

# Dicke Luft und saurer Regen

Gastvortrag zur universitären Aus- und Fortbildung von Lehrerinnen und Lehrern für Chemie, Naturwissenschaften/Naturkunde sowie für Kollegstufenbetreuer an bayerischen Gymnasien. Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Institut für Didaktik der Chemie, Mai 1999

## Inhalt:

1. Was ist Luft?
2. Die Zusammensetzung der Luft
3. Wetterkapriolen und Klimakatastrophen - Ist unsere Luft noch zu retten?
4. Literaturverzeichnis
5. Abbildungsnachweis

## 1. Was ist Luft?

### 1.1. Von der Bedeutung der Luft



Abb.1: Luft als Fortbewegungs- und Arbeitsmittel

Luft ist ein Stoff.

Beim Laufen und beim Radfahren spürt man einen Widerstand. Der Wind treibt Segelboote und Windmühlen. Drachen gleiten in der Luft, Flugzeuge fliegen und Ballons steigen auf. Auf der Leine flattert die Wäsche im Wind. Luft ist ein wichtiges Fortbewegungs- und Arbeitsmittel. Wind und Sturm können aber auch große Schäden anrichten; fruchtbarer Ackerboden wird weggeblasen, Bäume werden entwurzelt und Gebäude zerstört.

Luft ist in dünner Schicht ein farbloses und unsichtbares Gas, dessen Vorhandensein wir gerne vergessen. "Der ist Luft für mich", sagen wir, wenn wir jemanden geringschätzen. Eigentlich müsste das aber ein riesengroßes Lob sein, denn von der Luft hängt unser Leben ab. Tagtäglich benötigt der Mensch mindestens  $6\text{ m}^3$  Luft und macht dazu etwa 20 000 Atemzüge. Wie jeder physikalische Körper nimmt auch Luft einen Raum ein. Davon kann man sich leicht überzeugen, wenn man ein umgestülptes Glas senkrecht unter Wasser drückt. Die Taucherglocke (siehe Abb.) arbeitet nach diesem Prinzip. Auch die Wasserspinne, die in einer Art "Luftglocke" unter Wasser lebt, nutzt dasselbe Prinzip.

## 1.2. Die Luft und ihre physikalischen Daten

Wie jeder andere Stoff, so ist auch die Luft gekennzeichnet durch eine ganze Reihe von Parametern.

Die mittleren physikalischen Daten von trockener Luft sind:

|                  |   |
|------------------|---|
| Siedepunkt       | -194,35 °C  |
| molare Masse     | 28,96 g/mol   |
| Dichte           | 1,29 kg/m <sup>3</sup> , bei 273K (0°C) und $101,3 \cdot 10^3$ Pa (1 atm) |
| Normal-Luftdruck | 1 kp/cm <sup>2</sup> = 10 000 kp/m <sup>2</sup>                           |

Luft hat also auch eine Masse.  $1\text{ m}^3$  Luft ist 1,29 kg schwer - das ist eigentlich ganz schön viel. Wie alle Körper so wird auch die Luft infolge der Masse ihrer Moleküle zum Erdmittelpunkt gezogen. Aufgrund ihrer ungeordneten Wärmebewegung setzen sich die Moleküle aber nicht am Boden ab, sondern bleiben frei als Atmosphäre im Schwebefeld der Erde gebunden. Auf der Erdoberfläche lastet die gesamte Luftschicht und verursacht den atmosphärischen Luftdruck. Der Normal-Luftdruck beträgt in Meereshöhe bei 0°C 1 at, also  $1\text{ kp cm}^{-2}$ ; d.h. auf eine Fläche von  $1\text{ cm}^2$  drückt die Kraft von 1 kg Masse.

Auf  $1\text{ m}^2$  der Erdoberfläche übt die Lufthülle eine Kraft von 10 000 kp aus ( $1\text{ at} = 10\,000\text{ kp m}^{-2}$ ). Das wäre auf den menschlichen Körper mit einer Oberfläche von etwa  $1,5\text{ m}^2$  eine Kraft von 15 000 kp!

Daß der Mensch unter dieser enormen Kraft nicht völlig zerquetscht wird, liegt daran, daß die gleiche Kraft, die von außen einwirkt, auch aus dem Körperinneren als Gegenkraft aufgebaut wird. Unser gesamter Organismus ist mit Feststoffen, Flüssigkeiten oder Gasen ausgefüllt; es gibt hier keinerlei Vakuum, auch wenn das scherzhaft vom Kopf mancher Mitbürger behauptet wird.

## 1.3. Die Zusammensetzung der Luft

Neben Feuer, Wasser und Erde galt die Luft in der Antike als eines der vier Urelemente. Bis zum Ende des 18. Jahrhunderts galt die Luft als einheitlich. Auch war nicht klar, welche Rolle die Luft bei der Verbrennung von Stoffen spielte.



Abb.2: Robert Boyle

Der Engländer Robert BOYLE (1627-1691) tat den ersten Schritt, diese Frage zu klären. Im Jahre 1673 erhitzte er Blei in einem geschlossenen Gefäß, nachdem vorher alles genauestens gewogen worden war. Nach dem Experiment vernahm er beim Öffnen des Gefäßes ein zischendes Geräusch. Er nahm erneut eine Wägung vor und stellte fest, daß durch die nachströmende Luft die Gesamtmasse nun größer war, als vor dem Experiment. Die Massenzunahme erklärte er mit der Aufnahme von **Feuerstoff** durch die Gefäßwand.



Abb.3: Georg Ernst Stahl

Georg Ernst STAHL (1659-1734) glaubte an **Phlogiston**. Er formulierte, daß beim Verbrennen eines Metalls ein **Metallkalk** zurückbliebe und ein Phlogiston entweiche.

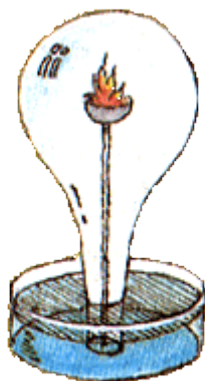


**Abb.4:** Michail Wassiljewitsch Lomonosow

83 Jahre nach dem Experiment von BOYLE kommt Michail Wassiljewitsch LOMONOSSOW in St. Petersburg der Wahrheit ein ganzes Stück näher. Zunächst klärte er die Ursache für das von BOYLE beschriebene zischende Geräusch nach Öffnung der Gefäße. Bevor LOMONOSSOW das zugeschmolzene Glasgefäß öffnete, stellte er eine brennende Kerze auf. Die Kerzenflame wurde im Augenblick des Öffnens in das Gefäß hineingezogen. Beim Erhitzen von Blei im abgeschlossenen Gefäß war also ein Teil der Luft "verschwunden"; das Reaktionsprodukt des Bleis war jetzt schwerer als das Blei vor dem Experiment. LOMONOSSOW formulierte: "Es sind die Luftpartikelchen, die sich mit den Metallen beim Erhitzen verbinden und diese in Kalke verwandeln".

SCHEELE, LAVOISIER, PRIESTLEY und CAVENDISH untersuchten die Zusammensetzung und zeigten, daß Luft mindestens zwei Bestandteile enthält.

Zwischen 1770 und 1772 hatten der Schwede Carl Wilhelm SCHEELE und der Engländer Joseph PRIESTLEY durch Experimente mit Tieren ermittelt, daß nur ein Fünftel der Luft zur Verbrennung und Atmung tauglich ist.



**Abb.5:** Scheele experimentierte mit Schwefel



**Abb.6:** Priestly experimentierte mit Tieren

Den Teil der Luft, der bei Verbrennungen und bei der Atmung übrigblieb, nannte SCHEELE "verdorbene Luft", weil eine brennende Kerze sofort erlosch und Bienen in dieser "Luft" nicht leben konnten. Dem anderen Teil der Luft kam SCHEELE auf die Spur, als er den Sauerstoff,

den er "Feuerluft" nannte, entdeckte. Aus einem Fünftel "Feuerluft" und vier Fünftel "verdorbener Luft" konnte SCHEELE "gewöhnliche Luft" herstellen. Luft war also kein Element, sondern ein Stoffgemisch.



Abb.7: Antoine Laurent Lavoisier

Der Franzose Antoine Laurent LAVIOSIER fand endlich die Lösung. Er bezeichnete die von SCHEELE und PRIESTLEY entdeckten Bestandteile als "Lebensluft" und "Stickluft". U.a. führte er folgendes Experiment aus:

Gelber Phosphor wurde unter einer mit Luft gefüllten Glasglocke, die gegen die Außenluft durch Wasser abgetrennt war, verbrannt. Die Entzündung des Phosphors erfolgte mittels Brennglas durch die Glaswandung hindurch. LAVOISIER beobachtete dabei, daß der Wasserspiegel in die Glasglocke hineingezogen würde, und zwar so, daß ungefähr  $\frac{4}{5}$  des ursprünglichen Luftvolumens übrigblieben. Er schloß daraus, daß sich nur ein Teil der Luft mit dem Phosphor verbunden haben konnte. Welcher Teil das war, wußte er zunächst noch nicht. Erst als PRIESTLEY im Jahre 1775 die "Feuerluft" (Sauerstoff) entdeckt hatte, konnte LAVOISIER den Schluß ziehen, daß sich nur der Sauerstoff mit dem Phosphor verbindet, während die "Stickluft" (Stickstoff) zurückbleibt. 1777 formulierte er: "Bei der Verbrennung der Metalle kommt es zur Vereinigung der Metalle mit Lebensluft". Damit widerlegte er die Phlogiston-Theorie, denn nach dieser Theorie hätten die "verbrannten Metalle" durch entweichendes Phlogiston leichter und das Volumen der umgebenden Luft größer werden müssen.

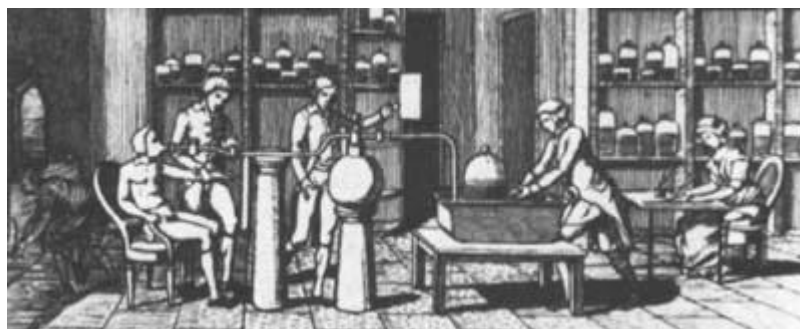


Abb.8: Lavoisier bei seinen Experimenten über die Rolle der Luft bei der Verbrennung

Wir wollen dieses historische Experiment LAVOISIERS in etwas modifizierter Form nachvollziehen



## Experiment:

### Analyse der Luft

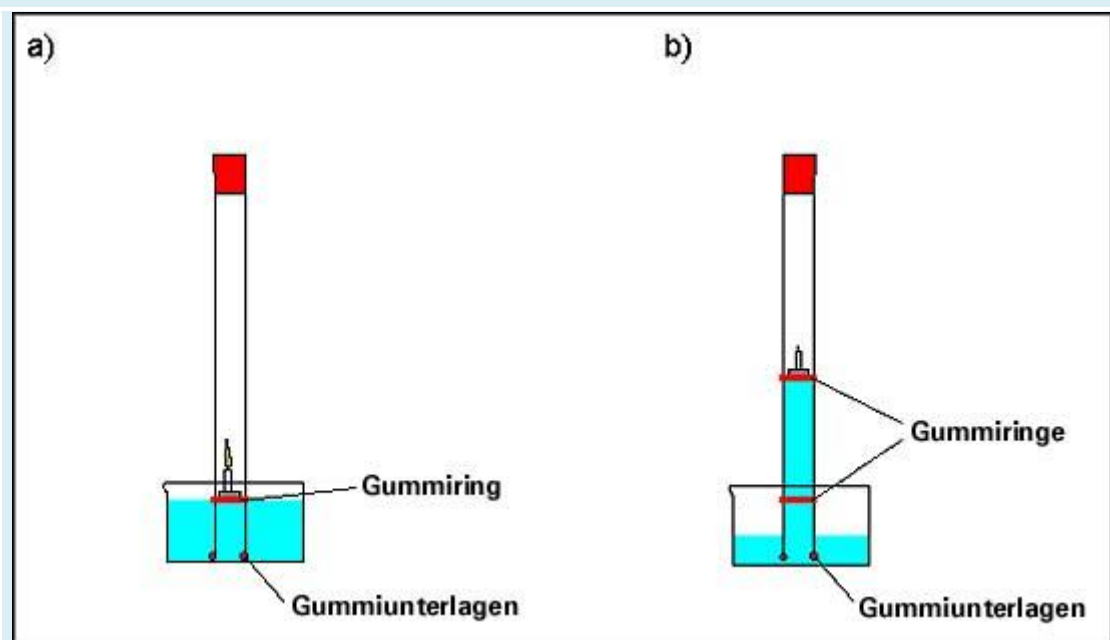
**Geräte:** pneumatische Wanne, Rezipientenglocke oder weites Verbrennungsrohr, Gummiringe

**Chemikalien:** Kerze auf Kork oder Teelicht

#### Durchführung:

VORSICHT! Schutzbrille tragen!

- pneumatische Wanne mit Wasser füllen,
- Kerze in das Glasgefäß einsetzen und unteres Bezugsniveau des Verbrennungsrohres oder der Rezipientenglocke mit Gummiring markieren,
- Kerze entzünden, Glockengefäß überstülpen und anschließend gasdicht verschließen,
- nach dem Erlöschen der Flamme das Wasserniveau erneut mit einem weiteren Gummiring markieren.



#### Hinweis:

Die Luft besteht aus  $\frac{1}{5}$  Sauerstoff und  $\frac{4}{5}$  Restgas. Beim Verbrennen der Kerze wird Sauerstoff verbraucht.

Dieses Experiment ist bei der Behandlung des Themas "Luft" im Anfangsunterricht Chemie, in Naturkunde, ja sogar im Sachkundeunterricht der Grundschule als Lehrer- oder als Schülerdemonstrationsexperiment gut einsetzbar.

Wir können erkennen, daß die Wassersäule zu etwa 1/5 in die Glocke hineingezogen worden ist. 1/5 der Luft (=20%) ist also Sauerstoff.

Was ist aber noch alles in der Luft enthalten?

Die Zusammensetzung der Luft auf unserer Erde ist bis in eine Höhe von 100 km nahezu konstant. Sie enthält folgende Hauptbestandteile:

| Zusammensetzung der Luft   |                  |                                   |  |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|--|
| Hauptbestandteile          |                  | Volumenanteil<br>in %             | relativer Anstieg zur Zeit<br>pro Jahr |
| Stickstoff                 | N <sub>2</sub>   | 78,08                             |  |
| Sauerstoff                 | O <sub>2</sub>   | 20,95                             |  |
| =99,03% des Gesamtvolumens |                  |                                   |  |
| Argon                      | Ar               | 0,93                              |  |
| Kohlendioxid               | CO <sub>2</sub>  | 0,034<br>vorindustriell 0,026     | ca. 0,3 - 0,4%                         |
| Neon                       | Ne               | 0,0018                            |  |
| Helium                     | He               | 0,0005                            |  |
| Methan                     | CH <sub>4</sub>  | 0,00016<br>vorindustriell 0,00007 | ca. 1 - 2%                             |
| Krypton                    | Kr               | 0,00011                           |  |
| Wasserstoff                | H <sub>2</sub>   | 0,00005                           |  |
| Distickstoffmonoxid        | N <sub>2</sub> O | 0,00003                           | ca. 0,2%                               |
| Kohlenmonoxid              | CO               | 0,00002                           |  |
| Xenon                      | Xe               | 0,000009                          |  |

Neben den in der Tabelle genannten Gasen enthält die Luft außerdem noch:

- Wasser in wechselnder Konzentration und in allen drei Aggregatzuständen,
- Schwebeteilchen,
- Staubpartikel,
- Aerosole,
- Schwefel- und Stickstoffverbindungen,
- organische Verbindungen,
- Ozon,
- in der Atmosphäre erzeugte Radikale.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht.

|                                  |  |  |
|----------------------------------|--|--|
| <b>Spurengase</b>                | <b>Volumenanteil in ppb</b><br>(parts per billion = $10^{-9}$ )        |  |
| O <sub>3</sub>                   | 30 - 50  |  |
| Kohlenwasserstoffe               | 10 - 100   | ohne Methan,<br>formal auf die Zahl<br>der C-Atome bezogen |
| NO <sub>x</sub>                  | 0,01 - 5   |  |
| SO <sub>2</sub>                  | 0,1 - 2  |  |
| <b>Spurengase</b>                | <b>Volumenanteil in ppt</b><br>(parts per trillion = $10^{-12}$ )      |  |
| CS <sub>2</sub>                  | 30   |  |
| COS                              | 500  |  |
| CCl <sub>4</sub>                 | 100 - 200  |  |
| CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>  | 230 - 300  | "FCKW"   |
| CFCI <sub>3</sub>                | 160  |  |
| CH <sub>3</sub> SCH <sub>3</sub> | 20 - 150   |  |
| SF <sub>6</sub>                  | 0,5  |  |
| <b>freie Radikale</b>            | <b>Volumenanteil</b><br><b>in Radikale pro m<sup>3</sup></b>           |  |
| OH·                              | 10 <sup>12</sup>   |  |
| HO <sub>2</sub> ·                | 10 <sup>14</sup>   |  |
| <b>Aerosole</b>                  | <b>Massenkonzentration</b><br><b>in 10<sup>-6</sup>gm<sup>-3</sup></b> |  |
| Sulfate                          |  |  |
| Ammoniumsalze                    | je 20 - 50   |  |
| Nitrate                          |  |  |
| Chloride                         |  |  |



Die Staubbelastung der Luft kann man auf recht einfache Art demonstrieren.



## **Experiment:**

### **Prüfen von Luft auf Ruß- und Staubteilchen**

#### **Geräte:**

je Untersuchungsansatz: 1 Becherglas (250 ml) oder Uhrglas oder Petrischale, Tesafilm, 1 Lupe oder Mikroskop, evtl. 1 Schere, evtl. 1-2 Büroklammern

#### **Durchführung:**

- über das Glas einen Tesafilmstreifen mit der Klebeseite nach oben legen und an den Seiten befestigen,
- das Glas über mehrere Stunden (etwa 24 Std.) an exponierter Stelle aufstellen,
- danach den Tesafilm auf Staubkörnchen und andere Schmutzteile untersuchen (evtl. mittels Lupe bzw. Mikroskop), zur Auswertung die gleich großen Streifen Tesafilm untereinander auf ein weißes Blatt kleben und vergleichend beurteilen,
- anhand des Untersuchungsergebnisses auf die Staubbelastung der Luft an den einzelnen Standorten schließen (evtl. Anfertigen einer Staubkarte).

#### **Hinweis:**

Statt über das Glas kann der Tesafilm am zu untersuchenden Standort auch über die Blattfläche einer dort wachsenden Pflanze gelegt und mit einer Büroklammer zusammengehalten werden.

## **2. Was macht unsere Luft so dick?**

Daß wir heute diese Stoff-Vielfalt, wie sie in den Tabellen zum Ausdruck kommt, überhaupt in Luft nachweisen können, liegt nicht etwa daran, daß unsere Luft heutzutage so viel schmutziger und belasteter wäre als früher! - Wir kommen darauf noch einmal zu sprechen. - Sondern es liegt in erster Linie daran, daß mit den superempfindlichen, modernen Analysegeräten heute extrem geringe Stoffkonzentrationen erkannt und gemessen werden können. Viele dieser o.g. Spurenstoffe treten in einer Konzentration im ppb-Bereich auf, d.h. in einer Verdünnung von 1:10<sup>9</sup>. Wenn man sich das veranschaulichen will, bedeutet das, daß bei einer Weltbevölkerung von etwa 8 Mrd. Menschen einzelne Personen registriert werden könnten.

## 2.1. Woher kommt die Luft?

Vom Weltraum betrachtet, erscheint die Erde blau mit weißen "Federn", den Wolken. Die blaue Farbe kommt durch die Lufthülle, an der das Sonnenlicht gestreut wird. Am Aufbau der Atmosphäre hatten 3 Vorgänge wesentlichen Anteil:

1. der Substanztausch mit dem Weltall,
2. die Freisetzung der Gase aus dem Erdinneren,
3. die chemische Bildung von Atmosphärenbestandteilen auf dem Boden, im Wasser und in der Atmosphäre selbst.

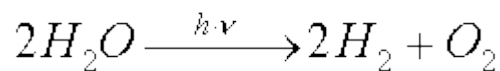
Nach dem Stand der heutigen Forschung bestand die "**Uratmosphäre**" anfangs hauptsächlich aus:

- Wasserdampf,
- Kohlendioxid,
- Stickstoff.

In Spuren waren vorhanden:

- Schwefelverbindungen,
- Halogenverbindungen,
- Wasserstoff,
- Kohlenmonoxid,
- Methan,
- Ammoniak,
- Edelgase, vor allem Argon.

Atmosphärischer Sauerstoff lag - wenn überhaupt - nur in sehr geringen Konzentrationen vor. Dieser Sauerstoff entstammte der Photolyse von Wasser:



Der gleichzeitig dabei entstandene Wasserstoff entwich ins Weltall.

**Vor ca. 4 Mrd. Jahren**, als das Leben in seiner Anfangsentwicklung stand, löste sich das Kohlendioxid der Uratmosphäre zu einem beträchtlichen Teil im Meerwasser. Die im Meerwasser enthaltenen Calcium-Ionen fällten das gelöste Kohlendioxid als Carbonat aus, das auf dem Meeresboden große Kalksteinlager bildete.

Die ersten Lebewesen nutzten die im Urozean vorhandenen Kohlenstoff-, Schwefel- und Stickstoffverbindungen sowie Metallionen ( $Fe^{2+}$ ) für ihren Energiehaushalt.

**Vor 3-4 Mrd. Jahren** traten Bakterien und Blaualgen auf. Sie beherrschten bereits die Photosynthese und nutzten das Licht zur Bildung organischer Verbindungen. Insbesondere gelang es ihnen, sich das reichlich vorhandene Kohlendioxid als Nahrungsquelle zu erschließen. Der bei der Photosynthese ins Meer entlassene Sauerstoff oxidierte zunächst vor allem die Eisen(II)-salze zu Eisen(III)-oxid, das sich im eisenreichen Schlamm absetzte. Nur ein geringer Anteil gelangte in die Atmosphäre.

Nachdem **vor ca. 1,8 Mrd. Jahren** der  $\text{Fe}^{2+}$ -Vorrat der Meere weitgehend verbraucht war, ging der überwiegende Teil des Sauerstoffs jetzt in die Atmosphäre. Im Wasser fanden sauerstoffbindende Prozesse nur noch in untergeordnetem Maße statt. Es entstand eine sauerstoffhaltige, oxidierende Atmosphäre. Gleichzeitig bildete sich durch Photolyse des atmosphärischen Sauerstoffs eine Ozonschicht aus, die die Erdoberfläche vor energiereicher UV-Strahlung schützte und damit eine Entwicklung von Leben an Land ermöglichte.

**Vor ca. 500 Mio. Jahren** entstanden die ersten Pflanzen, die einen Verdunstungsschutz hatten und dadurch das breite Platz-, Licht- und Nährstoffangebot der Uferzonen und des Landes nutzen konnten. Infolge der ständig zunehmenden Photosyntheserate kam es zu einem weiteren Anstieg des atmosphärischen Sauerstoffgehaltes.

**Heute** beträgt die Gesamtmenge an freiem Sauerstoff, der sowohl in der Lufthülle vorliegt als auch im Wasser gelöst ist, etwa  $1,3 \times 10^{18}$  kg. Der überwiegende Teil des insgesamt biologisch produzierten Sauerstoffs (ca.  $6 \times 10^{19}$  kg) liegt in der Erdkruste gebunden vor; hauptsächlich als Metalloxid, Sulfat, Silikat und Carbonat. Durch Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Lithosphäre und Biosphäre bleibt der atmosphärische Sauerstoffgehalt weitgehend konstant.

## 2.2. Luftverschmutzung und andere Umweltprobleme

Daß wir Umweltprobleme haben, liegt größtenteils daran, daß die heute generell industrialisierten Produktionsverfahren in Industrie, Land-, Forst- und Wasserwirtschaft einerseits, aber auch unsere privaten Verbraucher- und Kulturgewohnheiten andererseits, in die Naturkreisläufe und Gleichgewichte eingreifen.

Wie bedeutungsvoll die Gleichgewichtslage sein kann, zeigt ein einfaches Experiment.



### Experiment:

#### Chemisches Gleichgewicht von Stickoxiden

##### Geräte:

3 Ampullen mit Stickstoffdioxid

##### Chemikalien:

Becherglas (250 ml), Kältemischung (z.B. Eis + Kochsalz)

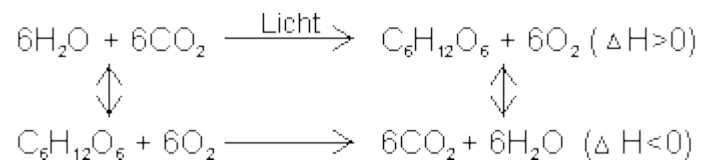
### Durchführung:

- eine Ampulle in ein Becherglas mit 50 °C warmem Wasser stellen,
- eine Ampulle in ein Becherglas mit Kältemischung stellen,
- eine Ampulle bei Zimmertemperatur aufbewahren,
- nach einiger Zeit die Farbintensität der Gase in den drei Ampullen vergleichen.

Umweltrelevante Gleichgewichtsverschiebungen, Auswirkungen und Mechanismen sind aber erst in den allerwenigsten Fällen bekannt; und dort, wo sie bekannt sind, scheinen sie wirtschaftlichen wie privaten Interessen entgegenzustehen. Man kann es sich heute eben einfach noch leisten, auf Kosten der Umwelt zu wirtschaften. Diskutieren wir dazu zunächst folgende Frage:

### 2.2.1. CO<sub>2</sub>-Anstieg - "Treibhauseffekt" - Gerät die Welt aus dem Gleichgewicht?

Ein grundlegender Mechanismus des irdischen Kohlenstoff-Kreislaufs dürfte zweifellos folgender Zusammenhang sein:



Anhand von Gasblasen, die im "ewigen Eis" der arktischen, antarktischen und Hochgebirgsregionen eingeschlossen sind, kann die Zusammensetzung der Atmosphäre über mehr als hunderttausend Jahre zurückverfolgt werden.

In "ganz normaler" Luft ist bereits Kohlendioxid enthalten. Wir können das mit folgendem Experiment zeigen.



### Experiment:

#### Nachweis von Kohlenstoffdioxid in der Luft

##### Geräte:

1 Gaswaschflasche, 1 Schlauchverbindungstück, 1 Gummi-Doppelgebläse (Druckstellung) oder Wasserstrahlpumpe

##### Chemikalien:

Lösung von Bariumhydroxid [Xn] (Barytwasser)

### **Durchführung:**

- die Waschflasche ca. 3 cm hoch mit Barytwasser füllen,
- das Gummi-Doppelgebläse an den langen Schenkeln des Gaswäschers montieren (bei Verwendung einer Wasserstrahlpumpe ist diese an den kurzen Schenkel anzuschließen).
- mehrfach Luftportionen einblasen (bzw. 2-3 Minuten Luft durchsaugen).
- Das Aussehen der Lösung im Gaswäscher mit der ursprünglichen Bariumhydroxidlösung vergleichen.

### **Hinweis:**

Dieser Nachweis ist sehr empfindlich. Es ist anfangs immer vollkommen klares Barytwasser einzusetzen und das Vorratsgefäß sofort wieder zu verschließen. Aufgrund des Kohlenstoffdioxidanteils in der Luft fällt im Gaswäscher bald ein weißer Niederschlag von Bariumcarbonat aus. Vor einem dunklen Hintergrund lassen sich die Farbunterschiede zwischen den Lösungen im Gaswäscher und im Vorratsgefäß besser demonstrieren.

### **Entsorgung:**

Lösung im Behälter für Schwermetallsalzlösungen sammeln.

Der ständige Eintrag von Kohlendioxid sowohl durch Lebewesen, als auch durch terrestrische Prozesse ist etwas "ganz natürliches" und erfolgt zwangsläufig. Die folgenden einfachen Experimente verdeutlichen das.



### **Experiment:**

#### **Nachweis von Kohlenstoffdioxid in der Ausatemluft**

##### **Geräte:**

Becherglas (100 ml), Glasrohr oder Trinkhalm,  
bei vergleichender Arbeitsweise: 2 Gaswaschflaschen, Glasbiegerohr, Schlauchstücke,  
Wasserstrahlpumpe bzw. Gebläse

##### **Chemikalien:**

Kalkwasser [Xi]

##### **Durchführung:**

VORSICHT! Spritzgefahr! Schutzbrille tragen!

- In ein Becherglas 20 ml Kalkwasser füllen,
- durch den Trinkhalm in das Kalkwasser pusten,
- beobachten.

vergleichende Demonstrationsvariante:

- zwei Waschflaschen ca. 3 cm hoch mit Kalkwasser füllen,
- in eine Waschflasche mittels Wasserstrahlpumpe/Gebläse Zimmerluft einleiten,
- an die andere Gaswaschflasche ein sauberes Glasbiegerrohr anschließen und hinein pusten,
- in beide Apparaturen möglichst gleichzeitig und gleich lang etwa gleiche Gasmengen einleiten
- Intensität der Niederschlagsbildung in den Waschflaschen vergleichend betrachten (dunklen Hintergrund verwenden) und daraus auf den Kohlenstoffdioxid-Gehalt der eingeleiteten Gasproben schließen.

**Hinweis:**

Durch den Kohlenstoffdioxid-Gehalt der Ausatemluft flockt in der entsprechenden Kalkwasserportion schnell ein weißer Niederschlag aus. Da auch in der Zimmerluft Kohlenstoffdioxid enthalten ist, erhält man beim vergleichenden Arbeiten im anderen Untersuchungsgefäß ebenfalls eine leichte Trübung, die aber in ihrer Intensität deutlich geringer ist als beim Test der Ausatemluft. Zwar wäre Barytwasser hinsichtlich des Kohlenstoffdioxid-Nachweises bei Zimmerluft empfindlicher, doch sollte einerseits wegen des deutlicheren Unterschiedes zwischen Ausatem- und Zimmerlufttest und andererseits wegen des besonderen Entsorgungsaufwandes auf seinen Einsatz bei diesem Experiment verzichtet werden.

**Entsorgung:**

Kalkwasserreste, Trinkhalme und Mundstücke werfen.



**Experiment:**

**Nachweis des Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsprodukt**

**Geräte:**

1 Verbrennungsrohr mit passendem Einlochstopfen, Gaswaschflasche, 1 Glasstab,  
1 Tiegelzange, Glasbiegerrohrstücke, Glaswolle, Schlauchstücke, Porzellanschiffchen,  
1 Wasserstrahlpumpe bzw. Gebläse mit Sicherheitswaschflasche

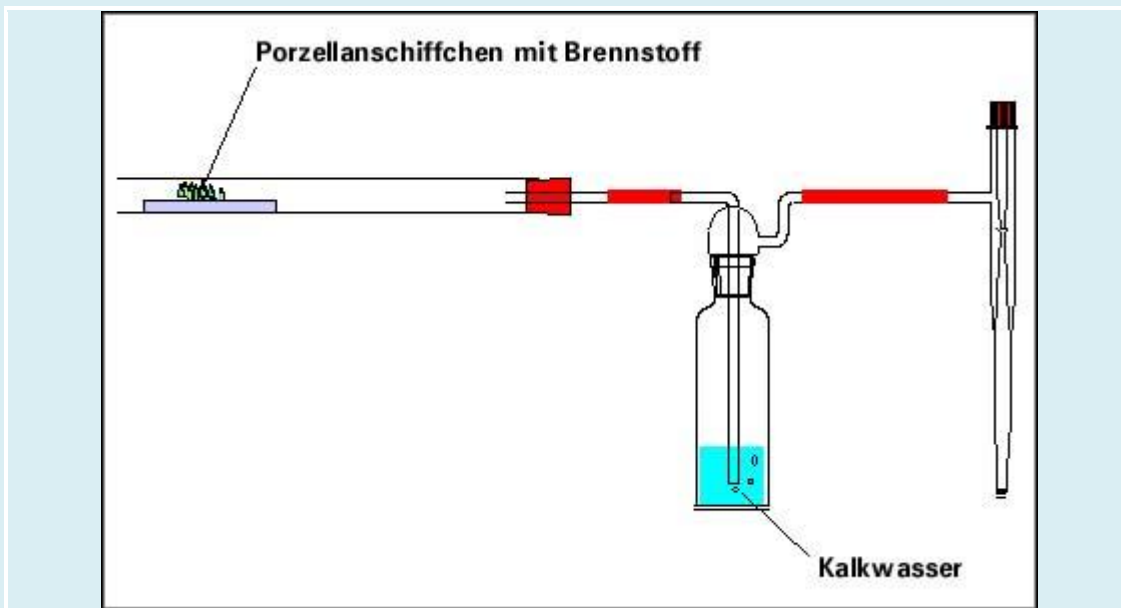
**Chemikalien:**

Kalkwasser [Xi], verschiedene Brennstoffe (z.B. Kohlestückchen, Holz- bzw. Holzkohlestückchen, Holzkohlepulver, Diesel [Xn], Ethanol [F], usw.)

**Durchführung:**

- Montage der Versuchsanordnung nach der Skizze.

- In das hintere Viertel des Verbrennungsrohres einen leicht geknüllten Glaswollebausch als Schwebstoff-Falle einbringen (nur bei der Verwendung von Holz oder Holzkohle als Brennstoff),
- Wasserstrahlpumpe anstellen,
- Brennstoff auf einem Porzellanschiffchen entzünden und mit der Tiegelzange in das Verbrennungsrohr schieben.
- Kalkwasser beobachten.



#### **Hinweis:**

Das Kalkwasser in der Waschflasche weist eine kräftige weiße Niederschlagsbildung auf. Das während des Verbrennungsprozesses gebildete Kohlenstoffdioxid hat sich in der Waschflasche als Calciumcarbonat niedergeschlagen. Im hinteren Teil des Verbrennungsrohres sowie im Glasbiegerohr haben sich als ein weiteres Verbrennungsprodukt z.T. bemerkenswerte Mengen an Wassertropfen gebildet.

#### **Entsorgung:**

Flüssige Brennstoffreste abfackeln; feste Brennstoffreste und Aschereste verwerfen. Kalkwasserreste verwerfen.

Es kommt lediglich darauf an, daß der Bruttoumsatz im Gesamt-Kreislauf ausgeglichen ist. Messungen der vergangenen Jahre deuten aber auf etwas anderes hin:

Vor der Industrialisierung lag der Kohlendioxid-Anteil der Luft bei etwa 260 ppm. Seit 1700 nimmt ihr Kohlendioxid-Gehalt deutlich zu. Heute beträgt er etwa 345 ppm. Derzeit ist jährlich eine Zunahme von etwa 1 ppm zu registrieren. Dieser Anstieg wird vermutlich durch die immer umfangreichere Verbrennung fossiler Brennstoffe einerseits sowie die Vernichtung von Wäldern

und die Zurückdrängung der Bodenbedeckung durch Grünpflanzen (also Vernichtung von Landwirtschafts- und Wildflächen zugunsten von Industriebauten) andererseits verursacht.

Mit Vernichtung von Grünpflanzen geht zwangsläufig die Photosyntheserate zurück.

Über Folgen des Kohlendioxid-Anstiegs in der Atmosphäre ist sich die Wissenschaft noch nicht im klaren. Es wird vermutet, daß globale Erwärmungen und Klimaveränderungen die Folge sein könnten. Es ist aber auch möglich, daß sich gegenläufige Effekte in verschiedenen Schichten der Atmosphäre per Saldo aufheben und es deshalb noch zu keiner generellen Temperaturerhöhung in Bodennähe gekommen ist.

Jedenfalls muß der weitere dramatische Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre schnellstens gebremst werden, und das kann nur durch einen sparsameren Umgang mit fossilen Energieträgern geschehen bei gleichzeitigem Stoppen aller Boden- und Waldzerstörung (Rodung).

Eine Klimakonferenz hatten wir ja bereits. Man wird auf weitere Entwicklungen gespannt sein. Betrachten wir den Umweltaspekt "Luft" von einem anderen Standpunkt aus:

### 2.2.2. Emission und Immission - Stofftransportvorgänge in der Atmosphäre

Unterschiede in der Erwärmung der Atmosphäre sind schon von jeher zu beobachten und ebenfalls "ganz natürlich".

Innerhalb der vertikalen atmosphärischen Struktur erkennt man eine deutliche Schichtung mit unterschiedlichem Temperaturprofil.

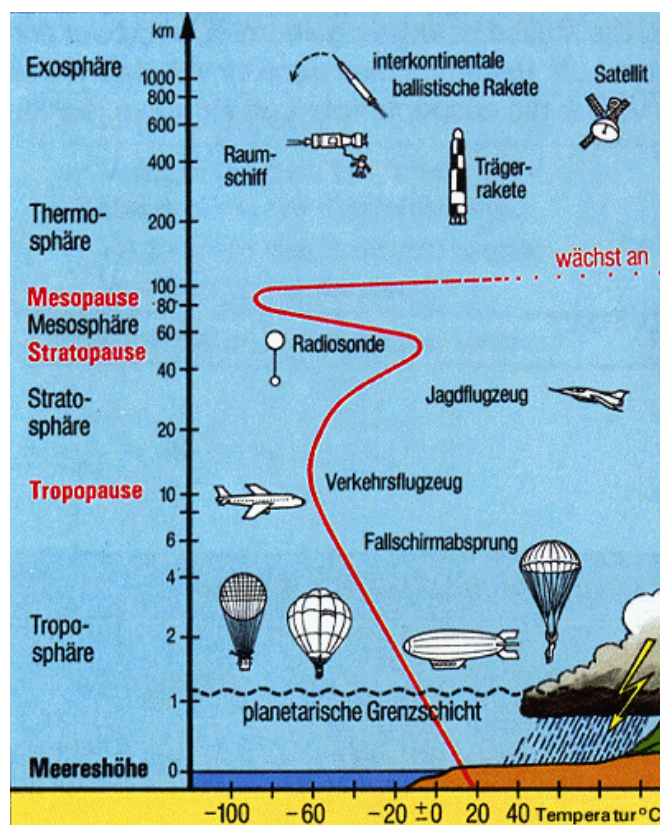


Abb.9: Schichtung der Atmosphäre mit Temperaturprofil



- Die Temperatur der Atmosphäre nimmt vom Boden bis in ca. 10 km Höhe auf ungefähr -60°C ab (Tropopause).
- In etwa 50 km Höhe erreicht die Temperatur erneut ungefähr 0°C (Stratopause) und sinkt während der nächsten 30 km auf fast -100°C ab (Mesopause).
- In noch größerer Höhe hängt die meßbare Temperatur wegen der geringen Wärmekapazität der Thermosphäre stark von den Bestrahlungsverhältnissen ab. In etwa 250 km Höhe liegt die Temperatur nachts bei ca. 500°C und steigt tagsüber auf mehr als 850°C an.

Die auffälligen Temperatur-Extrema in 10, 50 und 80 km Höhe werden als "Pausen" oder "Inversion" bezeichnet.

Durch Absorption und Reflexion von Sonnenstrahlung sind Erdoberfläche und Atmosphäre in einem globalen thermischen Gleichgewicht. Es herrscht eine mittlere Oberflächentemperatur von derzeit 15°C. In 5 km Höhe werden durchschnittlich -18°C gemessen.

Die niedrigen Luftschichten werden relativ stark erwärmt und haben damit eine geringere Dichte als darüberliegende kühlere Schichten. Dies führt zu einer vertikalen Durchmischung.

Tagtäglich werden eine Menge Stoffe in die Atmosphäre abgegeben. Diese Stoffabgabe bezeichnet man als "**Emission**".

Die Emissionsquellen lassen sich in drei große Gruppen einteilen:

- Emissionen, die vom Menschen nicht beeinflusst werden, z.B. Vulkanausbrüche, Emissionen aus Ozeanen, Gewitter.
- Emissionen, die durch Eingriffe des Menschen in die Natur ganz oder teilweise verursacht werden, z.B. durch Landbau, Tierhaltung und Brandrodung.
- Emissionen, die durch die Tätigkeit des Menschen direkt erzeugt werden, z.B. bei der chemischen Reinigung, und auch solche, die durch den Einsatz fossiler Brennstoffe zur Energieerzeugung in Kraftwerken, im Verkehr oder zu Heizzwecken produziert werden.

An anthropogenen Emissionen sind das in der Bundesrepublik Deutschland nach LINDER (1983) und RAAF (1995) alleine etwa 20 Mio t pro Jahr.

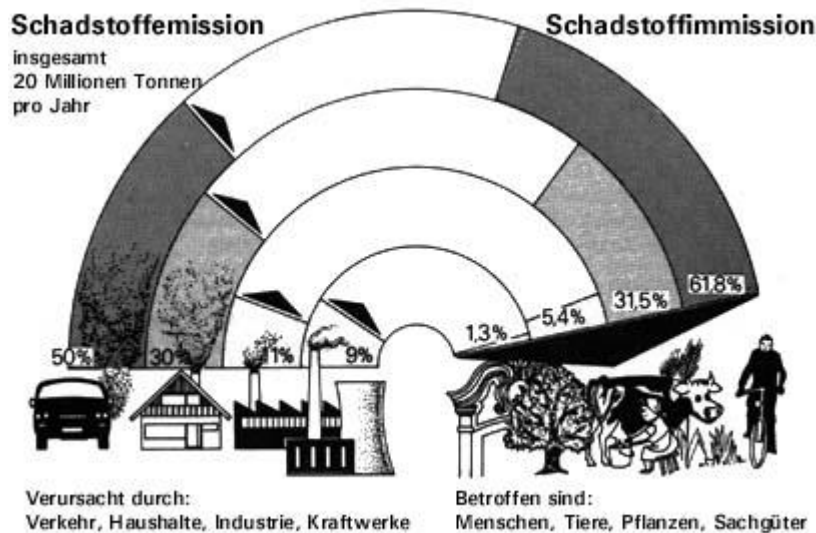


Abb.10: Emission - Immission

Die hauptsächlichsten Luftverschmutzer sind:

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| der Verkehr                     | zu 50% |
| die Haushalte (priv. Heizungen) | zu 30% |
| die Industrie                   | zu 11% |
| die Kraftwerke                  | zu 9%  |

Aufgrund der irdischen Schwerkraft "fallen" alle in die Luft eingetragenen Stoffe in gasförmigem, flüssigem bzw. festem Aggregatzustand wieder auf die Erdoberfläche zurück und beeinflussen alle dortigen Prozesse. Betroffen sind Menschen, Tiere, Pflanzen und Sachgüter gleichermaßen. Eine derartige Einwirkung von Stoffen aus der Luft wird als **"Immission"** bezeichnet.

Unsere heutigen Schadstoffimmissionen resultieren:

|          |                            |
|----------|----------------------------|
| zu 61,8% | aus dem Verkehr            |
| zu 31,5% | aus den Haushaltsheizungen |
| zu 5,4%  | aus der Industrie          |
| zu 1,3%  | aus Kraftwerken            |

### 2.2.3. Smog und Ozonloch - Stoffe an Stellen, wo sie nicht hingehören

Wenn eine gute Luftdurchmischung gewährleistet ist, verdünnen und verteilen sich die luftgetragenen Stoffe infolge vertikaler und horizontaler Luftbewegungen. Solche Konvektionsströme und Durchmischungen enden aber an Luftschichten, die gleiche Dichte bzw.

Temperatur aufweisen. Diese Temperaturinversionen wirken als Transportbarrieren für den Stoffaustausch.. Es kann zu Stoffansammlungen kommen. Geschieht das in Bodennähe, spricht man im Extremfall von "Smog". Folgendes Experiment kann eine solche "austauscharme Wetterlage" gut simulieren:



## Experiment:

### Modellexperiment Smog

#### Geräte:

2 Standzylinder (h=40 cm), 2 Pipetten

#### Chemikalien:

konz. Salzsäure [C], konz. Ammoniaklösung [C]

#### Durchführung:

- Einen der Standzylinder im oberen Bereich, durch ständiges Drehen in einer Brennerflamme, erhitzen.
- In beide Standzylinder einige Tropfen Salzsäure und anschließend einige Tropfen Ammoniaklösung einfüllen.
- Mit einem Heft einige Male über den Öffnungen der Standzylinder für Luftverwirbelung sorgen und beobachten.

Es gibt zwei Arten von Smog: den "Sauren Smog" und den "Photosmog".

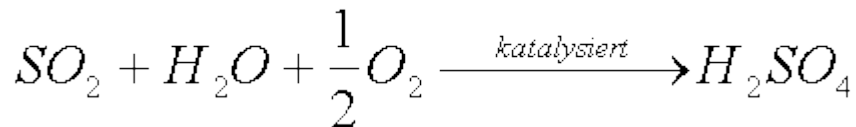
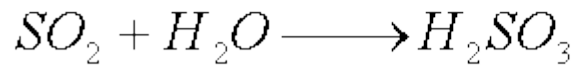
#### 2.2.3.1. Der "Saure Smog" (London-Smog)

Der "**Saure Smog**" wurde zuerst in London (um 1900) beobachtet und daher auch "London-Smog" genannt. Der Name "Smog" wurde aus den Begriffen "Rauch" (= smoke) und "Nebel" (= fog) gebildet und ist mittlerweile allgemeingebäuchlich.

Der Mensch z.B. benötigt täglich mindestens 6m<sup>3</sup> Luft und macht dazu etwa 20 000 Atemzüge. Es ist durchaus möglich, daß sich dadurch Schadstoffe auch bei geringeren Konzentrationen im Organismus anreichern können. So kostete die Londoner Smogsituation im Dezember 1952 4000 Menschen das Leben.

Der "London-Smog" tritt bei winterlichen Inversionswetterlagen in feucht-kalten Regionen auf, wenn in Ballungsräumen durch Verwendung schwefelhaltiger Brennstoffe und niedrige Auslaßhöhen der Abgase die Ausbildung von saurem Nebel stark begünstigt wird. Schwefeldioxid ist eines der gefährlichsten Bestandteile dieser "Abluft". Etwa 3,6 bis 4 Mio t dieses Gases werden jährlich in Deutschland ausgeworfen. Der größte Teil stammt aus der

Verbrennung von Kohle und Heizöl. Es kommt u.a. zu folgenden Reaktionen, die durch Ruß und verschiedene Schwermetalle, die in Kohle und Heizöl enthalten sind, zusätzlich noch positiv katalysiert werden:



Durch Oxidation von Schwefel entsteht mit dem Wasserdampf der Luft Schwefelige Säure (und z.T. auch Schwefelsäure), die den "Sauren Regen" bildet.

Man kann das mit folgendem Experiment simulieren:

Wenn der Anteil an  $SO_2$  und  $NO_x$  in den Abgasen künftig nicht drastisch verringert wird, drohen unserer Vegetation verheerende Schäden. Ein dramatisches Beispiel dafür erleben wir seit einigen Jahren in weiten Gebieten des Erzgebirges und des Bayerischen Waldes, wo es infolge der extensiven Braunkohle-Industrie Nordböhmens bereits zur Entwaldung riesiger Gebiete gekommen ist.

Mit dem folgenden experimentellen Ansatz wollen wir diese enorme Schadwirkung verdeutlichen:



## Experiment:

### Modellexperiment "Saurer Regen" und die Demonstration seiner Wirkung auf die Vegetation

#### Geräte:

2 Erlenmeyerkolben (300 ml Weithals) mit passendem Stopfen und daran befestigtem Verbrennungslöffel, 1 Brenner

#### Chemikalien:

Unitestlösung, Schwefel, Blütenblätter von einer roten Rose

#### Durchführung:

- einen Erlenmeyerkolben ca. 1 cm hoch mit Leitungswasser füllen und einige Tropfen Unitestlösung zufügen (Grünfärbung),
- auf den im Stopfen eingepaßten Verbrennungslöffel eine Spatelspitze Schwefel geben,
- den Schwefel mittels Brennerflamme entzünden,
- den Verbrennungslöffel mit dem intensiv brennenden Schwefel in den Erlenmeyerkolben

- einbringen und den Kolben gasdicht verschließen,
- nach abgeschlossener Verbrennung ist der Kolben evtl. leicht zu schwenken.
  - in den anderen, trockenen Erlenmeyerkolben einige Blütenblätter einer Rose geben,
  - in den Verbrennungslöffel eine Spatelspitze Schwefel geben,
  - den Schwefel entzünden,
  - den Verbrennungslöffel mit dem intensiv brennenden Schwefel in den Erlenmeyerkolben einbringen und den Kolben gasdicht verschließen.

**Hinweis:**

Der Erlenmeyerkolben füllt sich mit weißem Nebel. Die wäßrige Uniteslösung zeigt durch Farbumschlag nach rot an, daß sich "saurer Regen" gebildet hat. Nach 1-2 Min. setzt ein deutliches Ausbleichen des roten Blütenfarbstoffes ein, nach ca. 10 - 13 Min. sind die Blütenblätter nahezu farblos.

**Entsorgung:**

Das noch freie Schwefeldioxid in Wasser einschütteln und anschließend alle Reste verwerfen.

Aber nicht nur auf Lebewesen hat der Saure Regen negative Auswirkungen, sondern auch auf Sachgüter. Gut in Erinnerung sind uns da z.B. Abbildungen von Sand- und Kalkstein-Skulpturen, bei denen man total verwitterte Originale den neu geschaffenen Kopien gegenüberstellt.

Auch die zerstörende Wirkung von Saurem Regen auf Bauwerke läßt sich im Unterricht sehr einfach simulieren.



**Experiment:**

**Löschen von Branntkalk. Herstellen von Kalkmörtel**

**Geräte:**

1 Porzellanschale oder Uhrglas, 1 Löffelspatel, 1 Spritzflasche oder 1 Becherglas (100 ml) und 1 Pipette, Papierunterlage, evtl. Thermometer

**Chemikalien:**

Calciumoxid [Xi] (frisch gebrannt), Sand, Wasser

**Durchführung:**

Vorsicht, Spritz- und Verätzungsgefahr! Schutzbrille tragen! Nach dem Modellieren Hände umgehend waschen!

- Branntkalk und Sand im Verhältnis von etwa 3:1 auf eine flache Schale geben und gut

vermischen.

- Zimmertemperatur ermitteln und dokumentieren.
- Dem Gemisch tropfenweise Wasser zufügen, bis eine formbare Masse entsteht. Währenddessen Temperaturveränderung ermitteln und dokumentieren.
- Masse modellieren und zum Trocknen auf eine Papierunterlage ablegen.
- Verschmutzte Geräte anschließend sofort mit Wasser reinigen!
- Die Modellstücke an der Luft oder auch im Trockenschrank vollkommen abbinden (aushärten) lassen.

**Entsorgung:**

Die Modellstücke für weitere Experimente sammeln oder verwerfen.



**Experiment:**

**Wirkung von saurem Regen auf Bauwerke**

**Geräte:**

1 Pipette, 1 Uhrglas

**Chemikalien:**

5 M Schwefelsäure [C]

**Durchführung:**

- Ein Stück des getrockneten Kalkmörtels auf einem Uhrglas tropfenweise mit Schwefelsäure beträufeln und beobachten.

**Entsorgung:**

Reste verwerfen.

Da die sauren Nebel erhebliche Gesundheitsrisiken darstellen, wurden seit Mitte der 50er Jahre in den westeuropäischen Industrienationen Verordnungen über die Art der Feuerungstechniken und die Qualität von Brennmaterial erlassen. Dadurch konnte bei uns das Auftreten des "Sauren Smogs" in der Folgezeit erheblich vermindert und inzwischen nahezu beseitigt werden.

### 2.2.3.2. Der Photosmog (Los-Angeles-Smog)

Der "**Photosmog**" wird bei Inversionswetterlagen durch intensive Sonneneinstrahlung gebildet. Photosmog wurde in den vierziger Jahren dieses Jahrhunderts zuerst in Los Angeles beobachtet. Dieser Smogtyp wird deshalb auch "Los-Angeles-Smog" genannt.

Los Angeles liegt in einem Becken, das bei hoher Sonneneinstrahlung sehr beständige Inversionswetterlagen aufweist. Die Stadt hat intensiven Kraftfahrzeugverkehr, der die Emissionsstruktur entscheidend beeinflusst. Die Kraftfahrzeugabgase spielen bei der Ausbildung von Photosmog eine entscheidende Rolle. Charakteristische Emissionen von Autoabgasen sind:

- Kohlendioxid
- Kohlenmonoxid
- Stickstoffmonoxid und sogenannte
- "Nichtmethankohlenwasserstoffe" wie höhere Alkane, leichte Alkene, Aldehyde, Ketone und Aromaten.

Photosmog ist gekennzeichnet durch überhöhte Konzentrationen von Oxidantien, wie z.B. von Ozon, in bodennahen Luftschichten. Augenreizungen, Kopfschmerzen, Pflanzenschäden und vorzeitiges Brüchigwerden von Produkten aus Naturgummi sind die Folge.

Daß sich schon unter "normalen" Bedingungen in der uns umgebenden Luftschicht gerade bei Sonnenschein schon eine ganze Menge Ozon befindet kann man mit folgendem Versuch zeigen:



#### **Experiment:**

### **Ozon-Nachweis mit dem SCHÖNBEIN-Filter**

#### **Geräte:**

5 Petrischalen mit passenden Rundfiltern, Erlenmeyerkolben (100 - 250 ml),  
3 Meßzylinder (25 ml)

#### **Chemikalien:**

Kaliumiodidlösung (10 %ig), Kaliumcarbonatlösung (1 %ig), Stärkelösung (5 %ig)

#### **Durchführung:**

- 15 ml Kaliumiodidlösung, 15 ml Kaliumcarbonatlösung und 15 ml Stärkelösung werden in einem Erlenmeyerkolben miteinander vermischt.
- Die Lösung wird auf die mit Rundfilter ausgelegten Petrischalen verteilt.
- Die Petrischalen werden im Exsikkator oder in einem Trockenschrank bei 60 °C getrocknet.
- Die trockenen Filter an dem jeweiligen Prüfort ausstellen und nach einigen Stunden Farbveränderung beobachten.

**Hinweis:**

Je nach Ozonkonzentration verfärben sich die zunächst farblosen/weißen Filter hellbeige bis dunkelbraun. Werden Schönbeinfilter an den Abluftaustritt eines Kopierers gehalten, sind deutliche Verfärbungen unter Umständen schon nach 10-20 Kopien zu erkennen.

Die Intensität der Verfärbung ist mitunter nicht über längere Zeit stabil; deshalb ist ein Sammeln und Aufbewahren der Filter zu einer späteren Auswertung (etwa nach einigen Tagen) nicht empfehlenswert.

Wird zum Anfertigen des Reagenzpapierses Kartoffelstärke (statt der löslichen Stärke) verwendet, dann klebt das Filterpapier am Boden der Petrischale fest. Da der Ozon-Zutritt an der Papier-Unterseite dadurch weitgehend unterbunden wird, verfärbt sich beim Einsatz am Prüfstandort nur die Papieroberseite. Ein Farbvergleich kann dann durch einfaches Wenden der Petrischale vorgenommen werden.

Wie aber entsteht nun Photosmog? Folgende grundlegende Reaktionsprinzipien stecken dahinter:

- a) 1- Durch das Sonnenlicht wird das vorhandene Ozon gespalten.  
Morgens: 2- OH-Radikale entstehen.  
3- Die OH-Radikale reagieren mit den in der Luft vorhandenen Kohlenwasserstoffen.  
4- Unter Rückbildung von OH-Radikalen wird in einer Reaktionskette NO-Radikal zu NO<sub>2</sub>-Radikal oxidiert und damit das Verhältnis c(NO<sub>2</sub>-Radikale) zu c(NO-Radikale) vergrößert.  
5- Da durch Lichteinwirkung NO<sub>2</sub>-Radikal photolysiert wird, entsteht Ozon. Da die Photolyse des NO<sub>2</sub>-Radikales schneller verläuft als die Ozon-Photolyse, steigt die Ozon-Konzentration weiter an.
- b) 1- Wenn NO-Radikal weitgehend in NO<sub>2</sub>-Radikal umgewandelt ist, erreicht die Ozon-Konzentration ihr Maximum.  
Mittags: 2- Danach überwiegen Kettenabbruch-Reaktionen. Die wichtigste Kettenabbruch-Reaktion ist dabei die Rekombination von OH-Radikal und NO<sub>2</sub>-Radikal, die zu Salpetersäure führt.  
3- NO<sub>3</sub>-Radikale und damit auch das N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> werden im Sonnenlicht relativ schnell wieder zerstört; nachts hingegen wachsen ihre Konzentrationen an.
- c) 1- Wenn die Gehalte an NO<sub>2</sub>-Radikalen und NO-Radikalen durch Umwandlung in Nitrate und HNO<sub>3</sub> abgenommen haben, treten andere Kettenabbruch-Reaktionen in den Vordergrund, bei denen auch H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gebildet wird.  
Abends: 2- Die OH-Radikal-Konzentration fällt schließlich auch ab, da sich die NO<sub>2</sub>-Photolyse verlangsamt.



- 3- Gleichzeitig nimmt die Bildung von Photooxidantien ab.
- 4- Wichtiger werden Radikal-Rekombinationen, die zu Peroxo-Verbindungen und organischen Säuren führen.
- 5- Da in  $\text{NO}_x$ -armer Luft Reaktanden zum  $\text{O}_3$ -Abbau weitgehend fehlen, wird Ozon nur langsam umgesetzt und kann ggf. bis zum nächsten Morgen gespeichert werden.
- 6- Häufig fließen solche ozonreichen Luftmassen am nächsten Tag in bodennahe Luftschichten ein und rufen dort - neben dem neu gebildeten Ozon - eine zusätzliche Belastung hervor.

Fassen wir zusammen:

Die auslösende Ursache für Photosmog ist fast überall der morgentliche Berufsverkehr. Dieser ruft synchron mit der wachsenden Sonneneinstrahlung bei noch verlangsamter vertikaler Durchmischung einen Emissionsstoß der Vorläufer-Emissionsquellen  $\text{NO}_x$  und Nichtmethankohlenwasserstoffe hervor. Es wurde beobachtet, daß ohne eine morgentliche "Rush-Hour", also bei einer gleichmäßigen Verteilung des Kraftfahrzeugstroms über den ganzen Tag, die Bildung von Photooxidantien deutlich geringer ist. Die Bildung von Photosmog ist also abhängig von der zeitlichen Verteilung der Vorläufer-Emissionen und könnte durch bessere Arbeitsorganisation weitgehend vermindert werden.

### **2.2.3.3. Das "Ozonloch"**

Während sich Ozon in niederen Luftschichten als ein wesentlicher Smog-Faktor erweist dessen Schadstoff-Relevanz ständig zunimmt, wurde in den letzten Jahren festgestellt, daß die Ozon-Konzentration in der Stratosphäre besorgniserregend zurückgeht.

Die Ozonschicht der Stratosphäre bewirkt, daß ein Großteil der lebensfeindlichen kosmischen Strahlung, vor allem die energiereiche UV-Strahlung der Sonne, gestreut wird. In der Stratosphäre erweist sich das Ozon somit als wichtiges Schutzschild für das irdische Leben.

1985 entdeckte man ein "Ozonloch" über der Antarktis. Man stellte fest, daß vor allem Chlor-Radikale ozonzerstörende Wirkung haben, wenn sie einmal in die Stratosphäre gelangt sind. Solche Chlor-Radikale gelangen nachweislich bei Verwendung von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) bis in die Stratosphäre und zerstören dort die uns schützende Ozonschicht. Produktion und Verwendung von **Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen**, die noch bis vor wenigen Jahren in ungeheueren Mengen vor allem als Treibgas in Spraydosen Verwendung fanden, wurden schlagartig gedrosselt und weitestgehend durch unbedenklichere Sprüh-Verfahren (z.B. "Pumpspray" mittels Luft) ersetzt. Daß aber bis heute immer noch erhebliche Mengen von Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen im Einsatz sind, kann leicht mit folgendem Experiment gezeigt werden:



## Experiment:

### Untersuchen von Stoffproben auf chlorierte Kohlenwasserstoffe (Beilsteinprobe)

#### Geräte:

1 Kupferblechstreifen oder Kupferdraht, 1 Tiegelzange

#### Chemikalien:

Fleckenentferner, Treib- und Lösungsmittel von Sprays, Lösungsmittel für Farben und Lacke (Verdünner)

#### Durchführung:

Vorsicht! Verbrennungsgefahr. Schutzbrille tragen. Substanzproben nicht mit dem heißen Kupfer entzünden. Bei Einsatz von Sprays nicht auf glühende Körper und nicht in die offene Flamme sprühen.

- das kalte Kupferblech bzw. den Kupferdraht evtl. mit Salpetersäure, bei geringer Verschmutzung mit Ethanol reinigen,
- Kupferblech bzw. -draht bis zur Rotglut erhitzen (die Flamme muß weitgehend farbfrei bleiben),
- Kupferblech bzw. -draht mit der Stoffprobe behaften und wieder in die Flamme halten.

#### Hinweis:

Eine Grünfärbung der Flamme weist auf chlorierte Kohlenwasserstoffe hin.

#### Entsorgung:

Rückstände von Stoffproben mit chlorierten Kohlenwasserstoffen in den Behälter für organische Lösungsmittel entsorgen bzw. für weitere Untersuchungen aufbewahren.

Dabei ist recht häufig festzustellen, daß zwar die Treibgase der Spraydosen heute keine FCKW mehr sind; aber als Lösungsmittel werden nach wie vor noch erhebliche FCKW-Mengen eingesetzt.

Hinsichtlich des "Ozonlochs" stellten deutsche Atmosphärenforscher im Frühjahr 1999 einen anderen Effekt fest: Über dem Nordpol wurde so viel Ozon gemessen wie seit zehn Jahren nicht mehr. Zu irgendwelchen "reißerischen" Beiträgen in den Medien besteht aber nicht der geringste Anlaß. Atmosphärische Vorgänge sind viel zu sehr komplexer Natur als daß man allein aus dieser Messung irgendwelche Schlüsse oder Prognosen wagen dürfte.

- Z.B. weiß man, daß relativ hohe Temperaturen in der unteren Stratosphäre die Ozonbildung fördern. - Der letzte Winter war zwar ungewöhnlich warm; die Werte liegen aber noch immer im Bereich der natürlichen Schwankungen.
- Einerseits wirken Substanzen, wie z.B. Stickoxide, der Chlor-Radikalbildung bereits in unteren Luftschichten entgegen. - Andererseits wird der Stickoxid-Gehalt in der Atmosphäre ständig durch weitere Reaktionen beeinflusst (siehe Abschnitt "Photosmog").
- Die ozonzerstörerische Wirkung der Chlor-Radikale konnte bisher nur auf sehr kalten Teilchenoberflächen beobachtet werden - Was geschieht, wenn z.B. durch den Treibhauseffekt eine Klima-Erwärmung einsetzt?

Um hier irgendwelche Prognosen machen zu können, bedarf es noch langjähriger umfangreicher Untersuchungen. Eines ist klar: Über Ozonkonzentration und Ozonverteilung werden wichtige Vorgänge auf der Erdoberfläche gesteuert. Verhalten wir uns nach bestem Wissen und Gewissen heute so, daß die "gesunden" Gleichgewichte erhalten bleiben.

#### **2.2.4. Wichtig für die Schule: Verhalten bei Smog- bzw. Ozonalarm**

Das richtige Verhalten bei Smog- bzw. Ozonalarm unterscheidet sich teilweise erheblich von dem bei anderen Katastrophen:

1. Der Aufenthalt im Freien ist auf das Allernotwendigste zu beschränken. Kinder, Kranke und ältere Menschen sollten den Aufenthalt im Freien grundsätzlich vermeiden.
2. Körperliche Aktivitäten sind weitestgehend zu reduzieren.
3. Da die Schadstoffkonzentration am Boden am größten ist, sind unterirdisch und ebenerdig gelegene Räume, wie U-Bahn-Schächte und Kellerräume, umgehend zu verlassen! Es sind Räume in höhergelegenen Etagen eines Hauses aufzusuchen. Höhergelegene Häuser sind denen in Tallagen vorzuziehen.
4. Fenster und Türen sind geschlossen zu halten; ggf. abzudichten.
5. Schutzsuchende sind einzulassen.
6. Es ist Ruhe zu bewahren.

### **3. Statt einer Zusammenfassung: Wetterkapriolen und Klimakatastrophen - Ist unsere Luft noch zu retten?**

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt: Klimaänderungen hat es von jeher gegeben und offensichtlich auch extreme und plötzliche Schwankungen.

Die Homepage des Deutschen Klimarechenzentrums stellt dazu umfangreiches Material zur Verfügung; auch der WDR mit seinen populärwissenschaftlichen Sendungen, wie "Quarks & Co." oder "Dschungel" weist im Internet auf äußerst interessante Dinge hin.

Internetadressen:

- [Deutsches Klimarechenzentrum](#)
- [Quarks & Co](#)

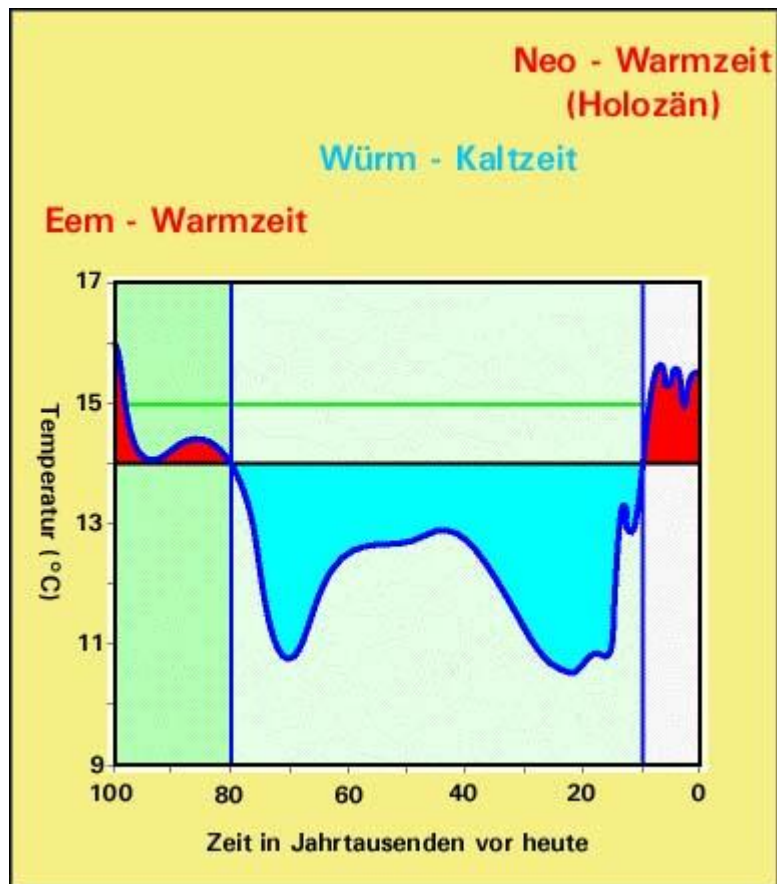


Abb.11: Temperaturveränderungen in den letzten 150 000 Jahren

Ein Blick auf die Temperaturveränderungen in den letzten 150 000 Jahren zeigt folgendes:

Historisch gesehen lassen sich "Warmzeiten" und "Kaltzeiten" nachweisen.

Während der letzten Kaltzeit, als die Gletscherzungen des skandinavischen Inlandeises bis an die Grenzen des heutigen Hamburger Stadtgebietes reichten, war es im globalen Mittel etwa 4°C kälter als heute. In der Übergangsphase zur gegenwärtigen Warmzeit, die etwa vor 11 000 Jahren begann, gab es heftige Temperaturschwankungen von 5-7°C in wenigen Jahrzehnten, die die beobachteten Temperaturänderungen der letzten Jahrhunderte (seit ca. 1700) bei weitem übertrafen. Allerdings hat man Belege dafür bislang nur regional, d.h. auf Grönland und in der Nord-Atlantik-Region, gefunden. Demgegenüber weisen die letzten 10 000 Jahre, d.h. die gegenwärtige Warmzeit, ein ausgesprochen stabiles Klima auf.

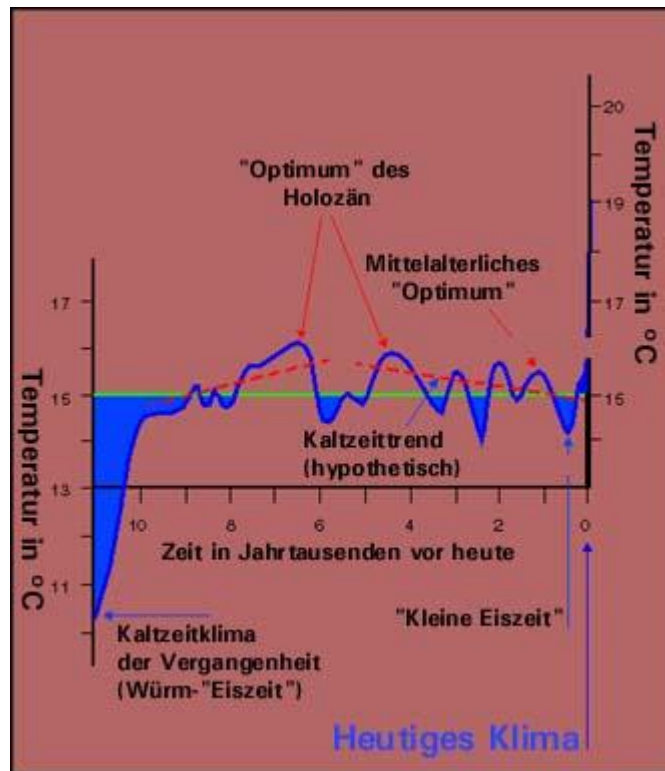


Abb.12: Temperaturveränderungen in den letzten 11 000 Jahren

Dennoch hat es auch in der Nacheiszeit immer wieder Phasen gegeben, in denen die globalen Durchschnittstemperaturen über einen längeren Zeitraum um einen halben Grad oder mehr geschwankt haben. Wärmere und kältere Perioden waren dabei oft mit bestimmten historischen Ereignissen verknüpft. Hierzu einige interessante Beispiele:

**Warme Klimaperioden: Vor 6000 bis 7000 Jahren** und noch einmal vor **4000 bis 5000 Jahren**, im sog. "Hauptoptimum" der Nacheiszeit, war das Klima schon einmal deutlich wärmer als heute - und feuchter. Die Menschen wurden in dieser Zeit sesshaft, und es entstanden die ersten Hochkulturen. Satellitenaufnahmen zeigen, daß es Flußsysteme in der Sahara gab; und die biblischen Berichte über die "Sintflut" fallen ebenfalls in diese Epoche.

Warm war es auch zur **Römerzeit** ("Römisches Optimum"), was Hannibal den Übergang über die Alpen erleichterte.

Und noch einmal im **Mittelalter** ("Mittelalterliches Optimum") wurde es warm, wodurch es den Normannen möglich wurde, Grönland als das "grüne Land" für 200 Jahre zu besiedeln und weit vor Kolumbus Amerika zu entdecken. In England wurde im Mittelalter sogar Wein angebaut.

Dazwischen lagen **kältere Klimaperioden: Um 1000 v.Chr.** war es wahrscheinlich um 1-2°C kälter als heute.

Nicht ganz so kalt zeigte sich das **"Pessimum der Völkerwanderungszeit"**, das die germanischen Völker aus dem Ostseeraum in den Mittelmeerraum getrieben hat.

Nach der "Klimawende" zwischen 1200 und 1400, mit der das "Mittelalterliche Optimum" zu Ende ging, sanken in der sog. **"Kleinen Eiszeit" von 1250-1850** die Temperaturen erneut. Kühle Sommer und strenge Winter führten z.B. in England zu Mißernten und Hungersnöten.

Allerdings sind die Daten bis zum Mittelalter mit vielen Unsicherheiten behaftet. Sie werden aus sog. Proxy-Daten abgeleitet, z.B. anhand von Baumringen, Pollen, Tiefseesedimenten, Eiskernen usw., deren Interpretation z.T. umstritten ist.

Zwar muß man auch für den Zeitraum ab 1400 auf Proxy-Daten zurückgreifen, doch lassen diese schon allein aufgrund ihrer Zeitnähe eine weit bessere Einschätzung des vergangenen Klimas zu. Danach scheint kein Jahrhundert in den letzten 600-1000 Jahren so warm wie das 20. Jahrhundert gewesen zu sein. Niemals hat es in diesem Zeitraum innerhalb von 100 Jahren Temperaturschwankungen von 0,5°C oder gar mehr gegeben; und noch nie vorher wurde in nur 30 Jahren ein Temperaturanstieg von 0,4°C registriert, wie in den letzten drei Jahrzehnten.

### **Wir leben im wärmsten Jahrhundert seit tausend Jahren! - Ist das Zufall oder sind wir selber Schuld?**

Betrachten wir die letzten 50/60 Jahre etwas genauer:

Nachkriegszeit. Umweltschutz war noch ein Fremdwort. Doch schon **1958** ahnten Forscher Böses. Die Wirtschaft startete durch; es wurden ungeheuerere Mengen Abgase in die Atmosphäre entlassen. Mit den ersten regelmäßigen Meßdaten kam auch die erste Prognose: Klimakollaps! Im 21. Jahrhundert würde die Temperatur um 9,6 Grad steigen.

**1968** schienen der Menschheit keinerlei Grenzen mehr gesetzt. Aufbruch ins Weltall! Doch in die Euphorie brach die Kunde von der nahen Umweltkatastrophe. Im Treibhaus Erde würden innerhalb von nur 40 Jahren die Polkappen schmelzen, und als Folge sollte der Meeresspiegel um sieben Meter steigen. Doch dann brachen viele Vulkane aus, und alles kam ganz anders.

**1978** wendete sich der Klimatrend. Unmengen Staub wurden in die Atmosphäre geschleudert und verdunkelten die Sonne. Die Folge: Das Klima kühlte sich weltweit ab. Damals erlebten die USA und Europa sehr strenge Winter. Die Schnee- und Eisflächen auf der Nordhalbkugel legten um 15% zu. Viele Klimaforscher prophezeiten jetzt das genaue Gegenteil von früher: Eine Eiszeit stehe unmittelbar bevor. Doch tatsächlich folgten die wärmsten Jahre seit Beginn der globalen Messungen. Klimaforscher legten **1986** im Auftrag der UNO die erste umfassende Studie vor. Ihr Fazit: Das Treibhauszeitalter hat schon begonnen. Seit 1850 habe sich der Gehalt an Kohlendioxid um 10% erhöht. Die weltweite Durchschnittstemperatur sei deshalb bereits um 0,7 Grad gestiegen. Mit Hilfe modernster Computertechnik berechneten die Wissenschaftler ihre Prognose neu. Ergebnis: Das Katastrophenszenario wurde abgespeckt, die alten Werte halbiert - der Meeresspiegel würde sich bis zum Jahre 2100 um dreieinhalb Meter erhöhen, sagte man jetzt; die globale Temperatur sollte im gleichen Zeitraum um bis zu fünf Grad steigen.

**1995** verfaßten Klimaforscher für die UNO ihre bisher aktuellste Gesamtstudie. Darin hieß es: Jetzt bestehe kein Zweifel mehr, daß der Ausstoß an Treibhausgasen die Erde erwärme. Moderne Technik ermöglicht genauere Voraussagen. In ihren Prognosen sind die Wissenschaftler allerdings wieder bescheidener geworden. Die These von komplett schmelzenden Polkappen ist passé. Sorgenfrei sind sie trotzdem nicht. Neueste Einschätzungen prognostizieren: Der Meeresspiegel werde in hundert Jahren um bis zu einem Meter steigen, die globalen Temperaturen um bis zu 3,5 Grad.

Eines ist damit klar: Nicht nur die Klimaveränderungen bieten Anlaß zur Sorge. Die Berichterstattung darüber ist auch eine Katastrophe. Aus der berechtigten Sorge um unser Klima werden sog. medienwirksame Katastrophenszenarien verbreitet, was mit Umweltschutz, Umweltbildung und Umwelterziehung wenig zu tun hat.

Das Klimarechenzentrum und das Max-Planck-Institut in Hamburg gelten als weltweit führend in der Kunst der Klimamodelle. Sie konnten für die vergangenen 100 Jahre eine tatsächliche Erwärmung von 0,6 Grad nachweisen.

Halten wir fest: Die vom Menschen verursachte Erwärmung der Atmosphäre mit all ihren Folgen für Mensch und Umwelt - sie kommt, ob wir es wollen oder nicht. Es ist höchste Zeit, Umweltschutz tatsächlich zu praktizieren und nicht mehr nur darüber zu polemisieren. Eines ist sicher: Wenn wir die Luft weiter mit Kohlendioxid, Methan und Stickoxiden vollpumpen, wird sich die Erde so aufheizen wie noch nie zuvor in den letzten 10 000 Jahren. Der Kölner Dom wird aber trotzdem nicht im Ozean untergehen. Denn die jüngsten Klimastudien zeigen, daß die Folgen des Klimawandels nicht alle Menschen gleichermaßen treffen, sondern daß es starke regionale Unterschiede gibt.

Generell kann man sagen: Häufigere Stürme in Europa, heftigere Orkane in den Tropen, längere Dürren in Afrika. Hierzu einige konkrete Aussagen:

- Die Küsten Deutschlands und der Niederlande mit dem sensiblen Wattenmeer werden besonders betroffen sein. Die heutigen Strände und Wattinseln drohen zu verschwinden, denn Sturmfluten und stärkere Winde setzen ihnen zu. Doch die Europäer - so vermuten die Forscher - werden ihre Küsten mit teuren Deichbauten schützen können.
- Die Alpengletscher halten sie dagegen für verloren; sie werden zu 95% verschwinden. Anzeichen sind ja bereits heute unübersehbar.
- In Lateinamerika sind vor allem die Anden anfällig für Klimaschwankungen. Die UNO-Prognose: In Chile, Argentinien und Mexiko wird die Anbaufläche für wichtige Nutzpflanzen dramatisch zurückgehen, Nahrungsmittel werden knapp. Die Menschen Lateinamerikas müssen sich auf häufigere und heftigere Überschwemmungen einstellen. Einen Vorgeschmack auf den Klimawandel lieferten ja bereits die schweren Herbstunwetter über Peru.
- In Afrika sind heute schon weite Teile des Landes von Trockenheit gekennzeichnet. Im Kampf gegen Dürre und unfruchtbare Böden fehlt Afrika das Geld. Die UNO befürchtet, daß sich durch Waffengewalt die Auseinandersetzungen um Nahrung und Wasser bald verschärfen werden.
- Die Malediven, die Bahamas, die Marshall-Inseln, sie ragen weniger als 3 Meter aus dem Meer. 80% ihrer Landesfläche droht zu versinken, wenn der Meeresspiegel um einen Meter steigt. Der jahrhundertealten Zivilisation der Inselbewohner droht der Untergang. Die meisten von ihnen leben an der Küste. Im Hinterland ist für sie kein Platz. Für teure Dämme sind die Inselstaaten zu arm.

- Auf den Philippinen und in Indonesien bedroht die Klimaerwärmung den lebenswichtigen Reisanbau. Nur mit modernen Anbaumethoden ließen sich die Erträge halten...
- Überflutungen werden das größte Problem für das dicht besiedelte Bangladesch. Nach UNO-Berechnungen könnten schlagartig mehrere 10 Millionen Menschen im Gangesdelta ihre Heimat verlieren.
- Tropenkrankheiten werden sich zudem weiter ausbreiten. Malaria wird 25% mehr Menschen befallen als heute, da die Erreger in neue Gebiete vordringen. Cholera, Typhus und Gelbfieber werden um bis zu 50% zunehmen, sagt die UNO.

Die, die am wenigsten dafür können, werden die meisten Klimaopfer zu beklagen haben. Das allein wäre schon wieder Stoff genug für eine ganze Reihe weiterer Vorträge.

Nachdem wir jetzt viel vom Treibhauseffekt gehört haben, stellt sich die Frage: Wie können wir dazu beitragen, daß der Kohlendioxid-Ausstoß gesenkt wird?

Etliche Schulen haben derzeit Projekte ins Leben gerufen, um mit Vorhandenem intensiver und sparsamer zu wirtschaften und so einen Beitrag zu leisten, den Kohlendioxid-Eintrag in die Atmosphäre künftig nicht ins Unermeßliche steigen zu lassen. In unserem Land gibt es mittlerweile ein geschlossenes System der Luftanalyse und -überwachung.

Natürlich können wir mit sparsamen Autos fahren, Maschinen effizienter konstruieren, Häuser besser isolieren, auf die eine oder andere Fernflug-Reise verzichten und Solar- und Windstrom verstärkt nutzen.

Auch die Bundesregierung hat eine Reihe von Maßnahmen angekurbelt, die durchaus auch in Richtung Ökologie und Umweltschutz wirken, z.B.:

- Einflußnahme über Öko- und KFZ-Steuer,
- Kat-Pflicht bei neuen Autos,
- Diskussion über Tempolimits bzw. Fahrverbote bei Erreichung bestimmter Schadstoffkonzentrationen,
- Preisgestaltungspolitik bei Heizungssystemen für individuelle Wohnraumheizung - Weg von Briketts und Öl - hin zu Gas und Alternativenergien (hochinteressante Infos für Ihre private Alternativenergienutzung finden Sie z.B. auf den Internetseiten der Fernsehreihe "Dschungel").

Wichtigste Aufgaben für uns Lehrerinnen und Lehrer wird es jedoch bleiben, unsere Schülerinnen und Schüler mit einer soliden Allgemeinbildung auszurüsten und so etwas zu wecken wie das Verlangen nach einer vernünftigen Lebensweise; damit wir alle begreifen, daß wir als winziges Teilchen inmitten unserer Umwelt stehen. Und weil wir mittendrin sind, müssen wir sie erhalten, denn es gibt keine neue. Die Umwelt ist kein Wegwerfartikel, und selbst wenn sie erhebliche Mängel aufweist, ist sie vom Umtausch ausgeschlossen.



#### 4. Literaturverzeichnis

1. Chemie und Umwelt im Chemieunterricht. Internes Arbeitsmaterial. Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, FB Chemie, Abteilung Didaktik der Chemie, Halle, November 1995.
2. Modellversuche zur Wasser- und Luftreinhalung und zur Bodensanierung. Vorlesung von Herrn Prof. Dr. V. Wiskamp. Begleitskript. Fortbildungsveranstaltung der GDCh an der Fachhochschule Darmstadt. 14.01.99.
3. Wiskamp, V.; Proske, W.,: Umweltbewußtes Experimentieren im Chemieunterricht. VCI Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1996. ISBN 3-527-29375-2
4. Umweltbereich Luft. Folienserie (Nr. 22) des Fonds der Chemischen Industrie zur Förderung der Chemie und der Biologischen Chemie im Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/Main 1987.
5. Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993. ISBN 3-06-030719-9
6. Raaf, H.: Was enthält was? Erkennen und Bestimmen von Inhaltsstoffen. Weltbild Verlag GmbH, Niedernhausen/Ts. 1996.
7. Moll, W. L. H.: Taschenbuch für Umweltschutz. Band IV: Chemikalien in der Umwelt. Ausgewählte Stoffe. Ernst Reinhardt Verlag München, 1987.
8. Deutsches Klimarechenzentrum. Homepage. Web-Administration: 05.11.98.:  
[www.dkrz.de](http://www.dkrz.de)
9. WDR-Fernsehen. Quarks & Co. Das Wetter. 1998 WDR Köln, Sendedatum 27.08.96.  
Homepage: [www.quarks.de/wetter/index.htm](http://www.quarks.de/wetter/index.htm)
10. WDR-Fernsehen. Dschungel. Klimaveränderung. 1997 WDR Köln, Sendedatum 25.11.97. Homepage: [www.wdr.de/cgi-bin/dschungel/searc...hode=0&action=1&text=Dienstag,+25.11.1997](http://www.wdr.de/cgi-bin/dschungel/searc...hode=0&action=1&text=Dienstag,+25.11.1997)
11. Peter, T.: Sehr komplexe Vorgänge. Atmosphärenforscher Thomas Peter über die überraschende Ozon-Zunahme am Nordpol. In: Der Spiegel 18/1999 vom 01.05.1999 (internet)

#### 5. Abbildungsnachweis

- Abb. 1: Luft als Fortbewegungs- und Arbeitsmittel. In: Umweltbereich Luft. Folienserie (Nr. 22) des Fonds der Chemischen Industrie zur Förderung der Chemie und der Biologischen Chemie im Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/Main 1987, Folie 1, S. 5.
- Abb. 2: Robert Boyle. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 40.

- Abb. 3: Georg Ernst Stahl. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 40
- Abb. 4: Michail Wassiljewitsch Lomonosow. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 31.
- Abb. 5: Scheele experimentierte mit Schwefel. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 40.
- Abb.6: Priestly experimentierte mit Tieren. Nach: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 40.
- Abb.7: Antoine Laurent Lavoisier. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 31.
- Abb.8: Lavoisier bei seinen Experimenten über die Rolle der Luft bei der Verbrennung. In: Chemie. Stoffe - Reaktionen - Umwelt. Lehrbuch für Sekundarstufe I. Volk und Wissen Verlag GmbH, Berlin 1993, S. 41.
- Abb.9: Schichtung der Atmosphäre mit Temperaturprofil. Nach: Umweltbereich Luft. Folienserie (Nr. 22) des Fonds der Chemischen Industrie zur Förderung der Chemie und der Biologischen Chemie im Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/Main 1987, Folie 2, S. 6.
- Abb.10: Emission – Immission. Nach: Raaf, H.: Was enthält was? Erkennen und Bestimmen von Inhaltsstoffen. Weltbild Verlag GmbH, Niedernhausen/Ts. 1996, S. 256.