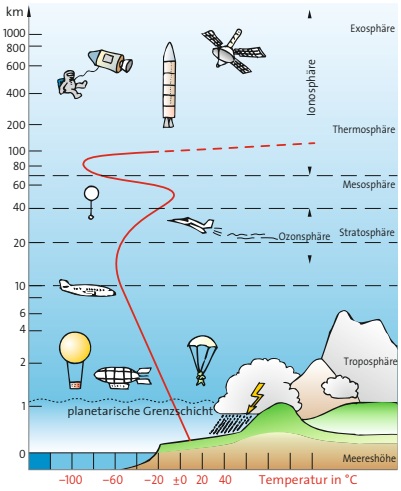
Unsere Atmosphäre – ein Ozean aus Luft

B1 *Weltall-Foto mit Nordafrika, der Gibraltar-Straße und Südspanien*



B2 *Schichtung der Atmosphäre und Temperaturprofil (rote Linie).* ***A:*** *Erklären Sie, warum der Luftaustausch zwischen Troposphäre und Stratosphäre nur gering ist (vgl. INFO).*

Auswertung

a) Die Atmosphäre der Venus besteht ebenso wie die des Mars zu ca. 96 % aus Kohlenstoffdioxid und zu ca. 3,5 % aus Stickstoff. Die mittlere Temperatur auf der Venus beträgt 450 °C, auf dem Mars −50 °C. Vergleichen Sie mit den Bedingungen auf der Erde und beurteilen Sie die Lebensbedingungen auf unseren Nachbarplaneten.

b) Stellen Sie Vermutungen an, warum sich die Temperaturen auf Venus und Mars so stark unterscheiden, und suchen Sie nach geeigneten Informationsquellen.

INFO

„Wir leben am Grunde eines Ozeans aus Luft" stellte im Jahr 1640 der italienische Physiker EVANGELISTA TORRICELLI fest. Dieser Ozean aus Luft ist unsere Atmosphäre. Sie ist zwar wesentlich tiefer als das Weltmeer an seiner tiefsten Stelle, aus dem Weltall betrachtet erscheint sie aber nur als eine hauchdünne bläuliche Schicht (B1).

Unsere Atmosphäre ist lebensfreundlich. Aufgrund ihrer Schichtung (B2) und Zusammensetzung (B3) gewährleistet sie an der Erdoberfläche eine mittlere Temperatur von +15 °C und sichtbares Licht, aus dem die schädliche UV-Strahlung der Sonne weitgehend herausgefiltert wurde. Sie enthält u. a. die Gase Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid, die für den Stoffwechsel der irdischen Lebewesen notwendig sind (vgl. S. 124 f).

Die ca. 10 km dicke Lufthülle über dem Erdboden, die **Troposphäre** (B2), stellt ca. 75 % der gesamten Luftmasse unserer Atmosphäre dar. Innerhalb einer Entfernung von 50 km zur Erdoberfläche, d. h. bis einschließlich der **Stratosphäre**, sind bereits 99,9 % enthalten. Die zwischen der Troposphäre und Stratosphäre gelagerte **Tropopause** ist mit ca. −60 °C sehr kalt. Gase können diese kalte Schicht nur sehr schwer durchqueren.

Die drei Hauptbestandteile Stickstoff, Sauerstoff und Argon machen einen Volumenanteil von 99,96 % aus (B3). Der restliche Volumenanteil von 0,04 % beinhaltet Kohlenstoffdioxid, die anderen Edelgase sowie Spurenstoffe natürlicher und anthropogener Herkunft (B4 bis B6). Durch seine Aktivitäten, insbesondere durch die Nutzung fossiler Brenn- und Rohstoffe, zu denen auch Erdöl gehört, beeinflusst der Mensch die Zusammensetzung der Atmosphäre.

	Bestandteil	Formel	Volumenanteil
Hauptbestandteile	Stickstoff	N_2	78,08 %
	Sauerstoff	O_2	20,95 %
	Argon	Ar	0,93 %
Hauptspurenstoffe	Kohlenstoffdioxid	CO_2	0,034 %
	Neon	Ne	0,0018 %
	Helium	He	0,0005 %
	Methan	CH_4	0,00016 %
	Krypton	Kr	0,00011 %
	Wasserstoff	H_2	0,00005 %
	Distickstoffmonooxid	N_2O	0,00003 %
	Kohlenstoffmonooxid	CO	0,00002 %
	Xenon	Xe	0,000009 %
Spurenstoffe	Ozon	O_3	30 bis 50 ppb
	Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	C_xH_y	10 bis 100 ppb
	nitrose Gase	NO_x	0,01 bis 5 ppb
	Schwefeldioxid	SO_2	0,1 bis 2 ppb
	Difluordichlormethan	CF_2Cl_2	230 bis 300 ppt
	Fluortrichlormethan	$CFCl_3$	160 ppt

B3 *Zusammensetzung reiner Luft (in Meereshöhe). (Hinweis: 1 ppb (part per billion, 1 : 10^{-9}) entspricht 1 mg pro kg oder 1 mm^3 pro m^3; 1 ppt (part per trillion, 1 : 10^{-12}) entspricht 1 ng pro kg oder 1 mm^3 pro 1000 m^3.)*

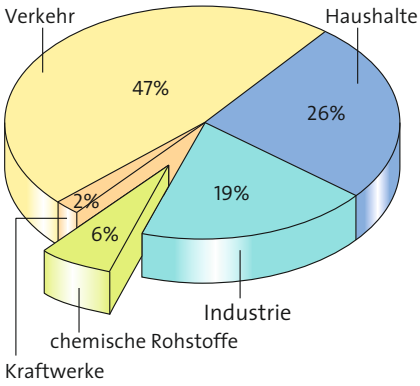
Erdöl und die anthropogenen Emissionen

Die Atmosphäre ist ein offenes System (vgl. S. 59, B3), in das ständig Stoffe in Form von **Emissionen**[1] eintreten und als **Immissionen**[2] wirken (B6). Unter den **anthropogenen**[3] Emissionen nehmen solche, die in Verbindung mit der Nutzung von Erdöl und Erdgas in die Atmosphäre gelangen, einen Spitzenplatz ein. Das liegt daran, dass der weitaus größte Teil der Kohlenwasserstoffe aus dem Erdöl verbrannt wird, obwohl man aus Erdöl auch 90 % aller Erzeugnisse der organischen Synthesechemie herstellt (B4, B5, vgl. auch S. 96, B2). Wenn Erdöl chemisch zu hochwertigen Kunststoffen, Farbstoffen oder gar Medikamenten verarbeitet wird, ist die **Wertschöpfung** viel höher, als wenn Erdölprodukte verbrannt werden.

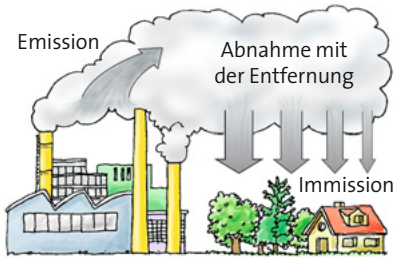
Warum verbrennt man dennoch so viel Erdöl? Aus Erdöl lassen sich hochwertige flüssige Kraftstoffe herstellen, die (noch!) relativ billig sind. Erdöl lässt sich mit vergleichsweise geringem Aufwand fördern, transportieren und zu Kraftstoffen verarbeiten. Daher gewinnt man heute den weitaus größten Teil der Brennstoffe für Verkehrsmittel, für die Industrie und für das Heizen von Häusern aus Erdöl und Erdgas. Die Prognosen darüber, wie lange noch Erdöl und Erdgas als Primärenergieträger den ersten Platz einnehmen werden, sind unterschiedlich. Es ist aber davon auszugehen, dass dies bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts der Fall sein wird.

Im Erdöl und in den anderen fossilen Brennstoffen (Erdgas und Kohle) ist solare Lichtenergie gespeichert. Sie wurde vor Jahrmillionen durch Photosynthese (vgl. S. 125) in chemische Bindungsenergie umgewandelt. Bei der Verbrennung wird die gespeicherte Energie als Wärme verfügbar, der (z. B. in Alkanen) gebundene Kohlenstoff wird bis zu seiner höchsten Oxidationsstufe IV oxidiert und liegt nach der Verbrennung im Kohlenstoffdioxid gebunden vor. Wegen der intensiven Nutzung der fossilen Brennstoffe wird in unserer Zeit mehr Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre ausgestoßen, als photosynthetisch gebunden werden kann. Ein Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehalts der Atmosphäre ist die Folge (vgl. S. 105, B6).

B4 *Anthropogene Emissionsquellen: Industrie, Kraftwerke, Verkehr, Haushalte, Handwerk*



B5 *Verwendung von Erdöl. Ca. 75 % des geförderten Erdöls werden verbrannt.*



B6 *Emissionen und Immissionen.* ***A:*** *Erklären Sie den Zusammenhang.*

Aufgaben

A1 Formulieren Sie die Reaktionsgleichung der Verbrennung von 2,2,4-Trimethylpentan. Bestimmen Sie die Oxidationszahlen der Kohlenstoff-Atome im Edukt und im Produkt.

A2 Berechnen Sie die Ozonkonzentration in mg pro m^3 Luft, die dem Volumenanteil von 185 ppb (Normbedingungen) entspricht.

A3 Erläutern Sie, warum die Wertschöpfung bei der Verarbeitung von Erdöl zu Kunststoffen größer ist als bei der Verarbeitung zu Benzin.

Fachbegriffe

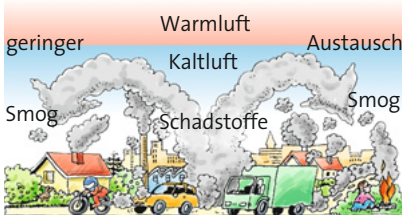
Troposphäre, Tropopause, Stratosphäre, Emission, Immission, anthropogen, Wertschöpfung

[1] von *emittere* (lat.) = aussenden. Als Emission bezeichnet man Stoffe, Geräusche, Strahlen, Wärme usw., die an die Umwelt abgegeben werden.

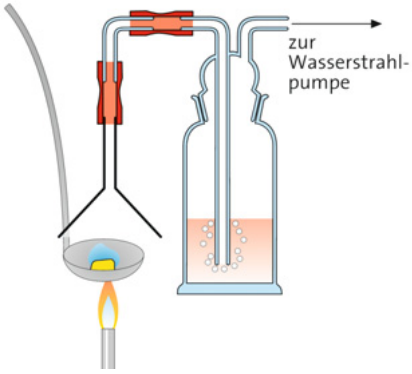
[2] von *immittere* (lat.) = hineinsenken. Als Immissionen bezeichnet man Stoffe, Geräusche, Strahlen, Wärme usw., die auf Lebewesen und Sachgüter einwirken.

[3] von *anthropos* (griech.) = Mensch und von *genea* (griech.) = Abstammung

B1 *Blick auf Mexico-City.* ***A:*** *Erklären Sie, warum die geografische Lage der Stadt die Inversionswetterlage verstärkt.*



B2 *Inversionswetterlage.* ***A:*** *Erklären Sie, warum die Kaltluft nicht aufsteigen kann und warum diese Situation „unnormal" ist.*



B3 *Nachweis von Verbrennungsprodukten (V1 bis V3)*

Schadstoffe in Verbrennungsprodukten

Versuche

V1 *Nachweis von Kohlenstoffdioxid*: Untersuchen Sie die Verbrennungsgase bei der Verbrennung von a) Benzin*, b) Kartuschenbrenner-Gas* oder Erdgas* und c) Dieselöl* auf Kohlenstoffdioxid, indem Sie die Gase durch eine Bariumhydroxid-Lösung* leiten (B3). (*Hinweise*: Benzin (ca. 1 mL) kann im Verbrennungslöffel verbrannt werden. Dieselöl lässt sich nur entzünden, wenn man einen Docht oder etwas Watte in die Flüssigkeit steckt. Die Gase werden in einem entsprechenden Brenner verbrannt.)

V2 *Nachweis von Schwefeldioxid* (**Abzug!**): Geben Sie in einen Verbrennungslöffel eine kleine Portion Schwefel und entzünden Sie sie in der Brennerflamme. Leiten Sie die Verbrennungsgase durch Fuchsin-Lösung (0,01 g Fuchsin* in 100 mL Wasser). Führen Sie anschließend diesen Nachweis auch mit den Stoffgemischen a) bis c) aus V1 und mit zerkleinerter Braunkohle durch. (*Hinweis*: Die Fuchsin-Lösung wird durch Schwefeldioxid entfärbt.)

V3 *Nachweis von Stickstoffoxiden*: Beschicken Sie die Waschflasche aus B3 ca. 4 cm hoch mit SALTZMANN-Lösung* (5 g Sulfanilsäure*, 0,05 g N-(Naphthyl-(1))-ethylendiammoniumchlorid* und 50 mL Eisessig* in 1 L Lösung). Saugen Sie zunächst 1 min lang Luft durch die Lösung. Leiten Sie dann jeweils die Verbrennungsgase der Stoffgemische a) bis c) aus V1 durch dieses Nachweisreagenz. (*Hinweis*: Die SALTZMANN-Lösung wird durch Stickstoffoxide rosa-pink gefärbt.)

Auswertung

a) Fertigen Sie eine Tabelle mit allen Versuchsergebnissen an.

b) Erklären Sie in jedem Einzelfall, wie sich das nachgewiesene Oxid gebildet hat bzw. warum es nicht in den Verbrennungsgasen enthalten war.

c) Formulieren Sie für V1 die Nachweisreaktion. Geben Sie an, wie V1 bei den Verbrennungsgasen von Wasserstoff ausfallen würde und begründen Sie.

d) Begründen Sie, welches Verbrennungsprodukt von Kohlenwasserstoffen man in der Vorrichtung von B3 nicht nachweisen kann.

	Emissionsrate in 10^9 kg pro Jahr	Hauptemissionsquellen	Verhältnis natürlich: anthropogen
Kohlenstoffdioxid CO_2	830 000	Atmung, biologischer Abbau, Verbrennung fossiler Brennstoffe, Rodung	33:1
Kohlenstoffmonooxid CO	3 400	unvollständige Verbrennung, atmosphärische Oxidation von Kohlenwasserstoffen	3,5:1
Methan CH_4	500	Erdgas, Sümpfe, Reisfelder, Tierhaltung, Termiten, Mülldeponien, arktische Tundra	1:1
Schwefelverbindungen (als SO_2 bezeichnet)	400	Verbrennung von Holz, Kohle, Erdölprodukten; Sümpfe, Vulkane	1:1,5
Stickstoffoxide (ohne N_2O, als NO_2 berechnet)	160	Verbrennungsprozesse, Gewitter, atmosphärische Oxidation von NH_3, Stickstoffdüngung	1:2,1

B4 *Globale jährliche Emissionen einiger atmosphärischer Spurenstoffe.* ***A:*** *Vergleichen Sie die Angaben aus der rechten Spalte für Kohlenstoffdioxid und Stickstoffoxide und erklären Sie den Unterschied.*

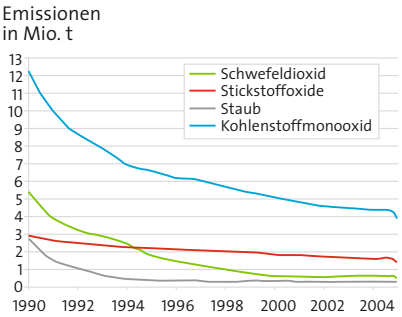
Rauchgasreinigung und Autokatalysator

Bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen bilden sich als Hauptprodukte immer *Wasser* und *Kohlenstoffdioxid* (V1). Darüber hinaus entstehen je nach Zusammensetzung des Brennstoffs und den Bedingungen, unter denen die Verbrennung abläuft, auch geringe Mengen anderer Oxide. *Schwefeldioxid* bildet sich nur, wenn im Brennmaterial Schwefelverbindungen enthalten sind (V2). Dagegen entstehen *Stickstoffoxide* auch dann, wenn das Brennmaterial keine Stickstoffverbindungen enthält. Bei hoher Verbrennungstemperatur kann die endotherme Reaktion von Stickstoff und Sauerstoff zu Stickstoffoxiden stattfinden. Verläuft die Verbrennung in begrenztem Luftvolumen, so fällt hochgiftiges *Kohlenstoffmonooxid* an, bei einem Volumenanteil von 0,1% in der Atemluft wirkt es tödlich. Auch Schwefeldioxid und Stickstoffoxide zählen zu den Luftschadstoffen. Sie reizen und entzünden die Schleimhäute in Augen und Atemwegen. Diese Gase verursachen den **sauren Regen** und **Smog**[1] und schädigen so die Umwelt auf unterschiedliche Art, beispielsweise durch Steinfraß bei Bauten, durch Waldsterben und durch Übersäuerung von Gewässern.

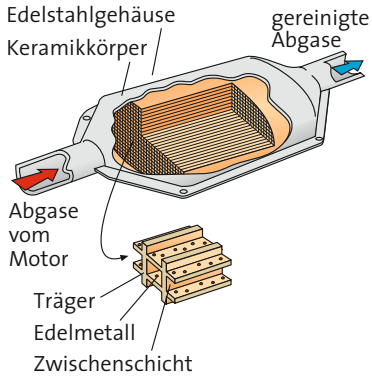
Trotz Zunahme des Verkehrs und der Stromerzeugung gehen seit dem Jahr 1975 die Emissionen an Luftschadstoffen in Deutschland und Westeuropa zurück (B5). Möglich wurde dies, da sowohl die Qualität der Brennstoffe als auch die technischen Anlagen erheblich verbessert wurden. Erdgas und Erdöl werden heute entschwefelt, bevor sie zu Treibstoffen für Autos und Brennstoffen für Kraftwerke weiterverarbeitet werden.

Die modernen **Kraftwerke** verfügen über Anlagen, in denen die **Rauchgase** in mehreren Stufen hintereinander gereinigt werden (B8).

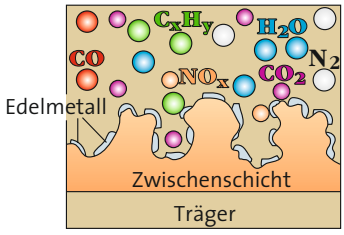
Bei Kraftfahrzeugen mit Ottomotoren gewährleistet der **Abgaskatalysator**, der **Kat**, dass die Schadstoffe (Kohlenstoffmonooxid, Stickstoffoxide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe) in einem Schritt zu ungiftigem Stickstoff, Wasser und Kohlenstoffdioxid umgesetzt werden (B6). Kohlenstoffdioxid verbleibt aber bei diesen Verbrennungstechniken in den Abgasen.



B5 *Emissionsentwicklung von Luftschadstoffen in Deutschland.* ***A:*** *Erklären Sie, worauf diese Entwicklung zurückzuführen ist.*



B6 *Abgaskatalysator. Ein Regelsystem (mit der sog. λ-Sonde) sorgt dafür, dass in die Verbrennungsräume des Motors genau so viel Sauerstoff gelangt, wie für die vollständige Verbrennung der eingesaugten Benzinportionen zu* CO_2 *und* H_2O *notwendig ist: λ-Wert = 1).* ***A:*** *Erklären Sie, warum die Regelung der Luftzufuhr notwendig ist.*



B7 *Nanoskalige Edelmetallcluster aus Platin, Palladium und Rhodium katalysieren Reaktionen.* ***A:*** *Analysieren Sie, ob im Abgaskatalysator Oxidationen oder Reduktionen stattfinden.*

Rauchgasentschwefelung

- mit Kalkstein-Suspension:

$$2\ CaCO_3(s) + 2\ SO_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2\ CaSO_4(s) + 2\ CO_2(g)$$

- mit Natronlauge:

$$4\ NaOH(aq) + 2\ SO_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 2\ Na_2SO_4(aq) + 2\ H_2O(l)$$

Rauchgasentstickung

- mit Ammoniak (SCR[1]):

$$4\ NH_3(g) + 2\ NO_2(g) + O_2(g) \longrightarrow 3\ N_2(g) + 6\ H_2O(l)$$

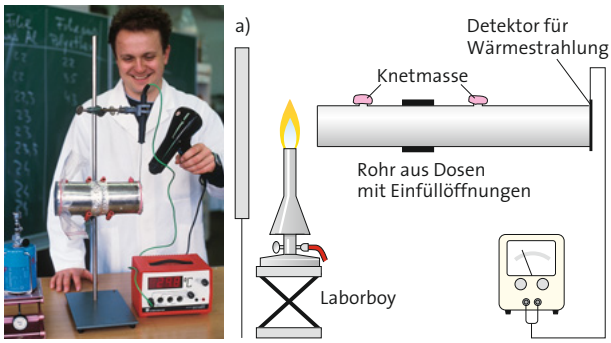
B8 *Bruttoreaktionen bei der Rauchgasentschwefelung und -entstickung in Kraftwerken ([1]SCR: selective catalytic reduction).* ***A:*** *Geben Sie die Oxidationszahlen der Stickstoff-Atome in den Edukten und dem Produkt der Rauchgasentstickung an und vergleichen Sie sie.*

Fachbegriffe

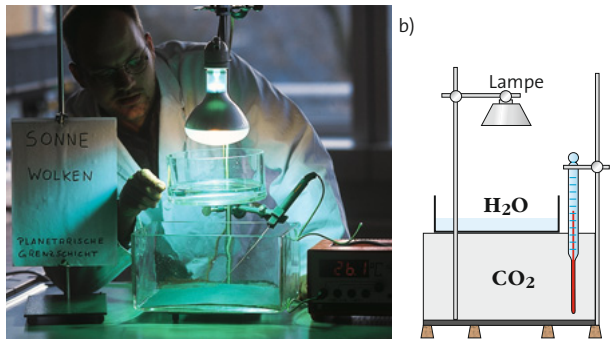
saurer Regen, Smog, Rauchgase, Rauchgasentschwefelung, Rauchgasentstickung, Abgaskatalysator

[1] von *smoke* (engl.) = Rauch und von *fog* (engl.) = Nebel, Dunst

Verbrennungsprodukte schlucken Wärme



B1 *Messvorrichtung zu V1 (Wärmeabsorption)*



B2 *Messvorrichtung zu V2 (Treibhauseffekt)*

Versuch

V1 *Wärmeabsorption:* Bauen Sie eine Messvorrichtung gemäß B1. Das Rohr besteht aus zwei vereinigten Teedosen, bei denen die Böden entfernt wurden. Die Spitze des Temperaturfühlers wird hinter einer schwarzen Pappe mit Tesafilm befestigt und auf der Rückseite mit einer glatten Aluminiumfolie verklebt. Der Bunsenbrenner (oder Kartuschenbrenner) wird bei allen Messungen in der gleichen Entfernung von 10 cm bis 15 cm vor der Dosenöffnung positioniert. Bei jeder Messreihe wird die Temperatur alle 30 s abgelesen, notiert und anschließend grafisch aufgetragen. Jede Messung wird nach 3 min abgebrochen. Vor Beginn der nächsten Messung muss die Apparatur (ggf. mit einem Föhn) gekühlt werden. Führen Sie Messreihen durch, indem Sie an der Dosenöffnung folgende Stoffe befestigen (z. B. mit einem Gummiband): a) eine Polyethenfolie, b) eine Aluminiumfolie, c) einen Flachbeutel aus Polyethen (leer), d) einen Flachbeutel aus Polyethen, innen mit Wasser befeuchtet, und e) Dosenöffnung frei. Wiederholen Sie dann die Messreihe a), nachdem Sie im Rohr die Luft durch Kohlenstoffdioxid ersetzt haben. (*Hinweis:* Nach dem Einfüllen des Kohlenstoffdioxids verschließen Sie die beiden oberen Öffnungen am Rohr mit Knetmasse.)

Auswertung

a) Treffen Sie anhand der Ergebnisse aus V1 begründete Aussagen über die Wärmedurchlässigkeit von Aluminium, Polyethen und Wasser.

b) Begründen Sie mithilfe geeigneter Graphen, die Sie bei V1 ermitteln, warum Kohlenstoffdioxid Wärmestrahlung besser absorbiert als Luft.

Versuch

V2 *Modellversuch zum Treibhauseffekt:* Bauen Sie eine Versuchsvorrichtung gemäß B2. Sie besteht aus einem 300-Watt-Strahler, einer Glaswanne, in der sich ca. 1 cm hoch Wasser befindet, einer zweiten Glaswanne, deren Boden mit schwarzer Pappe ausgelegt ist, und einem Temperaturfühler im Gasraum der unteren Wanne. Nach Einschalten der Lampe wird die Temperatur alle 20 s abgelesen, notiert und anschließend grafisch aufgetragen. Führen Sie Messreihen durch, bei denen die untere Wanne a) mit Luft und b) mit Kohlenstoffdioxid gefüllt ist. Wiederholen Sie dann die Messreihen a) und b), nachdem Sie die schwarze Pappe am Boden der unteren Wanne durch Aluminiumfolie ersetzt haben.

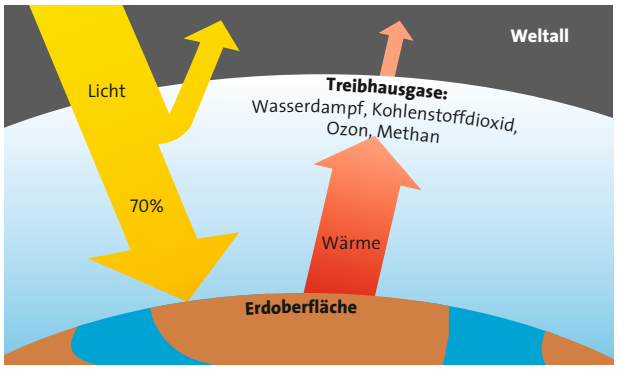
Auswertung

c) Erläutern Sie, welche Funktion das Wasser in der oberen Wanne bzw. die schwarze Pappe am Boden der unteren Wanne bei V2 hat. Stellen Sie Bezüge zur Atmosphäre und zur Erdoberfläche her.

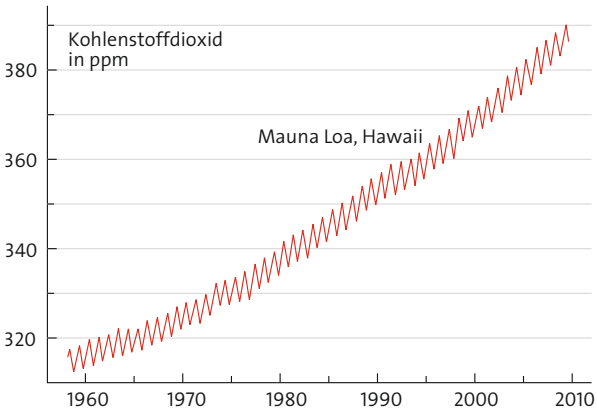
d) Erklären Sie die Unterschiede bei den Graphen der Messergebnisse bei V2 mit schwarzer Pappe und mit Aluminiumfolie.

e) Stellen Sie tabellarisch die Analogien (Ähnlichkeiten) und Unterschiede zwischen dem Modellversuch V2 und dem natürlichen Treibhauseffekt (vgl. S. 105) zusammen.

Der Treibhauseffekt



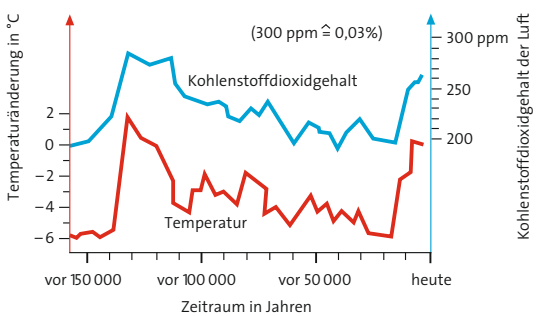
B1 ***Treibhauseffekt**: Ein großer Teil des Sonnenlichts, das auf die Erde trifft, wird absorbiert, in Wärme umgewandelt und als solche zurückgestrahlt. **Treibhausgase** aus der Atmosphäre absorbieren die von der Erde zurückgestrahlte Wärme fast vollständig und halten sie wie in einem Treibhaus fest.*



B3 *Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehalts (ppm = parts per million) in der Atmosphäre auf Mauna Loa, Hawaii, USA. In den Jahreszyklen, die den Schwankungen der roten Kurve entsprechen, liegt das Maximum jeweils im Monat Mai, das Minimum im Oktober.*

Wasser und Kohlenstoffdioxid, die Produkte der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, sind sehr wirksame „Wärmeschlucker", d. h. sie **absorbieren Wärmestrahlung** besser als andere Stoffe (vgl. S. 104, V1). Sie spielen beim **Treibhauseffekt**, der in B1 erklärt wird, eine entscheidende Rolle.

Ohne Treibhauseffekt wäre es in Bodennähe viel kälter (–18 °C) als es tatsächlich ist (+15 °C), menschliches Leben hätte nicht entstehen können. Von den 33 °C, die der Treibhauseffekt ausmacht, werden 20,6 °C durch den Wasserdampf aus der Atmosphäre verursacht und nur 7,2 °C durch das Kohlenstoffdioxid (weitere **Treibhausgase** sind Ozon O_3, Distickstoffmonooxid N_2O und Methan CH_4). Dass der Kohlenstoffdioxidgehalt in der Luft den Treibhauseffekt verstärkt, belegen die Messergebnisse im Modellexperiment V2, S. 104, und die Daten aus B2.



B2 *Über lange Zeiträume hat sich die Temperatur in der gleichen Weise geändert wie der Kohlenstoffdioxidgehalt in der Atmosphäre.*

Der durch den zunehmenden Treibhauseffekt mitverursachte **globale Klimawandel** ist eines der Hauptprobleme, denen die Menschheit im 21. Jahrhundert begegnen muss.

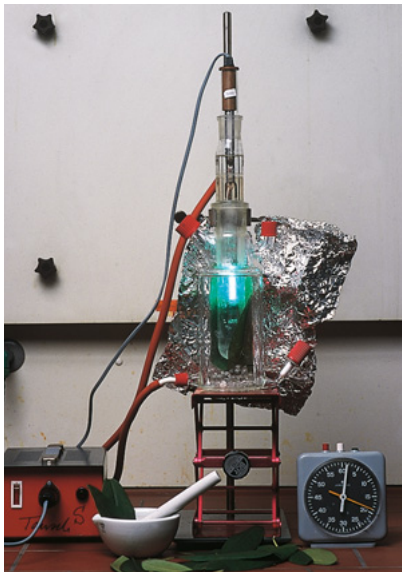
Die im Erdöl enthaltenen Kohlenwasserstoffe sind nicht nur zu schade, um verfeuert zu werden, ihre Verbrennung trägt auch zur Zunahme des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Atmosphäre und damit zur Intensivierung des Treibhauseffekts bei. Die Erforschung und Nutzung alternativer Treibstoffe (z. B. Wasserstoff oder Methanol aus Solarwasserstoff und Kohlenstoffdioxid) und anderer Energieformen (z. B. elektrische Energie aus solarer Lichtenergie) ist für die nächsten Jahrzehnte eine dringliche Herausforderung für Wissenschaft und Industrie. Die begrenzten Erdölvorräte, ein wertvolles Geschenk aus prähistorischen Zeiten, sollten wir nicht in unüberlegter Weise durch den Auspuff jagen, sondern mit dem Wissen und Können der Chemie zu Produkten veredeln, die wir aus anderen Rohstoffen nicht oder nur mit viel mehr Aufwand gewinnen können.

Aufgaben

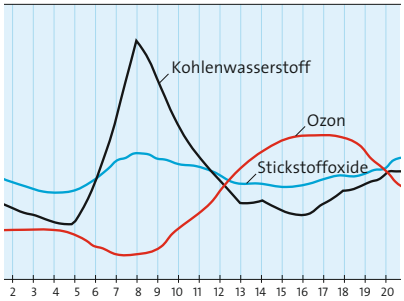
A1 Nennen und erläutern Sie die Folgen eines globalen Temperaturanstiegs.

A2 Beschreiben Sie Möglichkeiten, wie Sie persönlich den Anstieg des Kohlenstoffdioxidgehalts in der Luft bremsen können.

B1 *Smog-Warnung.* ***A:*** *Geben Sie an, wovor bei erhöhten Ozonwerten gewarnt wird.*



B2 *Modellversuch zum Photosmog.* ***A:*** *Vergleichen Sie die in LV3 der Luft zugesetzten Stoffe mit den Angaben aus B3.*



B3 *Relativer Gehalt einiger Schadstoffe in der Luft im Verlauf eines Sommertags.* ***A:*** *Erklären Sie die erhöhten Werte in den Morgenstunden.* ***A:*** *Erläutern Sie die Aussage „Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide sind Vorläufer des bodennahen Ozons“.*

[1] Unter *Chemie 2000+ Online* können Videos zu diesem Versuch aufgerufen werden.

Sonne + Abgase → Ozon

Versuche

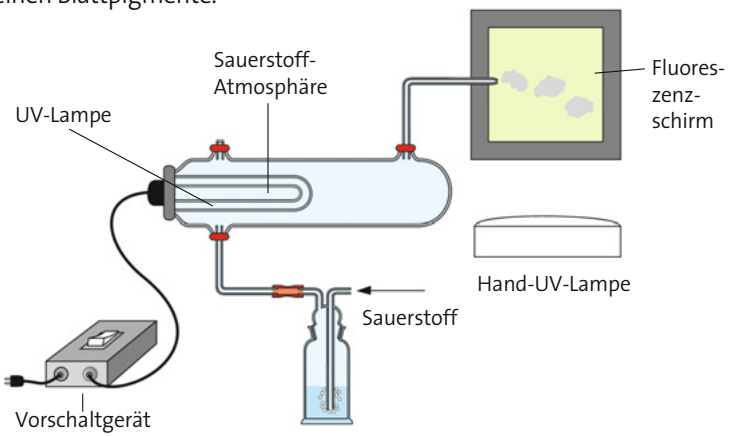
LV1 *Ozon-Herstellung und -Nachweise*[1]: Durch die Versuchsvorrichtung aus B4 wird ca. 30 s lang Sauerstoff geleitet. Dann wird die UV-Lampe* im Reaktionsrohr eingeschaltet und ca. 1 min lang bestrahlt. (*Warnhinweis:* Das Reaktionsrohr muss mit Aluminiumfolie umwickelt werden, da die UV-Strahlung schädlich ist). Das gebildete Ozon* kann auf mehrere Arten nachgewiesen werden:
a) Der Fluoreszenzschirm (B4) wird mit der UV-Handlampe angestrahlt. Dann wird das Gasgemisch aus dem Reaktor pulsweise über den Schirm gedrückt. b) Das Gasgemisch wird in eine mit Schwefelsäure* angesäuerte Kaliumiodid-Stärke-Lösung* eingeleitet. c) Das Gasgemisch wird durch eine Lösung aus einigen Körnchen Safranin T* und einem Plätzchen Natriumhydroxid* in 10 mL 2-Propanol* geleitet. d) Nach einer erneuten 1-minütigen Bestrahlung mit der UV-Lampe im Rohr wird das Gasgemisch auf einen stramm aufgeblasenen Luftballon geleitet.

V2 *Ozon-Nachweis beim Fotokopierer*: Saugen Sie aus der Nähe der Lampe eines Fotokopierers mit dem Kolbenprober 100 mL Luft ein und drücken Sie sie langsam durch eine mit Schwefelsäure* angesäuerte Kaliumiodid*-Stärke-Lösung. Führen Sie eine Vergleichsprobe mit normaler Luft durch.

LV3 *Modellversuch zum Photosmog*: In einem wassergekühlten Tauchlampenreaktor mit einer 150-Watt-Quecksilberlampe* (B2) bestrahlt man grüne Blätter 20 min lang in Luft, die mit etwas Stickstoffdioxid* und Benzindampf* verunreinigt ist. Danach werden die Blattpigmente mit Aceton* extrahiert und auf einer kieselgelbeschichteten DC-Folie chromatographiert (Laufmittel z. B. Petrolether* : Benzin* : 2-Propanol* im Volumenverhältnis 25 : 25 : 5). Parallel wird Extrakt aus unbestrahlten Blättern chromatographiert.

Auswertung

a) Beschreiben Sie, wie man in LV1 erkennt, dass Ozon UV-Licht absorbiert.
b) Begründen Sie mithilfe der Beobachtungen in LV1, ob Sauerstoff O_2 oder Ozon O_3 reaktiver ist.
c) Geben Sie die Bedingungen zur Ozon-Bildung beim Fotokopierer an.
d) Beschreiben Sie die Auswirkung des in LV3 erzeugten Photosmogs auf die einzelnen Blattpigmente.

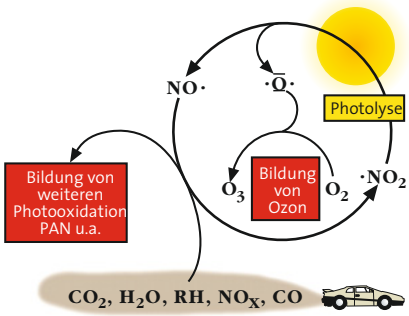


B4 *Versuchsvorrichtung zu LV1*

Photosmog – Stoffkreisläufe in der Troposphäre

Die Menschen in Athen, Los Angeles, Mexico-City (vgl. S. 102, B1) und anderen Großstädten werden aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und des heißen, sonnigen Klimas häufig durch **Photosmog** oder **Sommersmog** geplagt. In abgeschwächter Form, aber immer häufiger tritt Photosmog auch in Deutschland auf. Bei dieser Smogart entstehen in der mit Abgasen verunreinigten Luft durch die Lichteinwirkung der Sonne giftige Stoffe, deren wichtigster Vertreter das Ozon O_3 ist (B5). Dabei handelt es sich um eine besonders aggressive Form des Elements Sauerstoff. Ozon oxidiert Iodid-Ionen zu elementarem Iod, reagiert mit dem Farbstoff Safranin T unter Leuchterscheinung (Chemolumineszenz) und bringt einen Luftballon zum Platzen (LV1, V2). Die Polyisopren-Moleküle aus dem Gummi (vgl. S. 94, 95) enthalten Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen, die durch Ozon-Moleküle „geknackt" werden (Ozonolyse). Photosmog schädigt Pflanzen u. a. durch Zerstörung der Blattpigmente (LV3) und kann bei Menschen zu Augenreizungen, Kopfschmerzen und Atembeschwerden führen. Bei zu hohem Ozongehalt in der Luft wird Smogalarm ausgelöst (B6).

Zur Ozonbildung aus reinem Sauerstoff ist sehr energiereiches Licht notwendig (vgl. S. 108, B1). In der Troposphäre ist diese Bedingung wegen der Ozonschicht in der Stratosphäre (vgl. S. 100, B2) nicht gegeben. Das bodennahe Ozon bildet sich, indem Sauerstoff-Moleküle mit Sauerstoff-Atomen, die in einem Katalysezyklus erzeugt werden (B5), zu Ozon-Molekülen reagieren: Das braune, durch sichtbares Licht spaltbare Stickstoffdioxid NO_2 katalysiert Reaktionszyklen (**Katalysezyklen**), bei denen Sauerstoff, Kohlenwasserstoffe **RH** und Wasser zu Ozon und anderen aggressiven Oxidationsmitteln (**Photooxidantien**) umgesetzt werden. Stickstoffdioxid befindet sich dabei in einem **Stoffkreislauf** (B5, B7). Obwohl die Reaktionen in der Atmosphäre sehr komplex und z. T. noch nicht genau bekannt sind, steht fest, dass die Abgase aus Motoren, in denen Erdölprodukte verbrannt werden, die Bildung von Photosmog fördern. Messergebnisse beweisen, dass Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide die Vorläufer von Ozon an heißen Sommertagen sind (B3).



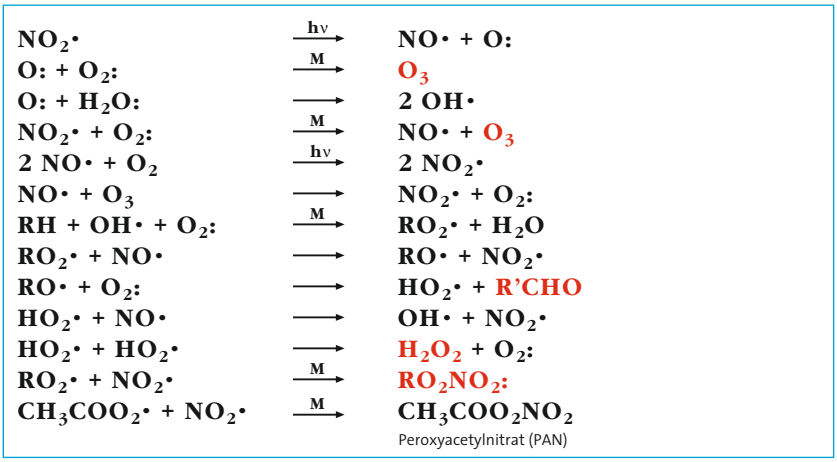
B5 *Katalysezyklus: Stickstoffdioxid wird durch Sonnenlicht zu Stickstoffmonooxid und atomarem Sauerstoff gespalten, der mit molekularem Sauerstoff zu Ozon reagiert. Unter Beteiligung von Kohlenwasserstoffen wird Stickstoffdioxid zurückgebildet und kann einen neuen Zyklus starten.*

Ozonwerte in µg/m³ Luft	Maßnahmen bzw. gesundheitliche Folgen bei längerer Einwirkung
40	Geruchsschwelle für Ozon
120	Reizungen der Atemwege, eingeschränkte Leistungsfähigkeit bei Risikogruppen (Kinder, Alte, Allergiker, Asthmatiker, Sportler)
160	Atemwegsentzündungen bei körperlicher Anstrengung
180	Bevölkerung wird informiert
240	Fahrverbot für Autos ohne Katalysator; Verschlechterung der Lungenfunktion
ab 400	bleibende organische Veränderungen der Atemwege

B6 *Sommersmog-Alarmstufen*

Fachbegriffe

Photosmog (Sommersmog), Katalysezyklus, Stoffkreislauf, Photooxidantien

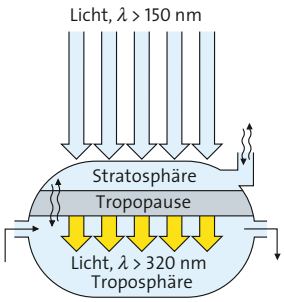


B7 *Einige Reaktionen aus dem Photoreaktor Troposphäre.* **M** *bezeichnet jeweils ein Teilchen, das am Stoßprozess beteiligt ist und dabei Energie aufnimmt, ohne chemisch verändert zu werden. Die Photooxidantien sind rot gedruckt.*

3 mm Ozon – der Filter für das Leben

Die Atmosphäre – ein Photoreaktor aus zwei Kammern

Die Erdatmosphäre gleicht einem riesigen Photoreaktor, der in zwei Kammern gegliedert werden kann: in die Troposphäre und die Stratosphäre (B1). Dazwischen liegt die um ca. 50 °C kältere Tropopause (vgl. S. 100, B2), durch die der Stoffaustausch zwischen der unteren und oberen Kammer stark gehemmt ist.



$$O_2 \xrightarrow[h\nu_1]{\lambda < 240\ nm} O + O$$

$$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$$

$$O_3 + O \longrightarrow 2\ O_2$$

$$O_3 \xrightarrow[h\nu_2]{\lambda < 300\ nm} O_2 + O$$

$$3\ O_2 \underset{+h\nu_2}{\overset{+h\nu_1;\,-\Delta}{\rightleftharpoons}} 2\ O_3$$

B1 *Zweikammer-Photoreaktor-Modell der Atmosphäre und Chapman-Zyklus des Ozon-Gleichgewichts in der Stratosphäre (M: inertes Molekül; Δ: Wärme; hν: Licht).* ***A:*** *Erläutern Sie, warum die Wellenlängen des Lichts in den beiden Kammern unterschiedlich sind.*

Das vertikale Ozon-Profil (B4) weist die größten Ozonkonzentrationen in Höhen zwischen 20 und 30 km Höhe auf. Unter Normbedingungen (1013 hPa; 0 °C) entspricht die in der Atmosphäre enthaltene Menge an Ozon einer 3 mm dicken Schicht um die Erde aus reinem Ozon. Die Funktion von Ozon in der Stratosphäre als Filter für die sehr energiereiche UV-Strahlung kann in LV1, S. 106, nachgewiesen werden. Durch diesen „Filter aus Ozon" wird die Biosphäre vor einer zu hohen Intensität an schädlicher UV-Strahlung geschützt.

In der Stratosphäre werden Sauerstoff-Moleküle durch energiereiches, sehr kurzwelliges Licht ($\lambda < 240$ nm) in Sauerstoff-Atome gespalten, die wiederum mit Sauerstoff-Molekülen zu Ozon-Molekülen reagieren (B1). Diese absorbieren ebenfalls UV-Licht im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 300 nm. Zwischen molekularem Sauerstoff O_2 und Ozon O_3 stellt sich ein **photostationäres Gleichgewicht**, d. h. ein durch Lichteinstrahlung erzeugtes und aufrecht gehaltenes Gleichgewicht ein[1]. Dabei wird kurzwelliges UV-Licht teils in längerwelliges Licht, teils in Wärme umgewandelt.

Der Chlor-Katalyse-Zyklus – eine Ozon-Senke in der Stratosphäre

Seit im Jahr 1984 über der Antarktis eine Abnahme des stratosphärischen Ozons von bis zu 40 % gemessen wurde, gibt es das Schlagwort **Ozonloch**. Damit bezeichnet man die starke Ausdünnung der Ozonschicht über einer geographischen Region. Das Ozonloch besteht seit dem Jahr 1984 regelmäßig für einige Wochen während des polaren Frühlings rund um den Südpol auf (B3). Auch über Teilen der nördlichen Halbkugel treten seit dem Jahr 1992 in den Monaten Februar und März Ozonlöcher auf.

Es gilt als gesichert, dass die **FCKW**, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe, zur Ausbildung des Ozonlochs beitragen. Sie gelangen als anthropogene Emissionen in die Atmosphäre. FCKW wie z.B. Dichlordifluormethan sind an Reaktionszyklen beteiligt, die erst durch das UV-Licht in der Stratosphäre ausgelöst werden und zum Ozon-Abbau führen (B2). Solche Reaktionszyklen bezeichnet man als **Ozon-Senken** (Gegenteil: Ozon-Quellen, vgl. S. 107).

$$F_2ClC-Cl \xrightarrow[h\nu]{\lambda < 340\ nm} F_2ClC\cdot + Cl\cdot$$

$$Cl\cdot + O_3 \longrightarrow ClO\cdot + O_2$$

$$ClO\cdot + O \longrightarrow Cl\cdot + O_2$$

$$ClO\cdot + NO_2\cdot \underset{\text{Frühjahr}}{\overset{\text{Winter}}{\rightleftharpoons}} ClNO_3$$

B2 *Der Chlor-Katalyse-Zyklus, eine stratosphärische Ozon-Senke.* ***A:*** *Skizzieren Sie den Zyklus wie in B5, S. 107.* ***A:*** *Erläutern Sie, warum und wie diese Reaktionen den Chapman-Zyklus (B1) beeinflussen.*

Bei vermindertem Ozongehalt in der Stratosphäre gelangt mehr UV-Strahlung (UV-A: 320 nm < λ < 380 nm; UV-B: 280 nm < λ < 320 nm) auf die Erdoberfläche. Besonders die „härtere" UV-B Strahlung schädigt Pflanzen, Tiere und Menschen nachhaltig. Sie zerstört die Blattpigmente, führt zur Erblindung von Tieren und verursacht Hautkrebs.

[1] Die Schritte des Chapman-Zyklus sind in einer Animation unter *Chemie 2000+ Online* im Modell dargestellt.

3 mm Ozon – der Filter für das Leben

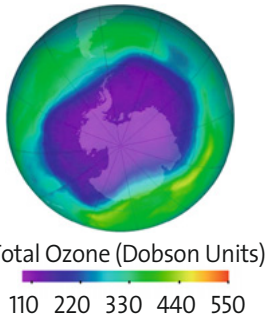
Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW – eine Stoffgruppe mit Nachwirkung

Dass die Verbrennung von Benzin und Diesel, die aus Erdöl gewonnen werden, Schadstoffe erzeugt und den Treibhauseffekt sowie den Photosmog mitverursacht, leuchtet ein (vgl. S. 102 bis 107). Der Zusammenhang zwischen stratosphärischem Ozon und Ozonloch auf der einen und Erdöl und Produkten aus Erdöl auf der anderen Seite ist weniger offensichtlich.

Die „Ozonkiller" FCKW sind Produkte der Petrochemie. Diese Stoffe sind vorwiegend Derivate (Abkömmlinge) des Methans und des Ethans, bei denen alle Wasserstoff-Atome aus den Molekülen durch Fluor- und Chlor-Atome ersetzt sind. FCKW haben als Gase niedrige Siedetemperaturen, sind ungiftig, unbrennbar, wasserunlöslich und chemisch äußerst stabil. Sie erschienen ideal für einige Anwendungen und wurden einige Jahrzehnte (etwa in den Jahren von 1950 bis 1990) in großen Mengen als Treibgase bei Sprays und bei der Herstellung von geschäumten Kunststoffen sowie als Kälteflüssigkeiten in Kühlschränken eingesetzt. Die in die Atmosphäre entweichenden FCKW werden aufgrund ihrer Reaktionsträgheit in der Troposphäre nicht abgebaut und gelangen wegen ihrer großen Dichte nur langsam, in etwa 10 Jahren nach ihrer Freisetzung, in die Stratosphäre. Erst hier sind Reaktionsbedingungen für ihren Abbau vorhanden, nämlich UV-Licht mit Wellenlängen $\lambda < 340$ nm (vgl. Chlor-Katalyse-Zyklus in B2). Seit die Wirkung der FCKW beim stratosphärischen Ozon-Abbau erkannt ist, wurden ihre Produktion und ihr Einsatz zunächst in den westlichen und dann nach und nach in allen Ländern eingestellt. Ersatzstoffe wurden entwickelt, geprüft und eingeführt.

Am Beispiel der FCKW wird deutlich, dass technischer Fortschritt immer auch Risiken in sich birgt, die nicht sofort erkannt werden können. Um die Risiken bei neuen technischen Entwicklungen möglichst gering zu halten, müssen wir aus den Erfahrungen und dem Wissen unserer Vorgänger lernen.

Die Ozonverteilung über der Erde



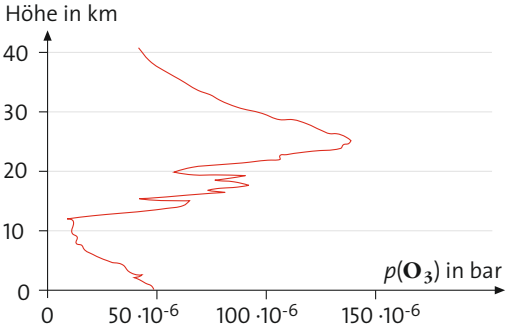
B3 *Aus vielen Messdaten wird für jeden Tag ein solches Diagramm der Ozonkonzentration in der südlichen und in der nördlichen Hemisphäre erstellt. 1 DU (Dobson Unit) entspricht einer Ozonschichtdicke von 0,01 mm, gemessen bei T = 0 °C. Das „Rekordozonloch" wurde über dem Südpol am 24. September 2006 registriert.*

Aufgaben

A1 Informieren Sie sich in *Chemie 2000+ Online* über die aktuelle Ozonkonzentration in der südlichen und in der nördlichen Hemisphäre. Vergleichen Sie die aktuellen Werte mit denen aus B3.

A2 Erläutern Sie, warum das „Ozonloch" immer in den Monaten September und Oktober über dem Südpol auftritt und warum die Ozonkonzentration über der Arktis in den Monaten Februar und März Tiefstwerte erreicht.

A3 Begründen Sie, warum das in Bodennähe gebildete Ozon nicht nach dem Chapman-Zyklus gebildet werden kann. Geben Sie an, welche Bedingungen zum Ozonsmog in der Troposphäre führen (*Hinweis*: vgl. S. 107).



B4 *Vertikales Ozon-Profil*