zugegeben und heftig geschüttelt, damit die Natronlauge mit dem Kohlenstoffdioxid der Probe reagieren kann. Nun wird das Gefäß auf dem Magnetrührer platziert. Durch Zugabe von ca. 3 Tropfen Phenolphthalein wird die Lösung violett und die Gegenditration mit Salzsäure ( $c = 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) bis zum Umschlagpunkt (violett – farblos) erfolgen. Anhand des Verbrauches der Salzsäure und des Volumens der Luftprobe kann nun die Konzentration von CO<sub>2</sub> in der Raumluft erfolgen.

Aufgrund der geringen Konzentrationen der Lösungen empfiehlt es sich, einen Titer zu bestimmen. Das geschieht gleich im Anschluss an die eigentliche Messung, indem zu der gerade farblosen Lösung erneut 40 mL Natronlauge gespritzt werden und erneut mit Salzsäure bis zum Farbumschlag titriert wird. Die Volumendifferenz gibt an, wie viel Natronlauge bei der Messung mit Kohlenstoffdioxid reagiert hat. Wenn die zusätzliche Titerbestimmung allerdings zuviel Zeit in Anspruch nimmt (wie im

Falle des Experimentalvortrages), kann dieser Titer auch kurz vorher auf gleiche Weise bestimmt werden.

! Die Bestimmung der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Raumluft erweist sich als relativ problematisch, da nur sehr geringe Mengen in der Luft enthalten sind und somit eine Bestimmung mit in der Schule zur Verfügung stehenden Mitteln und ohne teure Messgeräte einem großen Fehler unterliegt. Um diesen so klein wie möglich zu halten, wird in einem geschlossenen Gefäß gearbeitet und alle Lösungen werden kurz vor der Messung hergestellt, da allein die Reaktion mit der Umgebungsluft jegliche genaue Untersuchung zunichte macht.

Die Zugabe des Indikators sollte in sehr geringen Mengen erfolgen, da Phenolphthalein selbst als schwache Säure reagiert und so das Ergebnis verfälscht wird !

Beobachtung:

Verbrauch (HCl) = 12,2 mL

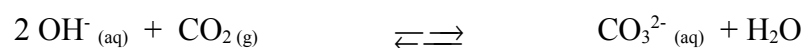
Titer (vorher bestimmt) = 0,96

T = 295 K

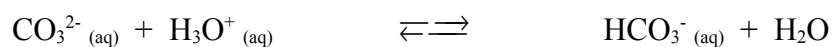
p = 101,325 kPa

Auswertung:

Zuerst wird ein bestimmtes Volumen an Luft im Reaktionsgefäß eingeschlossen. Das darin enthaltene Kohlendioxid wird mit Hilfe von Natronlauge einer bestimmten Konzentration aus dem Gasgemisch herausgetrennt:



Dabei verringert sich die Konzentrationen der Hydroxidionen in der Lösung. Diese Veränderung kann mit Salzsäure der gleichen Konzentration gegentitriert werden. Die Protonen reagieren in diesem Fall sowohl mit den restlichen Hydroxidionen der Natronlauge, als auch mit den entstandenen Carbonationen:



Trotz dieser doppelten Reaktion kann der Verbrauch der zugegebenen Salzsäure mit dem Kohlenstoffdioxid in der Gasprobe gleichgesetzt werden, da bei der Absorption des Gases 2 Mol Base umgesetzt wurden und in der Titration jeweils ein Mol Hydroxidionen und Carbonat reagieren. Für die beobachteten Werte ergibt sich folgende Rechnung:

Zur Neutralisation der Natronlauge wurden 12,2 mL Salzsäure benötigt. Die Menge an Natronlauge, die mit  $\text{CO}_2$  umgesetzt wurde ergibt sich als Differenzbetrag aus eingesetzter Base und verbrauchter Säure:

$$\begin{aligned} V(\text{NaOH}_{\text{umgesetzt}}) &= V(\text{Vorlage}) - \text{Verbrauch}(\text{HCl}) \\ &= 40 \text{ mL} - 12,2 \text{ mL} \\ &= 27,8 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n(\text{CO}_2) &= V(\text{NaOH}_{\text{umgesetzt}}) \cdot c(\text{NaOH}/\text{HCl}) \cdot t \\ &= 27,8 \text{ mL} \cdot 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot 0,96 \\ &= 0,00002688 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

Das Volumen des Gases ergibt sich anhand des Gasgesetzes, zur Beschleunigung der Rechnung wurde hier ein zuvor berechneter Wert zugrunde gelegt, der sich auf ein Mol des Gases bezieht:

1 Mol CO<sub>2</sub> entspricht 22.38 L (bei den gegebenen Bedingungen)

$$\frac{1\text{Mol}}{24,38\text{L}} = \frac{n(\text{CO}_2)}{V(\text{CO}_2)}$$

$$\begin{aligned} V(\text{CO}_2) &= 24,38 \text{ L} \cdot 0,00002688 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \\ &= 0,00059 \text{ L} = 0,598 \text{ mL} \end{aligned}$$

Der Volumenanteil von Kohlendioxid in der Umgebungsluft ergibt sich nun im Verhältnis zur eingesetzten Probenmenge:

$$\varphi = \frac{V(\text{CO}_2)}{V(\text{Glas})} = \frac{0,598\text{mL}}{960\text{mL}} = 0,0623 \text{ Vol } \%$$

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Raumluft des Seminarraumes beträgt nach einer Zeit von ca. 35 Minuten und einem aus etwa 20 Menschen bestehenden Auditorium 0,0623 Vol % . Damit hat sich der Anteil an Kohlenstoffdioxid in diesem Raum innerhalb von 30 Minuten verdoppelt und der Richtwert für Lufthygiene ist fast erreicht. Die Vorstellung von einem Klassenraum ähnlichen Ausmaßes, gefüllt mit 30 und mehr Kindern über einen Zeitraum der obligatorischen 45 Minuten lässt in diesem Zusammenhang die Abschätzung der Relevanz dieses Themas für die Schule und die Alltagssituation der Schüler zu. Die gemeinhin aus überfüllten Vorlesungssälen bekannten Folgen von verbrauchter Luft, die von Müdigkeit bis Kopfschmerzen reichen, zumindest jedoch eine verminderte Konzentrationsfähigkeit zur Folge haben, empfehlen eine Behandlung des Themas im Unterricht oder auf jeden Fall Gegenmaßnahmen wie das regelmäßige Stoßlüften.

Um die Auswirkungen jenseits der eigenen Erfahrungen deutlich zu machen folgt eine Demonstration am „lebenden Objekt“.

### ***Demonstration 3: Die physiologische Wirkung von CO<sub>2</sub>***

#### Aufbau:

In ein Terrarium werden drei bis fünf Heuschrecken gegeben. Dabei kann nach Wunsch auch auf andere Lebewesen zurückgegriffen werden, die in einem beliebigen Gefäß aufbewahrt werden können. Es sollte lediglich darauf geachtet werden, dass ein gewisser Bewegungsspielraum besteht.

#### Durchführung:

Durch eine kleine Öffnung im Terrarium wird Kohlenstoffdioxid von oben in das Gefäß eingeleitet. Nach Abschluss der Beobachtungen kann Sauerstoff zugegeben werden, bis nahezu alles Kohlenstoffdioxid verdrängt ist.

#### Beobachtung:

Die Heuschrecken sind zu Beginn des Versuches relativ gleichmäßig auf den gesamten Raum im Terrarium verteilt und animieren sich gegenseitig zur Bewegung. Nachdem Gas eingeleitet wurde nimmt der Bewegungsdrang der Heuschrecken immer mehr ab und sie sammeln sich vermehrt im oberen Teil des Gefäßes, bis sie dort völlig bewegungslos verharren. Nach Zugabe von Sauerstoff beginnen sie aus ihrer Starre zu erwachen und begeben sich zunehmend in den unteren Teil des Terrariums. Nach mehreren Minuten hüpfen sie erneut.

#### Auswertung:

Die durch das CO<sub>2</sub> hervorgerufene Bewegungsstarre ist zum größten Teil auf den

Mangel an Sauerstoff zurückzuführen, der im Zuge der Verdrängung durch das schwerere Kohlenstoffdioxid entsteht. Dadurch werden die lebenswichtigen Prozesse der Atmung und Energiegewinnung behindert. Es erfolgt die Einschränkung der Energie verbrauchenden Handlungen auf ein lebensnotwendiges Minimum und die Heuschrecken begeben sich in die Region innerhalb ihres Aktionsradiuses, in der am meisten Sauerstoff vorhanden ist. Nach Zugabe von reinem Sauerstoff erfolgt die schrittweise Verdrängung des Kohlenstoffdioxides aus dem Terrarium, die für die Heuschrecken lebensnotwendigen Prozesse können mit Hilfe dieses Gases erneut in Gang gesetzt werden.

Ein direkter Vergleich der Demonstrationsbedingungen mit den menschlichen Reaktionen auf verbrauchte Luft ist nicht eindeutig möglich. Vielmehr beruht die physiologische Wirkung von Kohlendioxid beim Menschen nicht allein auf der Verdrängung des lebensnotwendigen Sauerstoffes, sondern ebenfalls auf der Steuerung des Atemreflexes durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Blut. Damit wird erreicht, dass der Körper bei hohem Kohlendioxidgehalt den Atemreflex auslöst und somit das Ausatmen und die Normalisierung des Atmungskreislaufes hervorruft. Überschreitet dieser  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Blut allerdings einen bestimmten Wert wird der Atemreflex gelähmt und es kommt zum Ersticken, bevor der Mangel an Sauerstoff sich bemerkbar gemacht hätte.

So lässt sich festhalten, dass schon bei dauerhafter Einwirkung einer Umgebungsluft mit 0,3 Vol % ernsthafte Gesundheitsschädigungen zu befürchten sind. Eine Konzentration von 5 Vol % führt dann zu Kopfschmerz, Schwindel bis hin zu Bewusstlosigkeit und einem Volumenanteil von 8 % und mehr tritt beim Menschen der Tod ein. Solche Werte werden zwar in einem Klassenraum nur schwer zu erreichen sein und sollten deshalb eher in Zusammenhang mit Gefahren in Gärkellern oder in Senken in die  $\text{CO}_2$  eingast Beachtung finden. Die Tatsache aber, dass schon geringfügige Erhöhungen des natürlichen Gehaltes an Kohlenstoffdioxid in der Umgebungsluft den Eindruck von „verbrauchter Luft“ beim Menschen hervorrufen und nicht zuletzt die Konzentrationsfähigkeit beeinflussen, verdient allerdings vor allem in einem schulischen Kontext Beachtung.

## 5. Schulrelevanz

Kohlenstoffdioxid kann aufgrund der zahlreichen Alltagsbezüge an unzähligen Stellen im Chemieunterricht betrachtet werden. Alle diese Möglichkeiten hier aufzuführen, würde sicherlich den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen. Da schon im Laufe der obigen Ausführungen ausgiebig auf die Bedeutung der einzelnen Themen für den Schulunterricht eingegangen wurde, sollen an dieser Stelle lediglich die Themenkomplexe Beachtung finden in denen der Hessische Lehrplan (G8) eine Behandlung von Kohlenstoffdioxid ausdrücklich vorsieht oder zumindest nahelegt.

Zuerst taucht Kohlenstoffdioxid in der siebten Klasse im Themenschwerpunkt „die chemische Reaktion“ auf. Dabei wird  $\text{CO}_2$  als Bestandteil der Luft vorgestellt und auch schon die Thematik der Luftschadstoffe und des Treibhauseffektes angesprochen. Auch das Thema der Verbrennung wird sicherlich im Unterricht nicht ohne die Erwähnung von  $\text{CO}_2$  auskommen.

Unter der Überschrift „Redoxreaktionen“ bieten sich in der zehnten Klasse sicherlich auch Reaktionen an, die Kohlenstoffdioxid beeinhaltet. So wird vor allem der Hochofenprozess eine Rolle spielen oder auch die Betrachtung des Redoxverhaltens von  $\text{CO}_2$  Beachtung finden. Schließlich erscheint Kohlenstoffdioxid ein letztes Mal in der zwölften Klasse im Grund- wie im Leistungskurs bei der Behandlung des chemischen Gleichgewichtes. Die Besprechung des Boudouard-Gleichgewicht als technisch wichtiges Gleichgewicht wird dabei sicherlich kaum fehlen.

Neben diesen klassischen Einsatzgebieten gibt es weitere Einsatzgebiete, die nicht zuletzt der Tatsache geschuldet sind, dass Kohlenstoffdioxid auch im Rahmen von Lehrer- und Schülerexperimenten leicht zu handhaben, günstig zu beschaffen und nahezu ungefährlich ist. Diese Vorteile können an verschiedenen Punkten genutzt werden. Vor allem aber der Einsatz in Bereichen, die dem Schüler einen Eindruck vermitteln, der über die Grenzen der wissenschaftlichen Chemie hinaus geht, scheint die Betrachtung von  $\text{CO}_2$  besonders lohnenswert. So kann vor allem in Bezug auf Umwelterziehung und Gesundheitserziehung den Schülern ein besonderes Bewusstsein für ihre Lebenssituation und ihren persönlichen Handlungsspielraum vermittelt werden.

## Quellennachweise

### Literatur:

Atkins, Peter W., Physikalische Chemie, Weinheim <sup>3</sup>2004

Hollemann, Arnold Fr., Wiberg, Nils, Wiberg, Egon, Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin  
<sup>101</sup>1995

Riedel, Erwin, Anorganische Chemie, Berlin <sup>6</sup>2004

<http://www.bmu.de>

<http://www.klimabuendnis.org>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid>

### Abbildungsverzeichnis

Es werden lediglich die Abbildungen aufgeführt, die nicht selbständig erstellt, sondern übernommen wurden.

Abb. 1: <http://www.uni-kassel.de/hrz/db4/extern/elearning/latest/FB11/projekte/kohlenstoff/kohlenstoffkreislauf/kohlenstoffkreislauf.html>

besucht am 4. August 2007 um 18:26 Uhr



Abb. 3: <http://www.uni-bayreuth.de/departments/ddchemie/umat/csaeure/kohlensaeure.htm>

besucht am 4. August 2007 um 19:31 Uhr

Abb. 6: <http://de.wikipedia.org/wiki/Mineralwasser>

besucht am 11. August 2007 um 18:30 Uhr

Abb. 7: <http://weinkunde.net/>

Besucht am 12. August 2007 um 11:12 Uhr

Abb. 8: <http://www.head-shop.de/04439.html>

besucht am 12. August 2007 um 10:35 Uhr

Abb. 9: [http://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz\\_F-Cell](http://de.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_F-Cell)

besucht am 12. August 2007 um 14:00 Uhr

Abb. 10: <http://dc2.uni-bielefeld.de/dc2/mwg/sigmoidal.htm>

besucht am 12. August 2007 um 14:17 Uhr

Abb. 11: <http://www.chempage.de/lexi/stahl.htm>

besucht am 12. August 2007 um 15:04 Uhr

Abb. 12: [http://kalleskuh.suedblog.de/files/images/2006/8/mob40\\_1155504924.jpg](http://kalleskuh.suedblog.de/files/images/2006/8/mob40_1155504924.jpg)

besucht am 12. August 2007 um 20:20 Uhr

Abb. 14: <http://www.wieselburg.at/wDeutsch/Umwelt/treibhaus.asp>

besucht am 29. August 2007 um 21:30