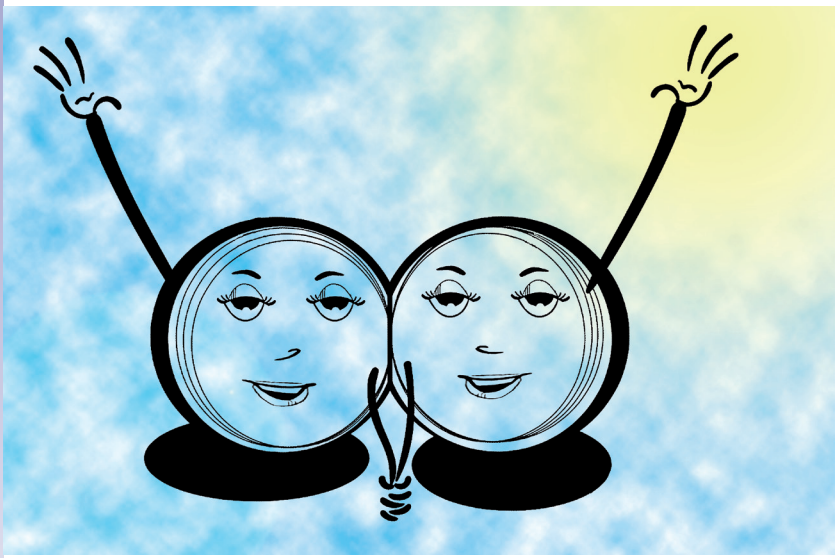
Hallo, wir heißen Sauerstoff

Ein Gespräch mit Erläuterungen und Experimenten



Veronika R. Meyer

Rubikon

Hallo, wir heißen Sauerstoff

Ein Gespräch mit Erläuterungen und Experimenten

Veronika R. Meyer

Veronika R. Meyer

„Hallo, wir heißen Sauerstoff“ – oder: Wie Sauerstoff die Welt sieht

Ein erdachtes Gespräch mit Sauerstoff mit Erläuterungen und Experimenten

1. Auflage März 2020
Agentur und Verlag Rubikon Rolf Kickuth, Gaiberg 2020

Creative Commons-Lizenz 4.0 int. BY-NC-ND (Namensnennung, nicht kommerziell, keine Bearbeitung)

ISBN 978-3-9810449-5-9 Agentur & Verlag Rubikon Rolf Kickuth,
Bammentaler Straße 6-8, 69251 Gaiberg, Deutschland

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbiografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Intenet über http://dnb.ddb.de abrufbar.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Die Grafiken stammen – sofern nicht anders angegeben – von Raymond Blavatt, San Diego (USA). Das Buch enthält insgesamt 28 Abbildungen.

Die gewissenhafte Vorbereitung und Durchführung der dargestellten Experimente obliegt den jeweiligen zertifizierten Ausbildenden; Autorin, Herausgeber und Verlag übernehmen keinerlei Haftung.

Redaktion, Layout, Satz, Umschlaggestaltung: Agentur und Verlag Rubikon Rolf Kickuth, Gaiberg

Vorwort

In diesem kleinen Buch geht es um das häufigste Element auf unserer Erde, um Sauerstoff. Geschrieben ist es in populärer und amüsanter, aber wissenschaftlich korrekter Form. Der Witz des Textes ist, dass es sich dabei um eine Kommunikation mit dem Sauerstoff handelt, er also selbst zu Wort kommt. Jedes Gesprächsteil, jedes Thema wird dann allerdings noch um einen erläuternden Text erweitert, um die Sache genauer darzustellen.

Auf den ersten Blick könnte man meinen, es sei ein Kinderbuch, aber dem ist nicht so. Denn ich denke, dass auch Erwachsene, mit oder ohne wissenschaftliche Bildung, gerne etwas Amüsantes lesen. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Sache dann nicht mehr amüsant ist, wenn es um Luftverschmutzung und Klimawandel geht.

Auch das Aufzeigen der dafür zugrunde liegenden Vorgänge war Anliegen zum Entstehen dieses Buchs. Nur wer grundlegende Mechanismen kennt, kann zu den damit verbundenen Vorgängen und Problemen fundierte Beiträge leisten.

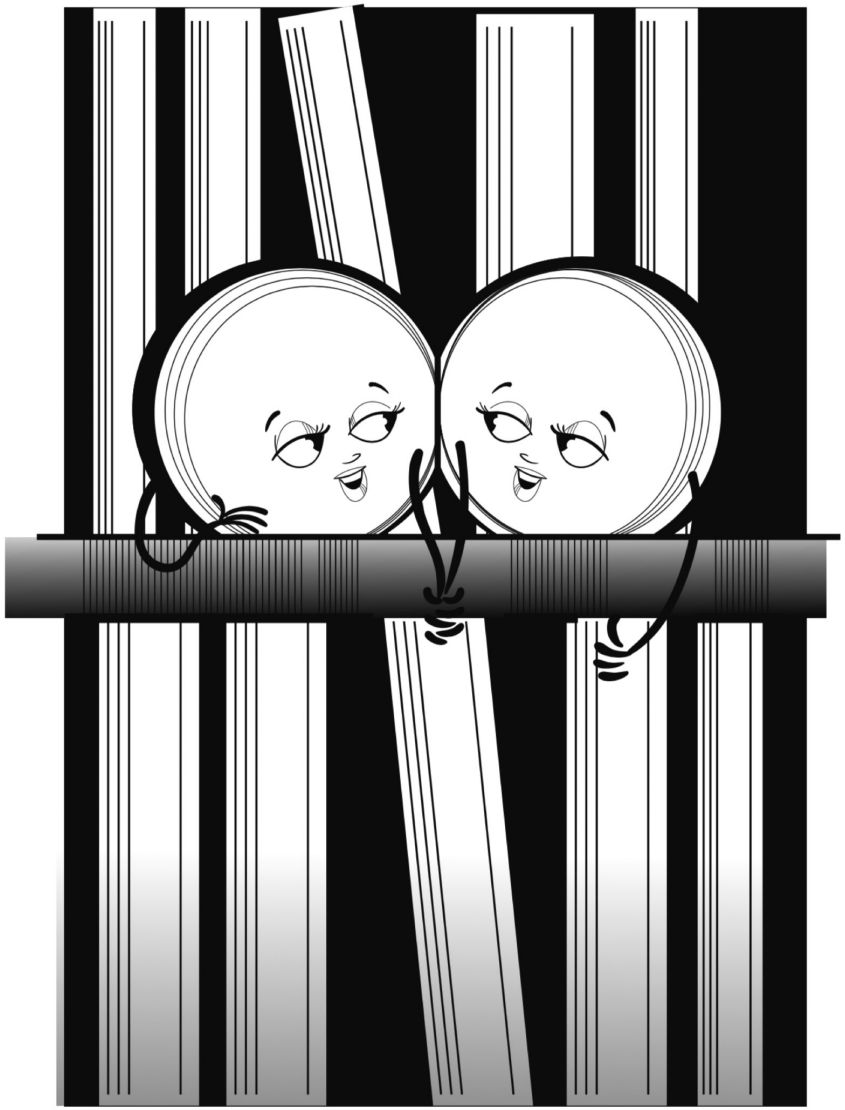
Ich danke für die Unterstützung bei der Erstellung des Buchs Rolf Kickuth, der seit langem verlegerisch im Bereich Chemie, Biologie und Umwelt tätig ist. Ebenso freut es mich, dass der Grafiker Raymond Blavatt es geschafft hat, meine Ideen in eine attraktive Bebilderung umzusetzen.

St. Gallen, im März 2020

Veronika Meyer

Inhaltsverzeichnis

Besuch aus der Luft 7
Das Sauerstoffmolekül 9
Luft 12
Der Sauerstofftransport im Körper 15
Feuer 19
Das Feuer im Körper 22
Ist Sauerstoff giftig? 27
Rost 30
Aluminium, Gold und andere Metalle 35
Kohlendioxid einfangen und Sauerstoff erzeugen 39
Sauerstoff uralt 44
Eine Sauerstoff-Erde 47
Die frühe Atmosphäre 51
Sauerstoff in der Atmosphäre! 53
Die heutige Atmosphäre 57
Die Ozonschicht 61
Unerwünschtes Ozon und andere Luftschadstoffe 67
Sauerstoff und Stickstoff – ein Ringelreihen im Boden 72
Kohlendioxid 75
Die wärmende Atmosphäre 77
Rückkopplungen 82
Was soll ich tun? 84
Die Zukunft der Atmosphäre, der Erde und der Sauerstoffs 87
Ein Kribbeln im kleinen Zeh 90
Verzeichnis der Experimente 92
Stichwortverzeichnis 93



Besuch aus der Luft

Gewöhnlicher hätte der Tag nicht sein können. Blauer Himmel, ein feines Lüftchen, Straßenlärm, und ich saß in meinem Arbeitszimmer, Papiere ordnend. Eine Rechnung, die schon längst hätte bezahlt werden sollen, kam zum Vorschein, aber mein Lieblingsstift war verlegt, überall lagen ausgedruckt Mails und Zeitungsausschnitte, die am passenden Ort abgelegt oder weggeworfen werden mussten. So arbeitet man sich durchs Leben.

„Hallo“, sagte eine quicklebendige Stimme vom Bücherbord über dem Schreibtisch her – nein, es waren zwei Stimmen, ein Duett. Ich hob den Kopf und verlor beinahe meinen Verstand beim Anblick des außergewöhnlichsten Gegenstands, der mir meiner Lebtag lang je vorgekommen war. Oder war es ein Lebewesen? Immerhin war ich soeben begrüßt worden. Zweifellos hätte selbst eine Blattlaus auf der Zimmerpflanze meine Verwirrung bemerkt, die sich steigerte, als ich nochmals angesprochen wurde: „Hallo, wir heißen Sauerstoff!“

Da saß eine Art kleine, transparente Doppelkugel vor mir, ähnlich wie zwei gleich große Seifenblasen, die sich berühren und deshalb eine gemeinsame Fläche teilen. Die Erscheinung ließ sich kaum in Worte fassen, aber ich konnte mich des Eindrucks nicht erwehren, dass jede der beiden Kugeln vielleicht ein Gesicht besaß und auf jeden Fall zwei Arme. Die zwei hielten Händchen, und das erst noch doppelt! Schien eine innige Beziehung zu sein. Während ich beinahe den Verstand verlor, plapperten die beiden vergnügt auf mich ein: „Wir sind wichtig für dich! Ohne unsereins könntest du nicht leben. Wir sind die Sauerstoffs, wir sind unendlich viele, und du atmest uns ein. Wir liefern deinem Körper Energie!“

Hatte ich mir das je überlegt? Mir schwante, dass mir die beiden Kleinen einiges erzählen könnten. Als ich wieder zum Bücherbord blickte waren sie verschwunden.

Sauerstoff ist derjenige Bestandteil der Luft, der für uns lebenswichtig ist. Mit jedem Atemzug bringen wir ihn in unsere Lungen, wo er ins Blut übertritt. Das Blut transportiert ihn zu jeder Zelle des Körpers. Die vom Organismus benötigte Energie entsteht dort aus der „Verbrennung“ der Nahrungsbestandteile Kohlenhydrate, Fette

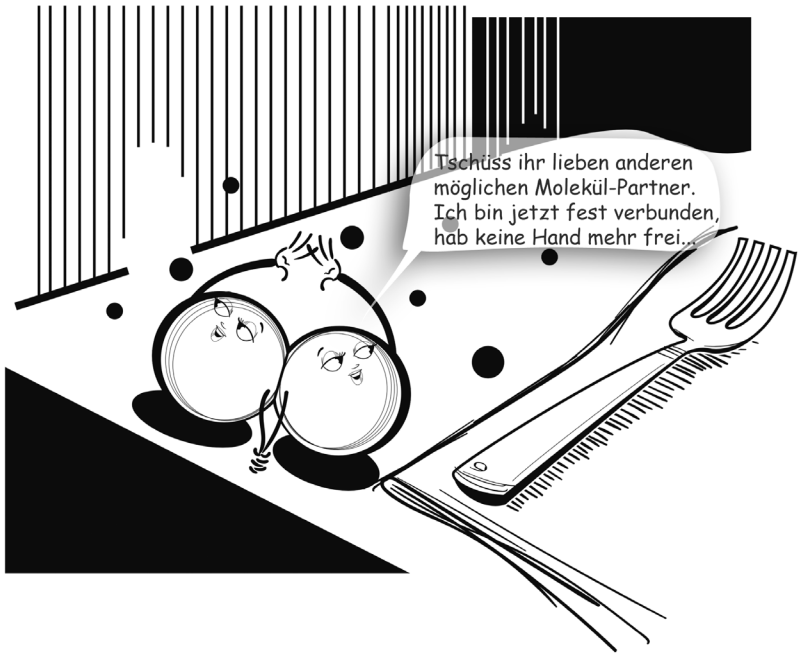
und Proteine mit Sauerstoff. Dieser Prozess läuft allerdings nicht so heftig wie beim Verbrennen von Holz in einem Feuer, sondern von uns unbemerkt und bei Körpertemperatur. Die Sauerstoffs befinden sich im Mittelpunkt des Geschehens und hätten einiges zu erzählen wenn sie könnten...

Tatsächlich waren und sind viel Denkarbeit und raffinierte Experimente nötig, um diese Prozesse aufzuklären und zu verstehen. Den Sauerstoff in der Luft sieht man nicht einfach so, und was er im Körper anstellt sieht man noch viel weniger. In der Luft existiert er als winzige Doppelkugel aus zwei Sauerstoffatomen; dieses Gebilde nennt man Molekül (wie alle Gebilde, die aus mehreren Atomen bestehen). Weil ein Sauerstoffatom in der Chemie mit dem Buchstaben O bezeichnet wird symbolisiert die Abkürzung O_2 ein Sauerstoffmolekül. Es besitzt eine Länge von etwa 0,3 Nanometern. Das ist unvorstellbar klein, nämlich 0,0000003 Millimeter oder ein Drittel von einem Millionstel Millimeter. Und weil die Sauerstoffmoleküle nicht farbig sind, sehen wir sie auch dann nicht, wenn sie als Ansammlung von Milliarden mal Milliarden Exemplaren vor unseren Augen herumtanzen.

Dennoch sei die Freiheit erlaubt, sich die Abenteuer der Sauerstoffs von ihnen selbst erzählen zu lassen.

Das Sauerstoffmolekül

Tags darauf, ich hatte soeben die Post aus dem Briefkasten geholt und betrat meine Wohnung, saßen die zwei wieder da, diesmal auf dem Küchentisch. Nun traute ich mich, meinerseits mit „Hallo“ zu grüßen und zu fragen: „Warum könnt ihr behaupten, Sauerstoff zu sein?“ Die Antwort kam wie aus der Kanone geschossen: „Weil jeder von uns im Kern acht Protonen besitzt und in der Hülle acht Elektronen“, sagte der eine, und der andere ergänzte: „Dazu haben wir auch noch acht Neutronen im Kern, aber es sind die acht Protonen, welche uns zu Sauerstoff machen.“ Die beiden schienen diese Tatsache überaus lustig zu finden, sie kicherten und hüpften auf dem Tisch herum, doch gleichzeitig spürte ich in ihren Antworten eine große Ernsthaftigkeit.



Ich fragte weiter: „Warum haltet ihr ständig Händchen? Seid ihr unzertrennlich?“

„Das kommt von den acht Elektronen. Zwei davon halten sich eher im Innern auf, aber die übrigen sechs sind extravertiert, halten sich eher außen auf und interessieren sich für ihre Umgebung. Sie wären gerne zu acht, weil da außen genügend Platz für acht ist. Deshalb trachtet jedes alleinstehende Sauerstoffatom angestrengt danach, zwei weitere Elektronen zu erhaschen. Es streckt sozusagen zwei Arme aus. Wir zwei befanden uns neulich wieder in dieser unangenehmen Situation, aber es dauerte nicht lange, bis wir uns gefunden hatten. Und jetzt sind wir zufrieden, denn wir sind so nahe zueinander gerückt, dass die Elektronen jedes einzelnen auch dem anderen gehören. Die leeren Plätze sind gefüllt, so lange wir uns an beiden Händen halten.“

Das war ein starkes Stück und nur schwer zu verstehen. Mit rauchendem Kopf fragte ich: „Und nun hält ihr auf ewig zusammen?“ – „Das kommt darauf an. Manchmal wird uns Energie zugeführt, oder die Reaktionspartner sind unwiderstehlich, oder ein Enzym umgarnt uns, so dass wir uns wieder trennen“, kicherte es vom Küchentisch. Und weg waren die Sauerstoffs. Ihre Gesellschaft war interessant, zugleich aber auch anstrengend. Jedenfalls genügte mir die eben erhaltene Lektion vorerst völlig.

Atome bestehen aus einem Kern und einer Hülle. Im Kern befinden sich positiv geladene Teilchen, die Protonen, und neutrale Teilchen, die – logisch, nicht wahr? – Neutronen. Beide Sorten verleihen dem Atom den allergrößten Teil seiner Masse, weil diese Teilchen relativ schwer sind. In der Hülle befinden sich die sehr leichten, negativ geladenen Elektronen. Zu welcher „Sorte“, das heißt zu welchem Element ein Atom gehört, wird durch die Anzahl Protonen bestimmt. Wasserstoffatome besitzen bloß ein einziges, Sauerstoffatome deren acht und Goldatome, als Beispiel, 79. Damit ein Atom elektrisch neutral ist, muss es eine gleich große Anzahl von Elektronen wie Protonen besitzen.

Die Elektronenhülle ist strukturiert aufgebaut, man spricht von „Schalen“. In der ersten haben zwei Elektronen Platz, in der zweiten acht, in der dritten 18 und so weiter. Ein neutrales Sauerstoffatom

besitzt wegen seinen acht Protonen im Kern ebenfalls acht Elektronen in der Hülle, davon zwei in der ersten Schale und sechs in der zweiten, wo doch aber Platz für acht wäre. Verbinden sich zwei Sauerstoffatome zu einem Molekül, so füllen sie gegenseitig diese leeren Plätze mit ihren Elektronen. Diese gehören folglich zu beiden Atomen, was auch erklärt, warum die Atomkerne etwas zusammengerückt sind und das Molekül wie eine Doppel-Seifenblase aussieht.

In der Folge kamen jedoch die Sauerstoffs kaum je wieder auf ihren inneren Aufbau zu sprechen, und wir können ihn eigentlich vergessen. Wichtig ist nur, dass jedes einzelne Sauerstoffatom zwei freie Plätze in seiner Elektronenhülle hat, die es ausfüllen möchte. Man sagt, Sauerstoff ist „zweiwertig“, und die Bindung im Sauerstoffmolekül O_2 besteht aus zwei Elektronenpaaren, was man mit der (selten verwendeten) Schreibweise O=O veranschaulicht. Auch in anderen Molekülen stehen jedem Sauerstoffatom zwei Bindungen zur Verfügung.

Luft

Es dauerte einige Zeit bis die Sauerstoffs erneut auftauchten. Eines Abends machten sie es sich wieder auf dem Bücherbord bequem. Ich war entzückt, beschäftigte mich doch die nächste Frage: „Ihr, also ihr und eure Kumpels, seid unendlich viele, behauptet ihr, und ich würde euch einatmen. Seid ihr Luft?“

Das war eine starke Frage. Die Sauerstoffs hüpften und wirbelten aufgeregt herum. „Erst mal: Luft ist nicht nichts! Und zweitens: Wir sind in der Minderheit. Es wimmelt in der Luft nur so von Stickstoffs, von uns hat es viel weniger, und dann lümmeln noch ein paar andere Kerle herum. Aber wir sind am wichtigsten für dich!“

„Was ist denn der Unterschied zwischen den Stickstoffs und euch?“

„Die sehen fast gleich aus, sind auch immer zu zweit. Sie sind ein bisschen leichter als wir, aber trotzdem ein bisschen größer. Aber du kannst sie nicht zur Energiegewinnung benützen. Überhaupt sind sie ziemlich langweilig, viel weniger extravertiert als wir“, sagte der eine, und der andere bekräftigte: „Ich möchte nicht Stickstoff sein, da ist nur selten was los.“

„Und wer sind die anderen Kerle, die auch noch in der Luft herumlümmeln?“

„Kohlendioxid, Wasser, Edelgase“, sagte Sauerstoff Eins. „Zum Gähnen“, sagte Sauerstoff Zwei, „ein Edelgas möchte ich nie und nimmer sein. Da ist man ganz alleine unterwegs und erlebt nie etwas Aufregendes, weil man zu chemischen Reaktionen unfähig ist.“

Anzumerken ist, dass ich Sauerstoff Eins und Zwei nie unterscheiden konnte, so völlig identisch waren sie. Aber irgendwie halfen mir diese Pseudonamen beim Nachdenken über das was sie erzählten.

Die Lufthülle der Erde besteht aus einem Gemisch von Gasen. Hauptbestandteil mit 78 % (Volumenprozent) ist Stickstoff. Sein chemisches Symbol ist N, und weil er wie Sauerstoff als zweiatomiges Gas vorkommt wird er in diesem Zustand mit N_2 repräsentiert. Im Unterschied zu Sauerstoff besitzt ein Stickstoffatom nur je sieben Protonen, Neutronen und Elektronen. Auch in diesem Fall befinden sich zwei Elektronen in der inneren Schale und fünf in der äußeren. Es hat somit noch Platz für drei weitere Elektronen, aber der Aufwand um sie dort zu plazieren ist höher als beim Sauerstoff, weshalb Stickstoff weniger reaktiv ist als jener. Folglich ist er als Gas für uns wie auch für Pflanzen und Tiere völlig neutral: Wir merken nichts davon, er ist nicht schädlich und auch nicht farbig.

Will man ihn zu einer chemischen Reaktion bringen, so ist technisch ein großer Aufwand in der Form von hohen Temperaturen, hohem Druck oder beidem nötig. Zusammen mit dem Gas Wasserstoff kann man beispielsweise Ammoniak erzeugen, aber der Prozess läuft erst bei mindestens 150 bar und 400 °C. Es gibt allerdings Bakterien, die den Luftstickstoff „einfangen“ können und ihn den Pflanzen, in deren Wurzeln sie leben, zur Verfügung stellen; ebenfalls eine Reaktion in der lebenden Natur, welche lautlos bei Umgebungstemperatur und Normaldruck abläuft...

Die zweithäufigste Komponente in der Luft ist der Sauerstoff. Er macht 21 % des Volumens aus, also nur etwa einen Fünftel der Gasmischung, die wir einatmen. Es bleibt noch ungefähr 1 %

des Volumens übrig, und in diesem Anteil findet man Edelgase, **Kohlenstoffdioxid** – meistens nur **kurz Kohlendioxid** genannt, Methan und Wasserstoff. Je nach Feuchtigkeit enthält die Luft immer auch mehr oder weniger Wasserdampf.

Die Edelgase sind, wie erwähnt, tatsächlich unfähig zu chemischen Reaktionen (von seltenen Ausnahmen, die ganz besondere Bedingungen benötigen, abgesehen). Es handelt sich um die Gase Helium, Neon, Argon (dieses ist das häufigste Edelgas), Krypton, Xenon und Radon. Sie alle besitzen in ihrer jeweils äußersten Schale genau so viele Elektronen wie dort Platz finden. Deshalb sind sie nicht auf Elektronenjagd aus und haben auch keine abzugeben, sie sind „inert“ oder „edel“. Sie bilden nicht einmal unter sich chemische Bindungen aus, so dass sie als atomare Einzelgänger in der Luft herumschwirren und nicht als Moleküle wie alle übrigen Gase.

Elektrisch angeregt leuchten die Edelgase in verschiedenen Farben, was für bunte Leuchtreklamen aus gasgefüllten Glasröhren, die zu Buchstaben und Wörtern geformt sind, ausgenützt wird. Helium wird zum Füllen von Kinderballons verwendet weil es leichter als Sauerstoff oder Stickstoff ist, obwohl es schade ist, dieses knappe Element für ein kurzfristiges Vergnügen zu verschwenden. In flüssiger Form (ganz irre kalt, weniger als minus 269 °C!) ist es zum Betrieb von Magnetresonanz-Tomografen nötig, die in der Medizin dazu dienen, in unser Inneres zu schauen, ohne dass Röntgenstrahlen benützt werden müssen.

Der Sauerstofftransport im Körper

Wir atmen ständig Luft und folglich Sauerstoff ein. Was geschieht damit im Körper? Gedankenverloren rührte ich eine Ewigkeit lang meinen Kaffee – der Zucker hatte sich schon längst aufgelöst – und wusste die Antwort nicht. Ich blickte auf: Da saßen tatsächlich die Sauerstoffs auf der Zuckerdose und schienen mein Problem zu erraten.

„Neulich waren wir wieder einmal in einem Menschen drin“, dozierten sie, „wobei, es kommt nicht drauf an ob Mensch oder Hund oder Taube. Das läuft überall etwa gleich.“ – „Und wie läuft es?“ fragte ich und merkte nebenbei, dass ich aus lauter Neugier tief einatmete. Komisch, dass da im eigenen Inneren etwas ablaufen sollte und man nicht das Geringste davon merkte... Die Sauerstoffs waren heute sehr geduldig mit mir und ergingen sich in Details, die in meinem Kopf geradezu tollkühne Bilder hervorriefen.

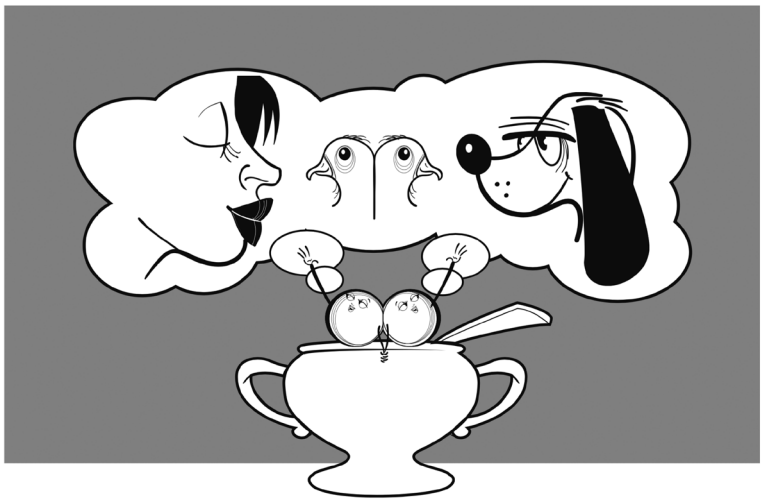
„Dein Blut ist rot, nicht wahr? Die Farbe kommt von den roten Blutkörperchen, und deren Farbe kommt vom Hämoglobin.“ – „Ist das etwas Gefährliches?“ Die Sauerstoffs schüttelten sich vor Lachen und meinten: „Nein, das ist ein schönes Molekül. Die roten Blutkörperchen sind mit diesen Molekülen vollgestopft. Jedes von ihnen ergreift in der Lunge vier Sauerstoffmoleküle. Das Herz pumpt das Blut bis in die entlegensten Winkel des Körpers. Dort übergibt das Hämoglobin seine Fracht an die Zellen, und dann kann in diesen die Verbrennung der Nahrung beginnen.“

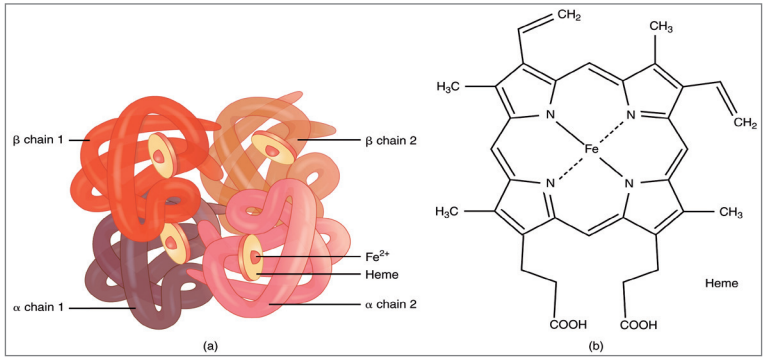
„Verbrennung? Ein Feuer?“ – „Oh nein, da ist kein Feuer, aber es passiert schon das Gleiche wie wenn Holz verbrennt: Der Sauerstoff verbindet sich mit Kohlenstoff zu Kohlendioxid und mit Wasserstoff zu Wasser! Dabei wird Energie freigesetzt, so dass du dich bewegen kannst“, sagte Sauerstoff Eins. „Oder du kannst denken, und dein Körper ist immer schön warm dank dieser Verbrennung“, doppelte Sauerstoff Zwei nach.

Hämoglobin ist ein kompliziert gebautes, aber dennoch sehr elegantes Molekül, das aus etwa 10 000 Atomen besteht. Es wurde auch schon als „Sauerstoff-Taxi“ bezeichnet, als Vehikel mit vier Türen und vier Plätzen. Die Sitzplätze werden durch je ein Eisen-

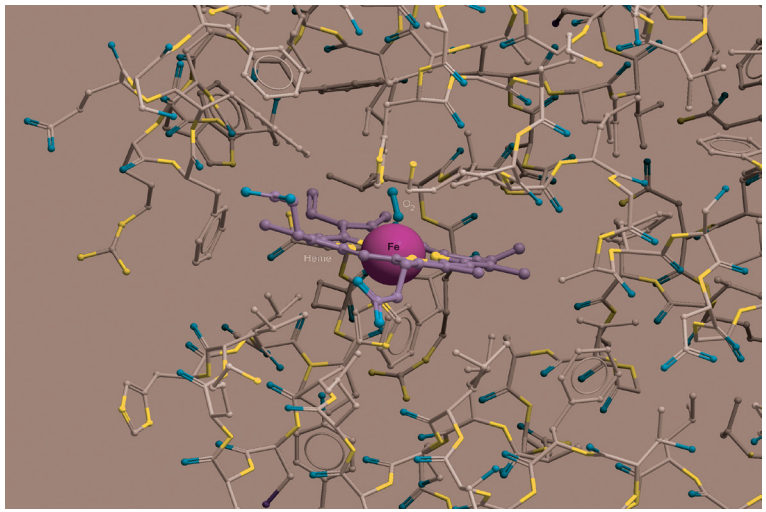
atom gebildet, von denen jedes in der Lunge ein Sauerstoffmolekül an sich bindet. Das Hämoglobin verändert dadurch ein wenig seine Gestalt, die Türen des Vehikels schließen sich sozusagen. Nun geht die Fahrt mit dem Blutstrom durch die Arterien und durch immer dünner werdende Blutgefäße bis zu den Kapillargefäßen. Da wo im umliegenden Gewebe Sauerstoffmangel herrscht öffnen sich die Türen (das Hämoglobin nimmt wieder seine ursprüngliche Gestalt an), und die Sauerstoffmoleküle lösen sich von ihren Sitzplätzen. Sie diffundieren durch die Zellwände und werden von den Zellen in Empfang genommen.

Die roten Blutkörperchen, von deren Existenz man sich mit dem Blick durch ein Mikroskop überzeugen kann, sind flache, in der Mitte leicht eingedrückte Scheiben von etwa sieben Mikrometer (0,007 mm) Durchmesser. Jedes von ihnen enthält etwa 300 Millionen Hämoglobinmoleküle, die wie beschrieben je vier Sauerstoffmoleküle aufnehmen können. Ein einzelnes rotes Blutkörperchen transportiert auf seinem Weg von der Lunge bis zu den Kapillaren folglich 1,2 Milliarden Sauerstoff-Pärchen! Auf dem Rückweg durch die Venen zur Lunge sind die Sitzplätze im Hämoglobin-Vehikel leer.





Hämoglobin ist ein kompliziertes Molekül aus etwa 10 000 Atomen. Säuger-Hämoglobine bestehen aus vier Untereinheiten (Ketten), je zwei vom α- und zwei vom β-Typ. In jeder dieser Untereinheiten ist jeweils eine Nicht-Protein-Komponente eingebettet. Solch eine prosthetische Gruppe (auch Cofaktor genannt) ist neben dem Protein-Anteil eines bestimmten Enzyms für dessen katalytische Aktivität unerlässlich. Beim Hämoglobin findet dort die Sauerstoffbindung statt. Ein Hämoglobinkomplex-Molekül kann also vier Sauerstoffmoleküle binden. Die Abbildungen oben zeigen vereinfacht in a) die vier α- und β-Ketten und die eingebetteten Cofaktoren, in b) die Strukturformel nur des eingebetteten Häm b (engl. Heme). Die Abbildung unten zeigt ein Kugelmodell der Häm-Tasche der Hämoglobin β-Untereinheit mit Häm, Eisen (rot) und Disauerstoff (Abb. oben: Anatomy & Physiology, OpenStax College, 2013; unten: Ayacop).



Moleküle des Stickstoffs, der in der Atemluft in viel höherer Konzentration als der Sauerstoff vorliegt, können die Plätze im Hämoglobin nicht besetzen, weil sie dafür zu groß sind; zwar nur ein bisschen zu groß, aber doch genügend, dass sie sich nicht in das Taxi zwängen können. Dagegen passen Kohlenmonoxid-Moleküle (CO, aus Verbrennungsvorgängen unter Sauerstoffmangel stammend) so hervorragend gut ins Hämoglobin, dass sie sich kaum daraus entfernen lassen. Deshalb wirkt Kohlenmonoxid in der Atemluft bereits in geringer Konzentration tödlich: Alle Plätze im Taxi sind dauernd besetzt, und der Sauerstoff hat keine Chance auf eine Transportmöglichkeit.

Arterielles Blut (dasjenige mit Sauerstoff) ist hellrot, venöses wegen der leicht veränderten Gestalt des Hämoglobins dunkelrot. Hellrotes Blut bekommen wir normalerweise nicht zu sehen, weil die Arterien tiefer im Körper liegen als die Venen, so dass bei einer nicht gravierenden Verletzung nur venöses Blut austritt.

Feuer

Der Tag war düster, was mir aufs Gemüt schlug, so dass ich zur äußeren und inneren Erheiterung eine Kerze entzündete. Da war es, das Feuer, von dem die Sauerstoffs behauptet hatten, es wirke auch in meinem Körper. Je länger ich die Flamme betrachtete, desto mehr wuchs meine Verwirrung.

„Hallo“, hörte ich die zweistimmige Begrüßung hinter meinem Rükken. Und schon kamen die Sauerstoffs herangesaust und tanzten vor meinen Augen lustig im heißen Aufwind über der Kerze.

„Wie ist das mit dem unsichtbaren Feuer in meinem Körper?“, fragte ich meine kleinen Privatlehrer.

„Du bist ein hektischer Mensch“, seufzte Sauerstoff Eins. „Du musst doch zuerst verstehen, was in der Kerzenflamme geschieht. Zuerst das Einfache, dann das Komplizierte, einverstanden?“ Ich nickte.

„Die Kerze hier besteht aus Paraffin. Nebenbei gesagt: Ganz vornehme Kerzen sind aus Bienenwachs gemacht, aber deine ist eine gewöhnliche. Paraffin gewinnt man aus Erdöl, und seine Moleküle bilden lange Ketten aus Kohlenstoffatomen, an die Wasserstoffatome gebunden sind.“ Mir brummte der Kopf, aber Sauerstoff Zwei tröstete mich: „Dieses Detail braucht dich nicht zu kümmern. Viel interessanter ist der Vorgang in einem Feuer, wie in dieser Kerzenflamme, weil wir Sauerstoffs da am Werk sind. Wir verbinden uns mit dem Kohlenstoff des Paraffins zu Kohlendioxid und mit dem Wasserstoff zu Wasser, so einfach ist das. Bei diesen Reaktionen wird viel Energie freigesetzt, die Flamme leuchtet und ist sehr heiß.“

Ich staunte und betrachtete die brennende Kerze ganz anders als vorher. In meine Gedanken versunken merkte ich nicht, wie sich die Sauerstoffs vergnügt davonstahlen.

Manche Stoffe sind brennbar, andere nicht, das ist Alltagswissen. Ob ein Material brennt und wie leicht (oder schwer) es in Flammen aufgeht, hängt zum einen von seiner chemischen Zusammensetzung ab, zum anderen ist aber auch seine Struktur wichtig. Benzin brennt sofort, wenn eine Zündquelle, beispielsweise ein brennendes Streichholz in seine Nähe kommt. Mit Holz ist das Entfachen eines Feuers nur dann einfach, wenn es in sehr dünne Stücke oder gar in Späne

zerkleinert vorliegt. Erst nach und nach, wenn das Feuer stark genug ist und viel Hitze entwickelt, kann man größere Scheite nachlegen.

Andere brennbare Stoffe, die uns oft begegnen, sind Erdgas, Heizöl, Stroh, Papier, Textilien und manche Kunststoffe. Sie bestehen chemisch aus Kohlenstoff, der stets das Grundgerüst bildet, und Wasserstoff (insbesondere Erdgas und Erdölprodukte), aber viele davon zudem aus Sauerstoff (Papier, Holz, Polyesterfasern) und Stickstoff (Nylon). Was Kohlenstoff C und Wasserstoff H betrifft, so gehören ihre einfachsten Verbindungen mit Sauerstoff zu den stabilsten Molekülen überhaupt: Es sind Kohlendioxid CO_2 und Wasser H_2O. Die Reaktionen mit dem zweiatomigen Sauerstoff lassen sich wie folgt beschreiben:

$C + O_2 \rightarrow CO_2$ Kohlendioxid
$4\,H + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$ Wasser

Benzin, dessen Moleküle Kohlenwasserstoffe wie Hexan C_6H_{14} sind – also kleine Moleküle aus einigen Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen – ist flüssig. Weil sein Siedepunkt je nach Sorte unter 100 °C liegt, befindet sich über der Flüssigkeit immer auch Benzin-

dampf, der sehr leicht entzündlich ist. Jeder brennbare Stoff brennt aber nur in Gegenwart von Sauerstoff, und das heißt üblicherweise in Gegenwart von Luft. Für ein Feuer sind immer drei Dinge notwendig: ein brennbarer Stoff, eine Zündquelle (wie ein brennendes Streichholz, eine glühende Heizwendel oder ein elektrischer Funken) und Sauerstoff. Fehlt eine dieser Zutaten, so kann kein Feuer entfacht werden. Die Zündquelle dient dazu, den unter sich so fest gebundenen, „doppelt händchenhaltenden“ Sauerstoffmolekülen die nötige Energie für das Auflösen der Bindung zuzuführen.

Weil die Endprodukte Kohlendioxid und Wasser sehr stabil sind, wird bei einer Verbrennung viel Energie frei, was schon die Frühmenschen schätzten. Die Fähigkeit, Feuer zu entfachen und in der Höhle über lange Zeit zu unterhalten, war eine große Kulturleistung der steinzeitlichen Menschen.

Experiment 1

Falls Sie eine Sprudelmaschine für selbstgemachte Erfrischungsgetränke besitzen, können Sie bequem ein kleines Experiment durchführen. Diese Maschinen pressen Kohlendioxid-Gas in die vorgelegten Getränkemischungen. Schrauben Sie eine leere Getränkeflasche an die Maschine und betätigen Sie die Taste für den Kohlendioxid-Boost, eventuell mehrmals. Nun schrauben Sie die Flasche ab und verschließen sie fest. Dann entzünden Sie eine Kerze oder ein Teelicht. Öffnen Sie die Flasche wieder und gießen Sie ihren unsichtbaren Inhalt ruhig über die Flamme bis die Flasche mit der Öffnung nach unten direkt darüber steht. Die Flamme erlischt.
Kohlendioxid ist schwerer als Luft, deshalb fließt dieses Gas über die Kerze wenn Sie die Flasche kippen. In einer Kohlendioxid-Atmosphäre kann die Flamme aber nicht brennen.
Etwas Vorsicht ist bei diesem Experiment geboten. Wiederholen Sie es nicht unzählige Male, es sei denn, Sie sorgen für viel frische Luft im Raum. Kohlendioxid ist nicht giftig, aber wenn wir zu viel davon erwischen, kann es uns ähnlich schlecht ergehen wie der Flamme.
Die Flasche mit der Kohlendioxid-Füllung lässt sich lange aufbewahren, wenn sie gut verschlossen ist. Beim nächsten Geburtstagsfest können Sie für Verblüffung sorgen, indem Sie die Kerzen nicht etwa ausblasen, sondern auf geheimnisvolle Weise mit einer leeren Flasche löschen.

Das Feuer im Körper

Das Frühstück ist mir heilig, denn ohne ausgedehnte Nahrungsaufnahme am Morgen bin ich den ganzen Tag unausstehlich und weder zu körperlicher noch geistiger Arbeit fähig. Soeben hatte ich es mir am schön gedeckten Tisch gemütlich gemacht; wie immer gab es ein Dreiminutenei, ein Butterbrot, ein Müsli aus Flocken, Heidelbeeren und Milch sowie eine Tasse Kaffee. Und schon tauchten die Sauerstoffs auf und wünschten mir frohe Mahlzeit. „Du hast offenbar tüchtigen Appetit! Super, was du für ein Essen zusammengestellt hast!“

„Wieso super? Es schmeckt mir einfach...“

„Ei und Milch liefern dir Eiweiß, Brot und Flocken die Kohlenhydrate, und die Butter besteht aus Fett. Das alles brauchst du zum Leben.“

„Ihr habt mir doch erzählt, dass ich unbedingt Sauerstoff benötige.“

„Richtig, aber die Sache mit deiner Lebensenergie ist etwas komplizierter. Neben Eiweiß, Kohlenhydraten, Fett und Sauerstoff brauchst du viel Wasser, Vitamine und Spurenelemente. Wasser ist in Milch und Kaffee, Vitamine sind in allem enthalten was auf dem Tisch steht, und auch Spurenelemente sind überall zu finden. Guten Appetit!“

Das Kompliment der Sauerstoffs über die Zusammenstellung meines Frühstücks erfüllte mich mit Stolz, aber dass die Sache kompliziert sei war ziemlich beunruhigend. Meine Lehrer schienen das zu bemerken und fuhren fort: „Es ist wahnsinnig raffiniert, was im Körper alles an chemischen Reaktionen abläuft. Müssten wir dir das alles beibringen, so wären wir jahrelang beschäftigt. Und müsstest du alles aufschreiben, so gäbe das viele dicke Bücher. Zum Beispiel eines über Adenosintriphosphat.“ Ich zuckte zusammen: so ein kompliziertes Wort! Doch die Sauerstoffs schienen Gefallen an komplizierten Wörtern zu finden und überschütteten mich abwechslungsweise mit den unmöglichsten Begriffen: „Myoglobin!“ – „Pyruvat!“ – „Zitronensäurezyklus!“ – „Coenzym A!“ – „Glykogen!“ – „Kreatinphosphat!“

Schließlich erbarmten sie sich meiner und erklärten: „Der Körper baut aus den Nahrungsbestandteilen alle Moleküle auf, die du brauchst. Denk beispielsweise an die roten Blutkörperchen, die nur etwa vier Monate alt werden und deren Produktion deshalb ständig auf Hochtouren läuft. Für sie muss massenhaft Hämoglobin herge-

stellt werden. Oder deine Muskeln: Wenn du sie im Fitnessraum trainierst, muss zusätzliches Muskelgewebe gebildet werden. Arbeit kannst du nur verrichten, wenn du genügend energiereiche Nahrung zu dir nimmst, dasselbe gilt fürs Denken. Und nicht zu vergessen: Dein Körper ist immer schön temperiert, auch das benötigt Energie. Aber wir können das alles vereinfachen.“

„Muss ich keine dicken Bücher lesen?“, fragte ich erleichtert.

„Es genügt wenn du weißt, dass du Kohlenhydrate, Eiweiße, Fette, Wasser, Vitamine, Spurenelemente und Sauerstoff benötigst. Als Endprodukte all der komplizierten chemischen Reaktionen im Körper entstehen Kohlendioxid und Wasser – genau wie beim Feuer – sowie Harnstoff.“

In einem lebenden Organismus sind alle Stoffwechselvorgänge aufs raffinierteste miteinander verschränkt. Viele Aufgaben müssen gleichzeitig erledigt werden: Bei Kindern das Wachstum und bei

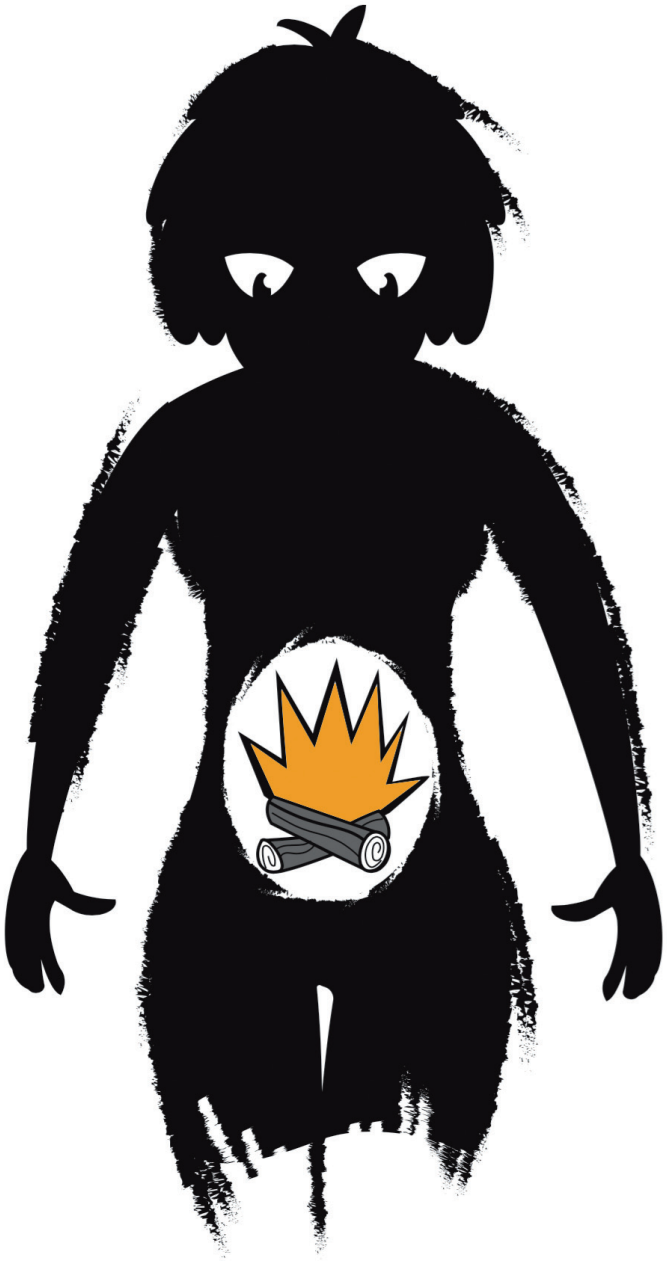
Erwachsenen die ständige Erneuerung aller Zellen, was die kontinuierliche Synthese einer Vielzahl von Molekülen erfordert; die Bereitstellung von Energie für die Muskeln (damit sie sich bewegen können), für das Gehirn (damit es Prozesse steuern und denken kann) und für viele andere Gewebe; die Bewirtschaftung von Energiedepots wie Fett oder Glykogen; die Ausschüttung von Hormonen zur richtigen Zeit und am richtigen Ort; die Abwehr von Störefrieden wie Bakterien und Viren; nicht zuletzt auch die Sicherstellung einer konstanten Körpertemperatur von 37 °C.

Wie die Sauerstoffs erklärten, müssen wir energiereiche Nahrung zu uns nehmen, damit der Körper all diese Vorgänge korrekt erledigen kann. Die wichtigsten Bestandteile der Nahrung sind Kohlenhydrate (aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff bestehend), Eiweiße (auch Proteine genannt, die neben den drei genannten Elementen noch Stickstoff und etwas Schwefel enthalten) und Fette (vorwiegend aus Kohlenstoff und Wasserstoff bestehend). Wasser wird benötigt, weil alle Gewebe und Zellen viel Wasser enthalten und ein Mangel daran rasch lebensbedrohlich wird. Vitamine sind Hilfsstoffe, die der Körper nicht selber herstellen kann, die aber nur in kleinen Mengen benötigt werden. Die Spurenelemente sind Mitglieder der chemischen Elementfamilie, von denen wir mehr (etwa Kalzium für die Knochen) oder weniger viel (etwa Eisen fürs Hämoglobin) brauchen und ohne die gar nichts laufen würde. Und der Sauerstoff?

Energie kann aus Kohlenhydraten, Proteinen und Fetten gewonnen werden. Die Kohlenhydrate in Brot, Pasta, Müsli-Flocken oder Zucker dienen hier als Beispiel. Sie bestehen aus Zuckereinheiten der Zusammensetzung $C_6H_{12}O_6$. Die „Verbrennung“ dieser Moleküle mit Sauerstoff läuft (sehr summarisch) nach folgender chemischen Reaktion:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$$

Das Kohlendioxid CO_2 atmen wir aus und das Reaktionswasser H_2O wird entweder vom Körper benötigt oder aber ausgeschieden, und zwar mit der ausgeatmeten Luft, als Schweiß, als Urin und als Bestandteil des Kots.



Wie in einem Feuer wird bei obiger Reaktion viel Energie frei, allerdings geschieht das still und heimlich in den erwähnten miteinander verschränkten Stoffwechselvorgängen. Diese sind nur möglich, weil hochspezialisierte Moleküle, die Enzyme, für jede Reaktion die genau passende räumliche und chemische Struktur zur Verfügung stellen. Ein Enzym nimmt quasi die Reaktionspartner in den Arm und bringt sie dazu, chemische Bindungen zu trennen oder zu bilden.

Was die Proteine (in Fleisch, Hülsenfrüchten, Milch oder Eiern) betrifft, enthält unsere durchschnittliche Nahrung mehr Stickstoff als der Körper benötigt. Dieser Überschuss lässt sich nicht wie oben dargestellt „verbrennen“, sondern muss in der Form von Harnstoff der Zusammensetzung CON_2H_4 im Urin entsorgt werden.

Ist Sauerstoff giftig?

Die Vorstellung von einer Art Feuer in meinem Körper, wenn auch ohne Flamme, bereitete mir Sorgen. War das nicht irgendwie gefährlich? War es ausgeschlossen, dass ich innerlich verbrennen könnte, wenn ich doch ständig Sauerstoff einatmen musste?

Um mich von diesen quälenden Gedanken abzulenken kaufte ich auf dem Weg zur Post einen Apfel am großen Kiosk. Andere Leute kauften Zeitungen oder Zigaretten. Die Poststelle unseres Wohnbezirks war noch geschlossen und würde erst in einer halben Stunde öffnen. Ich setzte mich gegenüber auf ein Mäuerchen und genoss den Apfel, da piepste es neben mir: „Du bist wirklich gesundheitsbewusst!“ Die Sauerstoffs hatten mich gefunden und schienen erneut mit meiner Ernährung sehr zufrieden zu sein. Ich erzählte ihnen von meinen Sorgen: „Seid ihr eigentlich lieb oder böse?“

„Das kommt darauf an, wie immer im Leben. Der große Paracelsus hat doch bereits 1538 gesagt: Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis machts, dass ein Ding kein Gift sei. So gesehen können auch wir Gift sein.“

„Wie denn? Ich kann doch nicht leben ohne euch!“

„Wir sind auf zwei verschiedene Arten giftig für dich. Würdest du tagelang reinen Sauerstoff einatmen, wäre das nicht gesund. Aber die Giftwirkung lauert auch bei den Stoffwechselvorgängen in deinem Körper. Wir sagen nur: Freie Radikale! Hydroxyl-Radikal! Superoxid-Radikal!“

Da waren sie schon wieder, die komplizierten Wörter. Ich knabberte das Fruchtfleisch rings um das Kerngehäuse weg und warf den kümmerlichen Rest des Apfels hinter mir ins Gebüsch. „Das klingt ja furchtbar gefährlich“, sagte ich bekümmert.

„Das Leben ist sowieso nicht ungefährlich“, sagte Sauerstoff Eins auf urkomische und altkluge Weise, „und irgendwann stirbst du ohnehin.“

„Aber glaube uns: Das mit dem Apfel war eine gute Idee, jedenfalls ist er tausendfach gesund, wogegen die Leute mit den Zigaretten tausendfach ungesund leben!“, tröstete mich Sauerstoff Zwei.

Inzwischen hatte die Post geöffnet, und ich wankte über die Straße zum gelben Riesen. Die komplizierten Wörter schwirrten in meinem Kopf herum.

Paracelsus, einer der größten Ärzte und Naturforscher der frühen Neuzeit, hatte Recht: Alles ist Gift, wenn man es im Übermaß konsumiert. Das gilt sogar für den lebensnotwendigen Sauerstoff. So segensreich sein Einsatz bei Erste-Hilfe-Maßnahmen und Schwerkranken ist, darf man sich doch nicht dazu verführen lassen, ihn über lange Zeit in reiner Form einzuatmen. In der Luft kommt er nur zu 21 % vor, und unser Körper ist für diesen doch eher tiefen Gehalt bestens eingerichtet. Benötigt eine kranke Person längerfristige Unterstützung, so ist entweder darauf zu achten, dass sie vor allem Luft einatmet und zusätzlich etwas reinen Sauerstoff, oder dass das Beatmungsgas nur etwa 50 % Sauerstoff enthält. Wird der Körper ausschließlich mit reinem Sauerstoff versorgt, so wird die Lunge (genau genommen die Lungenbläschen) innerhalb eines Tages geschädigt, und ein tödliches Lungenödem kann die Folge sein. Erhalten Frühgeborene im Brutkasten zu viel Sauerstoff so treten Augenschäden bis zur Blindheit auf. Mit Luft als Atemgas darf nur bis in eine Tiefe von 60 Metern getaucht werden, weil sonst der Druck des Wassers und damit auch des Gases so sehr ansteigt, dass der Sauerstoff als Gift wirkt.

Wenn man den Aussagen von allerlei Scharlatanen Glauben schenken will, so droht uns allen große Gefahr durch die ganz normalen Stoffwechselvorgänge im Körper. Wenn in den Zellen das „chemische Feuer brennt“ entstehen immer auch besonders reaktionsfreudige Stoffe, die freien Radikale. Das sind kurzlebige Moleküle mit einem einsamen Elektron. Derartige Moleküle sind aggressiv und schädigen lebenswichtige Strukturen der Zellen (Proteine oder Gene), weil sie dringend ein Elektron finden oder abgeben wollen, damit alle ihre Elektronen als Paare vorliegen und das Molekül als Ganzes (relativ) stabil ist. Das einsame Elektron wird in der chemischen Formel mit einem Stern oder Punkt charakterisiert. In den Zellen treiben vor allem zwei Sauerstoff-Verbindungen ihr Unwesen als freie Radikale: das Hydroxyl-Radikal OH* und das Superoxid-Radikal O_2^{-}*, die beide aus Sauerstoff oder Wasser entstehen können. Manche Theorien besagen, dass sie für alles Schädliche verantwortlich sind: den Krebs, die Arteriosklerose, den Diabetes, die Alzheimer-Krankheit, das Altern und den vorzeitigen Tod (will heißen, den Tod im Alter von weniger als 120 Jahren).

Die Entstehung von Radikalen im Körper ist unvermeidlich. Unser Leben beruht auf Sauerstoff, der sich eben in den Zellen auch als Gift erweisen kann. Leben ist eine Gratwanderung. Der Körper schützt sich mit speziellen Stoffen, den Antioxidantien, gegen die freien Radikale. Manche Stoffwechselvorgänge werden aber noch nicht verstanden; deshalb ist es fraglich, ob man sich durch die Einnahme von gewissen Medikamenten oder Lebensmittel-Zusatzstoffen wie Vitamin C gegen die erwähnten Krankheiten oder das Altern schützen kann. Sie könnten nützlich sein, eventuell unnötig und harmlos, eventuell sogar schädlich. Dies hält aber die Scharlatane nicht davon ab, vorzugsweise im Internet zu werben und ängstlichen Menschen Gesundheit durch teure Produkte zu versprechen.

Möchten Sie sich vor freien Radikalen schützen, so lassen Sie sich in der Apotheke beraten. Günstiger und lustvoller ist es jedoch, wenn Sie täglich einen Apfel essen, er ist gesund und enthält auch Antioxidantien. Möchten Sie hingegen ihrem Körper Schaden zufügen, so beginnen Sie am besten zu rauchen oder fahren damit fort. Das Rauchen ist der effizienteste Weg, um den Körper mit freien Radikalen zu versorgen.

Rost

Am nächsten Tag waren die Sauerstoffs anfänglich ziemlich schweigsam. Vielleicht war es ihnen peinlich, dass sie mich in der letzten Zeit mit komplizierten Wörtern bombardiert hatten. Sie machten es sich auf einem Pfosten des alten, eisernen Gartenzauns gemütlich, und ich tarnte meine Neugierde mit einem möglichst beiläufigen Tonfall: „Ihr seid ja wahre Spezialisten, was sichtbare und unsichtbare Feuer betrifft. Gibt es noch mehr solche Prozesse?“

„Ja, die gibt es, aber sprechen wir doch lieber von Oxidation als von Feuer. Wenn wir uns mit einem Stoff verbinden, so wird dieser Stoff oxidiert, ob das nun mit Feuerschein vor sich geht oder nicht. Was machst du da?“

„Den Gartenzaun neu streichen, damit er nicht rostet.“

„Siehst du! Rost erzeugen ist auch eine unserer Spezialitäten. Er ist nichts anderes als oxidiertes Eisen. Eigentlich sieht er mir seiner warmen, braunroten Farbe ganz hübsch aus, aber wir geben zu, dass Zäune, Schiffsrümpfe, Karosserien und anderes Eisenzeugs brüchig oder löchrig wird, wenn man uns gewähren lässt.“

„Wenn dem so ist, dürft ihr nicht auf meinem Zaun herumsitzen!“, rief ich voller Entsetzen und drohte den Sauerstoffs mit dem Pinsel, der von Rostschutzfarbe triefte. Weg waren sie, und ich setzte meine Arbeit mit diesem neuen Wissen in einiger Andacht fort.

Rost entsteht, wenn sich Eisen (chemisches Zeichen Fe) mit Sauerstoff verbindet; der Vorgang heißt „Korrosion“. Etwas vereinfacht dargestellt besteht Rost aus Eisenoxid Fe_2O_3. Weil der Sauerstoff Platz im Gitter der Metallatome benötigt, bildet sich auf der Oberfläche des rostenden Gegenstands eine poröse Schicht, die leicht abblättert. Darunter kommt wieder Eisen zum Vorschein, so dass der Prozess weiter gehen kann und das Objekt immer dünner wird. Schließlich wird es brüchig und nicht mehr gebrauchsfähig. Korrosion bewirkt immense Schäden an Brücken, Schiffen, Fahrzeugen, Containern oder Werkzeugen aus Eisen oder preisgünstigem Stahl.

Eisen und Sauerstoff alleine genügen nicht, um die Korrosion in Gang zu setzen. Es muss auch Wasser vorhanden sein, wobei Feuchtigkeit durchaus genügt. Der Angriff des Sauerstoffs beginnt

vorzugsweise an einer Fehlstelle im Eisengefüge, sei dies ein Fremdatom oder ein Gitterpunkt, der durch mechanische Belastung eine ungünstige Vorspannung aufweist. Die Rostschutzfarbe auf dem Zaun bildet eine Sperrschicht zwischen Metall und Luft, so dass der Sauerstoff gar nicht angreifen kann. Ein Zaun lässt sich allerdings auch aus teurerem Material herstellen: Wird Eisen mit Chrom, Nikkel und je nach Verwendungszweck noch weiteren Metallen legiert, so entsteht „rostfreier“ Stahl, der keinen Schutzanstrich benötigt. Doch leider gibt es in der weiten Welt der Stähle nur wenige Materialien, die selbst unter hoher mechanischer, thermischer und chemischer Beanspruchung nicht korrodieren. Diese sind entsprechend

teuer. Für einen Kochtopf genügt es jedoch, einen „gewöhnlichen“ Eisen-Chrom-Nickel-Stahl zu verwenden; er ist nicht umzubringen und leistet seinen Küchendienst jahrzehntelang, bis ihn die Köchin vielleicht zur Sammelstelle für Alteisen bringt, weil sie Lust auf einen Topf mit dem neusten Design hat.

Experiment 2

Die Entwicklung von Rost lässt sich sehr einfach beobachten. Füllen Sie so wenig Wasser in eine weiße Untertasse, dass eine kleine Pfütze entsteht (kein See). Fügen Sie wenige Körnchen Salz zu. Legen Sie eine Büroklammer aus Stahl hinein, so dass sie vollständig benetzt ist, und ziehen Sie diese an den Rand der Wasserfläche. Die Büroklammer soll in Kontakt mit Wasser und Luft stehen. Liegt sie nur teilweise im Wasser, so ist sie dennoch praktisch vollständig davon umgeben, weil die Flüssigkeit dank der Oberflächenspannung an ihr haftet. Lassen Sie die Untertasse stehen und beobachten Sie am nächsten Tag was passiert ist. Die Büroklammer sieht vielleicht noch unversehrt aus, aber es haben sich braune Flocken gebildet, die sich davon ablösen, wenn man die Untertasse leicht schwenkt. Die Flocken bestehen aus Eisenoxid. Soll die Büroklammer wirklich Rost ansetzen, müssen Sie sich tagelang gedulden (und dafür sorgen, dass die Pfütze nicht austrocknet). Ist die Klammer mit viel Wasser bedeckt, weil sie beispielsweise in einem gefüllten Glas liegt, so verläuft der Prozess langsamer, denn der Luftzutritt ist behindert.
Die Büroklammer besteht zwar aus Stahl, aber sie wurde mit einer sehr dünnen Schutzschicht aus Nickel und anderen Metallen versehen, damit sie nicht schon in der Raumluft oder nach der Berührung mit feuchten Fingern zu rosten beginnt. Büroklammern müssen jedoch billig sein, und in wässriger Umgebung ist es diese Art Korrosionsschutz nicht besonders wirksam.
Wenn Sie denselben Versuch mit der Lasche einer Getränkedose aus Aluminium wiederholen geschieht – was?

Experiment 3

Viel eindrücklicher ist das Rost-Experiment, wenn Sie es mit Stahlwolle (aus dem Baumarkt) durchführen. Geben Sie beim Kauf Acht: Es gibt auch rostfreie Stahlwolle! Wenn dies aber nicht speziell bezeichnet ist, handelt es sich um gewöhnliche, rostende Stahlwolle. Ein kleiner Bausch davon genügt für den Versuch in der Untertasse. Die verrostete Stahlwolle können Sie nachher in den Abfall werfen, das Wasser dürfen Sie in den Ablauf gießen. Beides ist ungefährlich.
Mit einer PET-Flasche und Stahlwolle können Sie sogar den Sauerstoffgehalt der Luft halbwegs genau bestimmen. Im Kapitel „Luft“ wurde gesagt, dass sie zu 21% aus Sauerstoff bestehe; ihr Hauptbestandteil ist Stickstoff. Geben Sie zwei ungefähr walnussgroße Bausche Stahlwolle (am besten von der feinsten Qualität und natürlich nicht rostfrei) in eine Halbliter-PET-Flasche und fügen Sie etwas Wasser dazu. Die Stahlwolle soll ungefähr zur Hälfte bedeckt sein, jedenfalls nicht vollständig. Eine kleine Prise Salz ist nötig, um den Prozess zu beschleunigen. Drehen Sie den Deckel kräftig, das heißt luftdicht zu und lassen Sie die Flasche bei Raumtemperatur stehen. Mehrmals täglich kräftig schütteln (ohne Schütteln dauert das Experiment eine Ewigkeit). Die Flasche beginnt zu schrumpfen, falls sie nicht zu dickwandig ist, und ihr Inhalt verfärbt sich dunkelgrün und braun bis schwarz, weil die Stahlwolle rostet und dabei den Luftsauerstoff aufzehrt. Es entsteht Eisenoxid FeO oder Fe_2O_3. Nach vierzehn Tagen ist kaum mehr eine Formveränderung erkennbar, weil aller Sauerstoff aufgebraucht ist, und die Flasche ist deutlich verformt.
Um die Menge an „verschwundenem“ Sauerstoff zu bestimmen, wägen Sie die Flasche samt Inhalt auf einer Briefwaage auf ein Gramm genau. Dann füllen Sie ein Becken mit Wasser. Tauchen Sie die Flasche mit dem Verschluss nach unten wenige Zentimeter tief senkrecht ins Wasser und drehen Sie langsam den Deckel so weit auf, dass Wasser einströmen kann; keine Angst, man kann und soll ziemlich weit aufdrehen. Die Flasche nimmt wieder ihre normale Form an; eventuell müssen Sie durch Knutschen mit der freien Hand etwas nachhelfen. Immer noch in senkrechter Position schrauben Sie den Deckel unter Wasser wieder zu. Nach dem äußerlichen Abtrocknen der Flasche wird sie erneut gewogen. Die Gewichtsdifferenz entspricht dem eingedrungenen Volumen an Wasser. Bekanntlich wiegt ein Liter Wasser ein Kilogramm. Wenn Sie eine Halbliter-PET-Flasche verwendeten, so werden Sie herausfinden, dass sie nun etwa hundert Gramm schwerer ist, falls das Experiment perfekt gelaufen ist. Diese Differenz entspricht einem Deziliter Wasser – einem Fünftel des Volumens der Flasche.

Für dieses einfache Experiment muss das Eisen (die Stahlwolle) in großem Überschuss vorliegen. Theoretisch, wenn man mit den Atommassen von Sauerstoff und Eisen rechnet, wäre nicht mehr als ein halbes Gramm Stahlwolle nötig. Wenn jedoch aller Sauerstoff innerhalb nützlicher Frist aufgezehrt werden soll, ist es empfehlenswert, etwa drei Gramm einzusetzen, die oben genannten zwei Bausche.

Aluminium, Gold und andere Metalle

Nachdem ich den Gartenzaun fertig gestrichen hatte, kreisten meine Gedanken während des Abendbrots um eine Frage, auf die ich keine Antwort wusste: Rosten andere Metalle außer Eisen auch? Die Sauerstoffs, die ich so gerne gefragt hätte, schienen anderweitig beschäftigt zu sein und zeigten sich nicht. Erst am nächsten Vormittag lümmelten sie plötzlich wieder auf dem Bücherbord herum. Ich konnte mich des Eindrucks nicht erwehren, dass sie sich über mich lustig machten. Doch bevor sie in Versuchung gerieten, ihren Spott über mich auszugießen, kam ich ihnen zuvor: „Macht ihr Dinge aus Aluminium eigentlich auch kaputt?“

„Nein, im Gegenteil, wir schützen sie!“

Ich war wieder einmal überfordert. Komische Kerle, diese Sauerstoffs – zuweilen sollen sie schädlich sein, in einem anderen Zusammenhang nützlich. „Und was ist mit anderen Metallen?“, fragte ich.

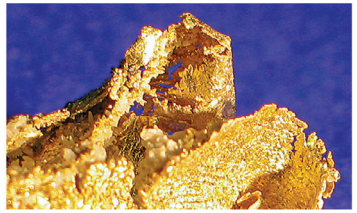
„Also Gold ist langweilig“, sagte Sauerstoff Eins. „Will nichts mit uns zu tun haben, da können wir uns noch so Mühe geben. Schau mal, wie schön dein Fingerring glänzt!“ – „Und die Kugel auf dem Kirchturm dort drüben ist bestimmt schon hundert Jahre alt und sieht immer noch wie neu aus!“, bemerkte Sauerstoff Zwei.

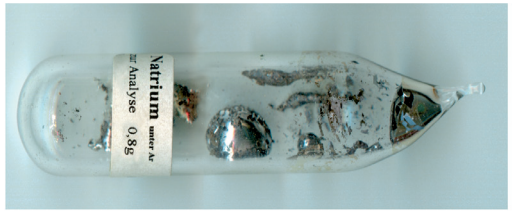
„Kupfer? Die Dachrinne am Rathaus wurde neulich ersetzt, da glänzte sie wunderbar im warmen Rot des Kupfers, aber bald einmal wurde sie schwarzbraun.“

„Sind nicht wir schuld! Das haben andere angestellt!“

„Gibt es denn keine heftigen Liebschaften zwischen euch und irgend einem Metall? Etwas, das aufregender ist als das Rosten von Eisen? Ich denke, selbst wenn ich meinen Gartenzaun nicht anstreichen würde, dauerte es jahrelang, bis er zusammenstürzte.“

„Oh, es gibt Metalle, die du kaum je zu Gesicht bekommst, weil sie so reaktionsfreudig sind. Magnesium kann man anzünden, dann brennt es mit heller, weißer Flamme. Und Natrium, das eigentlich einen schönen Metallglanz hat, wird an der Luft sofort grau und matt. Wenn du Natrium ins Wasser wirfst, kannst du was erleben! Aber in diesem Fall sind nicht wir schuld, sondern das Wasser.“





Das war genug der Belehrung für heute. Ich blickte versonnen zur Turmkugel hinüber, der tatsächlich hundert Jahre Wind, Regen, Schnee und Sonnenschein nichts anzuhaben schienen.

Metalle verhalten sich ganz verschieden gegenüber Sauerstoff. Einige sind in höchstem Maß reaktiv (sie sind unedel), andere verhalten sich inert (dies sind die Edelmetalle wie Gold, Silber und Platin). Der Grund dafür liegt wie immer in der Struktur der Elektronenhülle, welche ein bestimmtes metallisches Element aufweist.

Aluminium ist interessant, weil es an der Luft sofort oxidiert wird, aber dann vor weiterem Angriff geschützt ist. Die dabei entstehende Schicht der Zusammensetzung Al_2O_3 ist nur etwa

0,05 Mikrometer dick (0,00005 mm), aber sie ist nicht porös. Das reicht aus, um die weitere Oxidation zu verunmöglichen. Obwohl Aluminium ein völlig unedles Metall ist, wirkt es daher im täglichen Gebrauch wie ein Edelmetall so lange man einigermaßen pfleglich damit umgeht. Eine ins Wasser gelegte Lasche einer Getränkedose bleibt unversehrt. Die Kehrseite dieser vorteilhaften Eigenschaft liegt darin, dass man Aluminium nur mit sehr hohem Aufwand an elektrischer Energie aus jenem Erz befreien kann, das üblicherweise als Rohstoff dient. Es heißt Bauxit und besteht aus Aluminiumhydroxiden verschiedener Zusammensetzung, beispielsweise aus $Al(OH)_3$. In jeder Getränkedose aus Aluminium steckt daher viel Energie. Vor dem Kauf sollte man sich überlegen, ob man die Dose wirklich braucht, und nach dem kurzen Genuss von Bier oder Cola gehört sie zu den rezyklierbaren Wertstoffen und nicht in den gewöhnlichen Abfall.

Natrium, ein sehr leichtes und weiches Metall, reagiert an der Raumluft, die immer mehr oder weniger feucht ist, sofort zu Natriumhydroxid NaOH. Als Metall ist es so reaktiv, dass es Wasser spaltet:

$$2\ Na + 2\ H_2O \rightarrow 2\ NaOH + H_2$$

Es entsteht Wasserstoffgas, das sich wegen der hohen Reaktionswärme entzündet. Man beobachtet bei diesem (gefährlichen) Experiment, wie ein kleines Stück des Metalls wie wild auf der Wasseroberfläche herumzischt, Feuer fängt und immer kleiner wird, bis es sich verzehrt hat. Im Alltag treffen wir Natrium als Natriumchlorid NaCl in der Küche an; diese Verbindung nennen wir Kochsalz, und sie ist für uns lebensnotwendig, wenn auch nur in kleinen Mengen. Man sieht dem Salz nicht im entferntesten an, dass es die Verbindung aus einem sehr eigenartigen, reaktiven Metall und dem ebenso reaktiven, hochgiftigen Chlorgas ist.

Magnesium ist träger als Natrium. Mit Wasser verläuft die Reaktion zu Magnesiumhydroxid recht langsam. Wenn man ein dünnes, handelsübliches Band des Metalls anzündet, so oxidiert es mit extrem heller Flamme zu Magnesiumoxid MgO, einem weißen, harmlosen Pulver.

Beim Kupfer ist es so, dass es an der Luft seine ursprüngliche rote Farbe nicht lange behält, wie man an Häusern mit neu angebrachten Regenrinnen und anderen Spenglerarbeiten leicht beobachten kann. Die Ursache dafür ist meist nicht eine Reaktion mit Sauerstoff, sondern mit anderen Bestandteilen der Luft wie Kohlendioxid oder Schwefeldioxid. Der immer vorhandene Wasserdampf ist ebenfalls beteiligt. Je nach den lokalen Umständen entstehen Kupfercarbonate, -sulfate, -hydroxide, in Meeresnähe auch Kupferchloride sowie Mischungen all dieser Verbindungen. Die entstehende Patina weist entsprechend ihrer Zusammensetzung verschiedene Grüntöne auf oder ist schwarz. Das weltweit berühmteste Objekt mit grüner Kupferpatina ist die Freiheitsstatue in New York.

Kohlendioxid einfangen und Sauerstoff erzeugen

Zuweilen muss man sich um sein Geld kümmern. Mit einiger Sorge stellte ich fest, dass der Stand meines Bankkontos tiefer war als im selben Monat des Vorjahres. Während ich versuchte herauszufinden, woran das lag, durchzuckte mich ein schrecklicher Gedanke: Wenn ich Sauerstoff ein- und Kohlendioxid ausatme, wenn alle anderen Menschen das auch tun sowie alle Hunde und Tauben und überhaupt alle Tiere, wenn Eisen rostet und auch andere Metalle mit Sauerstoff reagieren – dann ist die Menge Sauerstoff in der Luft jetzt ebenfalls tiefer als vor einem Jahr! Hilfe! Wie lange dauert es, bis aller Sauerstoff aufgebraucht ist? Mir wurde ganz schwummrig, und ich fürchtete um meine Gesundheit.

Von der Zimmerpflanze her hörte ich das verräterische Kichern der Sauerstoffs. Da saßen sie fidel wie immer auf einem Blatt des Gummibaums und schienen meine Sorge überhaupt nicht zu teilen. Das ärgerte mich, und ziemlich barsch warf ich ihnen zu: „Da ich euch nun mal für meine Lebensprozesse benötige und ihr euch zudem mit allen möglichen Materialien einlässt und sie oxidiert, ist es nur eine Frage der Zeit, bis die Luft ohne Sauerstoff daherkommt, und ihr zwei seid dann auch weg! Zudem werde ich das nicht überleben, fürchte ich!“ Dabei guckte ich möglichst böse, was jedoch meine Gesprächspartner nicht im Geringsten beeindruckte.

„Na komm schon“, sagte Sauerstoff Eins, „die Steinzeitmenschen haben genau so geatmet wie du!“ – „Die Dinosaurier auch“, bemerkte Sauerstoff Zwei, „und wir bevölkern noch immer die Luft, hihi! Es gibt da eben einen Trick!“

„Und der wäre? Gibt es irgendwo eine Sauerstofffabrik?“

„Ja, zum Beispiel dieser Gummibaum, oder die Buche vor dem Fenster, oder die Algen im Meer. Die Fabrik produziert allerdings nur, wenn die Sonne scheint.“

„Das soll wahr sein?“ Ich konnte nicht mehr böse gucken. „Erklärung bitte!“

„Pflanzen sind grün, und das hat seinen Grund. Die Blätter enthalten Chlorophyll“ (schon wieder so ein Wort, dachte ich), „man nennt es auch Blattgrün, das kannst du dir besser merken, und diese Moleküle machen das umgekehrte dessen, was das Feuer in deinem

Körper tut. Sie behändigen das Kohlendioxid, welches alle Menschen und Tiere ausatmen, des Weiteren benötigen sie Wasser und wie gesagt Sonnenlicht, und dann erzeugen sie Sauerstoff und Zucker.“

Ich kam ins Sinnieren. „Pflanzen sind demnach so etwas wie Sonnenkollektoren?“

„Genau, sie produzieren aber nicht Strom oder heißes Wasser, sondern Produkte, ohne die du nicht leben könntest.“

Ich war versucht, den Gummibaum zu umarmen.

Die grünen Blätter der Pflanzen enthalten das Molekül Chlorophyll, das interessanterweise ganz ähnlich wie der zentrale Teil des Hämoglobins aufgebaut ist; im Gegensatz dazu enthält es Magnesium anstatt Eisen. Ein Chlorophyll alleine kann jedoch nichts ausrichten; für eine funktionsfähige „Sauerstofffabrik“ werden noch weitere Teile benötigt. Sie besteht aus einer großen Zahl von Chlorophyll-Molekülen, die in eine komplizierte Proteinstruktur eingebettet sind. Das Gebilde (man nennt es Lichtsammelkomplex) kann die Energie von einfallendem Sonnenlicht für die folgende chemische Reaktion nutzen:

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Diese Fotosynthese ist genau der umgekehrte Prozess wie bereits für die Energiegewinnung im tierischen und menschlichen Organismus beschrieben. Pflanzen bauen Zucker aus Kohlendioxid und Wasser auf, und als Nebenprodukt entsteht Sauerstoff. Allerdings verläuft diese Reaktion nicht in einem einzigen Schritt, wie man entsprechend der chemischen Gleichung annehmen könnte. Für die Fotosynthese sind mehrere raffinierte Teilschritte notwendig, und die entstehenden Zwischenprodukte werden von einem Reaktionszentrum zum nächsten weitergereicht.

Bekanntlich sind nicht alle Pflanzen essbar. Es kommt darauf an, in welcher Form der synthetisierte Zucker gespeichert wird. Am Apfelbaum wachsen Äpfel, am Weinstock Trauben, beides Früchte, die offensichtlich Zucker enthalten. In Getreidekörnern werden die Zuckereinheiten zu langen Ketten verbunden, die wir als Stärke

nutzen können. Dagegen bildet die Buche vor dem Fenster Holz, welches vorwiegend aus Zellulose und Lignin besteht. Beide Stoffe können von den meisten Lebewesen nicht verdaut, das heißt zur Energiegewinnung genutzt werden (Holzwürmer und gewisse Pilze bilden die Ausnahmen).

Experiment 4

Wie die Fotosynthese-Gleichung zeigt, bilden Pflanzen die Nahrungsgrundlage für viele Tiere. Zugleich besorgen sie den Sauerstoff-Nachschub für die Luft und entfernen Kohlendioxid. Sie können den Prozess beobachten: Fällt intensives Sonnenlicht in ein Aquarium, das nicht nur Fische sondern auch Wasserpflanzen enthält, so sind die grünen Blätter bald mit Gasbläschen bedeckt. Es sind nicht Luft- sondern Sauerstoffbläschen. Das für die Reaktion nötige Kohlendioxid ist im Wasser vorhanden; es stammt aus dem Stoffwechsel der Fische und aus der Luft, weil es in Wasser gut löslich ist und hinein diffundiert.
Wenn Sie kein Aquarium besitzen, wird die Angelegenheit etwas aufwendiger. Sie möchten ja die Produktion von Sauerstoff beobachten

Die Pflanze atmet Sauerstoff aus, deutlich zu sehen unter Wasser (Foto: V. Meyer).

und nicht irgendwelche Gasbläschen. Für die Fotosynthese wird Kohlendioxid benötigt, deshalb gelingt das Experiment nicht, wenn Sie eine Wasserpflanze in Leitungswasser legen und das Gefäß an die Sonne stellen. Besorgen Sie sich daher eine Flasche Sprudelwasser (Tafelwasser mit Kohlensäure). Wenn Sie ein Glas mit diesem Wasser füllen, perlen hübsche Blasen an die Oberfläche – das Kohlendioxid, mit dem das Tafelwasser beim Abfüllen versetzt wurde. Um dieses Gas nicht mit Sauerstoff zu verwechseln, stellen Sie das Glas einen Tag lang an die Sonne. Dann sollte das Wasser keine spontanen Blasen mehr produzieren, aber immer noch genügend gelöstes Kohlendioxid enthalten. Am nächsten Morgen besorgen Sie sich in einer Zoohandlung oder bei einem Aquarienfreund eine Wasserpflanze, vorzugsweise eine mit großen Blättern. Ohne das Wasser im Glas unnötig aufzuwirbeln, legen Sie die Pflanze hinein; wenn nötig beschweren Sie die Wurzeln mit einem kleinen Stein. Das Glas stellen Sie wieder an die pralle Sonne. Vielleicht lagern sich anfänglich winzige Kohlendioxid-Bläschen überall an die Pflanze. Doch nach einigen Stunden können Sie ansehnliche Sauerstoffblasen auf und unter den grünen Blättern beobachten. Steht hingegen das Glas im Schatten geschieht nichts dergleichen.
Falls Sie es ganz genau wissen wollen, machen Sie gleichzeitig ein Parallel-Experiment: Verwenden Sie zwei Gläser. Ins eine legen Sie am zweiten Tag die Pflanze, ins andere sonst einen Gegenstand. Gut geeignet ist ein feines Kunststoffnetz, wie es für abgepackte Supermarkt-Kartoffeln verwendet wird. Vermutlich werden Sie bald das Netz voller kleiner Bläschen finden. Im Vergleich dazu sind die Blasen auf der Pflanze richtig groß. Im einen Fall handelt es sich um Kohlendioxid oder Luft, im anderen um Sauerstoff.

Experiment 5

Ohne Licht können Pflanzen nicht wachsen, das ist für uns triviales Alltagswissen. Vielleicht haben Sie mal in der Schule ein entsprechendes Experiment durchgeführt, vielleicht nicht. So oder so ist es eindrücklich zu beobachten was geschieht, wenn man Pflanzensamen im Dunkeln keimen lässt. (Obwohl zarte Gemüter dabei das Gefühl haben, Fieslinge zu sein.) Man füllt eine kleine flache Schale mit Erde, sät beispielsweise Gartenkresse oder Küchenkräuter aus, befeuchtet den Mini-Garten und stülpt einen Topf darüber. Alternativ kann man

die Schale in einen Raum ohne Tageslicht stellen. Die Erde muss feucht gehalten werden, deshalb täglich gießen. (Dass dabei während einer halben Minute Licht auf das Experiment fällt, hat keinen Einfluss auf das Ergebnis.) Was geschieht nach wenigen Tagen? Die Samen keimen, sie entwickeln einen Stängel mit den Keimblättern, die aber blassgelb und nicht grün sind. Sonst ist nichts zu beobachten. Weitere Blätter oder gar kleine, kräftige Pflanzen entstehen nicht.
Für die Synthese des Chlorophylls ist zwingend Licht notwendig. Das bedeutet: ohne Licht kein Blattgrün, kein Einfang von Kohlendioxid, keine Synthese von Zucker und kein Wachstum. Aus diesem Grund müssen verbotene Indoor-Hanfplantagen intensiv beleuchtet werden. Manchmal kommt man den Hanfgärtnern auf die Schliche, weil plötzlich ihr Stromverbrauch viel höher als vorher ist.

Kresse keimt nach wenigen Tagen. Dies hier sind Pflänzchen, die im Dunkeln gekeimt sind. Wenn das im Licht geschehen wäre, würden sie natürlich viel grüner und auch etwas stattlicher aussehen. (Foto: V. Meyer).

Sauerstoff uralt

Die Sauerstoffs schienen auf jede Frage die Antwort zu kennen. Obwohl ich von ihnen bereits eine ganze Menge gelernt hatte, kam ich mir dennoch ziemlich unwissend vor, was mich ärgerte. Ich beschloss, ihnen bei der nächsten Gelegenheit eine besonders schwierige Frage zu stellen.

Ich hatte meine betagten Großeltern besucht und setzte mich auf dem Rückweg im Stadtpark auf eine Bank. Die Vergänglichkeit aller Menschen und Lebewesen war mit wieder einmal bewusst geworden. Doch die Sauerstoffs waren keine Lebewesen... Als hätten sie meine Gedanken gelesen, saßen sie plötzlich neben mir. Ohne sie zu begrüßen, schoss ich los: „Woher kommt ihr? Wer hat euch gemacht? Wie alt seid ihr?“

„Ein alter, großer Stern hat uns gemacht“, sagte Sauerstoff Eins mit unverhohlenem Stolz. „Nukleosynthese heißt das“, fügte Sauerstoff Zwei wichtigtuerisch an. „Es war sehr, sehr heiß, und wir wurden beinahe zerdrückt. Aber dann schleuderte uns eine gewaltigen Explosion in den Weltraum, und unsere abenteuerliche Reise konnte beginnen.“

„Ein Stern wie die Sonne?“

„Nein, der war viel größer als die Sonne dieses Planetensystems. Deine Sonne war damals noch nicht einmal geboren!“

„Wann war denn das? Beim Urknall?“

Das war wieder eine jener Fragen, welche die Sauerstoffs ungemein lustig fanden. Sie überkugelten sich auf der Bank und belehrten mich schließlich: „Beim Urknall gab es noch keinen Sauerstoff. Wir sind viel jünger als der Urknall, aber viel älter als deine Sonne.“

„Ich bitte um genauere Angaben!“

„So detailliert erinnern wir uns nicht mehr, aber acht Milliarden Jahre sind schon etwa vergangen seit unserer Synthese.“

Da wurde mir schon wieder eine Tatsache serviert, die jedes menschliche Vorstellungsvermögen übersteigt. Vielleicht werde ich achtzig Jahre alt, jedenfalls ist das eine überschaubare Zeitspanne. Vor achthundert Jahren wurden manchenorts Städte gegründet, die heute noch existieren. Vor achttausend Jahren begannen die Steinzeitmenschen mit Ackerbau und Viehzucht. Vor acht Millionen Jahren gab es noch gar keine Menschen. Aber acht Milliarden Jahre sind nichts anderes als unvorstellbar.

Vor 13,8 Milliarden Jahren startete die Entwicklung unseres Universums aus einem Urknall heraus. Schon eine Sekunde bis einige Minuten später, als die Temperatur unterhalb von 10 Milliarden Grad gefallen war, konnten sich die bereits früher gebildeten Protonen und Neutronen zu Atomkernen verbinden. Das war die primordiale Nukleosynthese, die Elemententstehung kurz nach dem Urknall. Berechnungen zeigen, dass die leichten Atomkerne im frühen Universum klar im Vorteil waren: Kerne wie die von Wasserstoff und Helium. Beide bestehen aus kleinen Atomen: Wasserstoff besitzt in seinem Kern bloß ein Proton, Helium hat immerhin je zwei Protonen und Neutronen.

Dank der Gravitation ballten sich die Wolken dieser beiden Gase zu den ersten Sternen zusammen. Sterne leuchten, weil sie in ihrem Inneren bei hoher Temperatur und hohem Druck weiteres Helium erzeugen. Für die Synthese eines Heliumatoms werden vier Wasserstoffatome benötigt, von denen zwei in Neutronen verwandelt werden. Das Produkt ist etwas leichter als vier Wasserstoffatome es sind, und die Massendifferenz wird in Energie umgewandelt. (Erinnern Sie sich an Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$, die besagt, dass sich Masse und Energie ineinander umwandeln lassen.) Dies ist der Prozess, der zurzeit in unserer Sonne abläuft und uns mit Licht und Wärme versorgt. Er begann vor etwa 4,6 Milliarden Jahren und wird mindestens nochmals so lange andauern.

Hat ein Stern seinen Vorrat an Wasserstoff aufgebraucht, so kommen andere Prozesse in Gang. Aus drei Heliumatomen (mit je zwei Protonen und Neutronen) entsteht ein Kohlenstoffatom (mit je sechs Protonen und Neutronen). Aus einem Kohlenstoff- und einem Heliumatom entsteht ein Sauerstoffatom, das bekanntlich je acht Protonen und Neutronen enthält. (Stickstoff entsteht ebenfalls durch Nukleosynthese, und weil dieses Gas viel weniger reaktionsfreudig ist als Sauerstoff, reicherte es sich in der irdischen Atmosphäre an.)

Es hängt von der Größe des Sterns ab, was weiter geschieht. Unsere Sonne ist nicht besonders groß, und sie wird als „Weißer Zwerg“ enden, als kleiner, sehr kompakter, alter Stern mit hoher Temperatur, aber – aufgrund seiner Kleinheit – geringer Leuchtkraft. Weitere Atomsorten wird sie nicht synthetisieren.

Große Sterne erzeugen im Laufe ihrer Existenz auch alle weiteren Elemente. Es kommt zu Implosions- und Explosionsereignissen, das heißt, die Materie des Sterns fällt zusammen und in der weiteren Folge auseinander. Sternenmaterial wird in den Weltraum geschleudert. Jede Materie, aus denen die Erde zusammengesetzt ist, damit auch der Sauerstoff, entstand in einem Vorgängerstern der Sonne, der größer war als unser Zentralgestirn und seine Syntheseprodukte in einer gewaltigen Explosion freisetzte. Vielleicht geschah das vor acht Milliarden Jahren, wer weiß das schon? Nach und nach rottete sich dieses Material wieder zu neuen Sternen und Planetensystemen zusammen. In einem davon leben wir.

Eine Sauerstoff-Erde

Im Frühjahr hatte ich auf einem kleinen Streifen des Gartens Kartoffeln gesetzt. Die Pflanzen hatten sich prächtig entwickelt, und jetzt kam die Zeit der Ernte. Ich buddelte die Knollen mit bloßen Händen aus dem Boden und freute mich auf leckere Kartoffelgerichte. Ist es nicht etwas Besonderes, dass unser Planet gleich heißt wie das braune Zeug, in dem ich wühlte? Woraus besteht die Erde?

Wie gerufen tanzten die Sauerstoffs über die Furchen und blieben vor mir stehen. Heute schienen sie mir besonders aufgedreht zu sein. Ich täuschte mich nicht: „Wir sind die wichtigsten“, riefen sie im Duett, „von uns gibt es am meisten!“

„Wovon sprecht ihr?“

„Vom Planeten Erde. Fast ein Drittel seiner Masse besteht aus Sauerstoff, und wenn man seine Atome zählt, ist fast jedes zweite eines unserer Geschwister!“

„In der Luft seid ihr jedenfalls in der Minderheit, habt ihr mir erzählt.“

„Ja, aber die Erde besitzt gar nicht besonders viel Luft.“ Das schien mir beängstigend, diese Frage musste geklärt werden, aber vorerst wollte ich wissen, wo denn alle diese Sauerstoffatome stecken sollten, von denen meine Gesprächspartner so vollmundig sprachen.

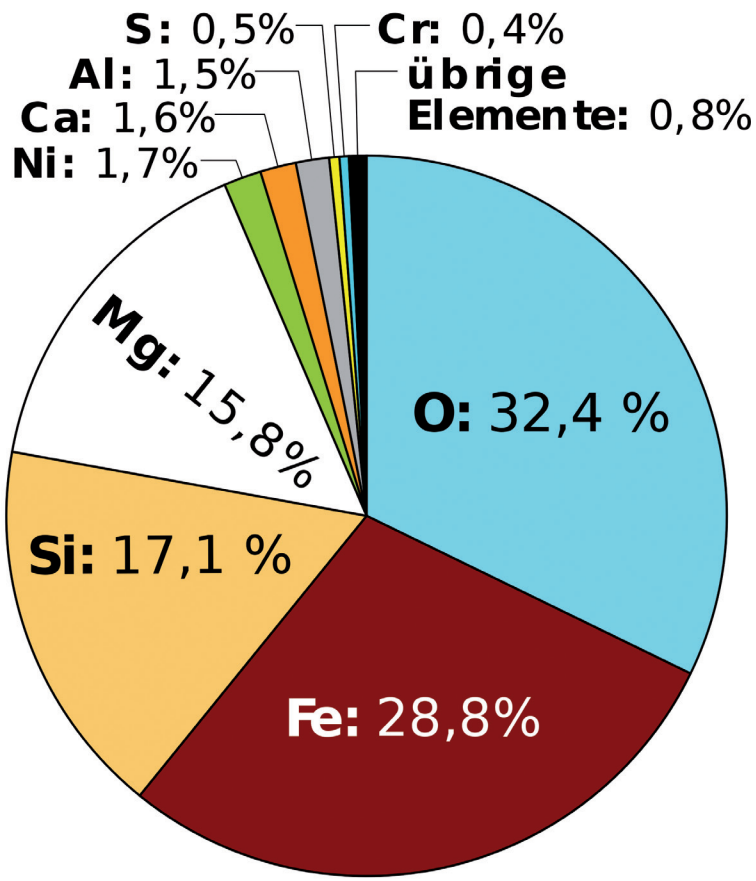
„Das Wasser der Ozeane, Flüsse und Eisschilde enthält Sauerstoff, wie du weißt, aber vor allem findet man das Element in jedem Stein nebst anderen Atomen. Die Erde ist ein Steinplanet. Zuinnerst hat sie einen Kern aus Eisen und Nickel, aber weiter außen besteht sie aus Gestein. Das Zeug, in dem du da buddelst, ist voller Sauerstoff!“

Ich blickte auf meine schmutzigen Hände und hatte Mühe, das Gehörte zu verstehen. Glücklicherweise lagen im Korb die hübschen neuen Kartoffeln, deren Anblick mich in meine Realität zurückholte, in der ich Feldfrüchte und nicht Atome zählte.

Die Masse der Erde besteht zu 32 % aus Sauerstoff, dann folgen Eisen mit 29 %, Silicium mit 17 % und Magnesium mit 16 %. Weit abgeschlagen steht Nickel mit 1,7 % auf Platz fünf, und alle anderen Elemente kommen weniger häufig vor (nach: C. Allègre, G. Manhès, É. Lewin: Chemical composition of the Earth and the volatility control on planetary genetics. In: Earth and Planetary Science Letters. 185, 2001, S. 49–69).

Folglich ist Sauerstoff das häufigste Element unseres Planeten. Wenn man aber die Massenanteile in Atomanteile umrechnet, wird der Vorsprung von Sauerstoff noch größer. Ein Eisenatom besteht aus 26 Protonen und 30 Neutronen, ist also viel schwerer als ein Sauerstoffatom, und ähnliches gilt für die übrigen der genannten Elemente. In Atomanteilen über die ganze Erde gerechnet lauten die Zahlen: Sauerstoff 48 %, Magnesium 16 %, Silicium 15 %, Eisen 15 %, Nickel weniger als 1 %. Tatsächlich ist fast jedes zweite Atom, das auf und in der Erde vorhanden ist, ein Sauerstoffatom.

Wo steckt all dieser Sauerstoff? Dass er einen großen Anteil in Luft (21 %) und Wasser (H_2O mit 89 Massen- beziehungsweise 33



Häufigkeit chemischer Elemente in der gesamten Erde (Massenanteil; Abb.: Henry Mühlpfordt).

Atomprozent Sauerstoff) bildet wurde bereits dargestellt. Luft und Wasser haben jedoch an der Gesamtmasse der Erde bloß einen winzig kleinen Anteil. Der Sauerstoff steckt vor allem in den Gesteinen der Erde, welche sich zwischen dem Eisen-Nickel-Kern und der Erdoberfläche befinden.

Ein Gestein besteht aus einem Konglomerat von verschiedenen Mineralien, wogegen ein Mineral ein chemisch reiner Stoff von definierter Zusammensetzung und einheitlicher Kristallstruktur ist. Man sieht das beispielsweise gut an einem Stück Granit. Seine Farbe ist nicht uniform, und man kann von bloßem Auge unterschiedliche Körner oder kleine Kristalle erkennen, die zusammengebacken sind und miteinander den festen Steinbrocken bilden. Es sind drei verschiedene Mineralien vorhanden: Feldspat, Glimmer und Quarz. Feldspat ist ein kompliziert aufgebautes Silikat aus Kalium oder Natrium, Aluminium, Silicium und Sauerstoff; seine chemische Formel kann $KAlSi_3O_8$ lauten (Kalifeldspat), was bedeutet, dass acht der total dreizehn Atome Sauerstoff sind.

Glimmer kann eine ähnliche Zusammensetzung wie Feldspat aufweisen, aber in den jeweiligen Kristallgittern gibt es große Unterschiede; Glimmer ist relativ weich und gut spaltbar. Quarz ist Siliciumdioxid SiO_2. Insgesamt ist Granit ein Gestein mit viel Sauerstoff.

Ein ganz anderes Gestein ist Kalk, der aus Calciumcarbonat $CaCO_3$ besteht – auch in diesem Fall überwiegt der Sauerstoff mit 48 Massen- beziehungsweise 60 Atomprozent.

Es gibt allerdings Mineralien die keinen Sauerstoff enthalten. Beispiele sind Diamant (aus Kohlenstoff bestehend), Goldflitter und -klumpen, Pyrit (Eisensulfid, Katzengold) oder Steinsalz (unser Tafelsalz Natriumchlorid). Mengenmäßig sind sie in der Erde unbedeutend.

Das Erdreich, in dem die Kartoffeln und anderen Pflanzen wachsen, besteht im Gegensatz zu den Gesteinen aus einer vielfältigen Mischung von feinkörnigen Mineralien, organischen Stoffen (Kohlenhydrate, Lignin, Zersetzungsprodukte aus Verwesung), Wasser, Luft und einem ganzen Zoo von Bodenlebewesen und Bakterien. Auch da ist überall Sauerstoff in freier und gebundener Form vorhanden.

Die frühe Atmosphäre

Beim Zusammenfalten und Einräumen von frisch gewaschener und getrockneter Wäsche konnte ich meinen Geist einmal mehr frei schweifen lassen. Bald tauchte ein beunruhigender Gedanke auf: Die Erde besitze nicht besonders viel Luft, hatten die Sauerstoffs gesagt. Hastig atmete ich ein paarmal tief ein und aus, als ob ich mir auf diese Weise meinen Anteil am lebensnotwendigen Gas sichern könnte.

„Uns scheint, du seist nervös“, feixten die Sauerstoffs von einer Zimmerecke her. „Was ist los mit dir?“ Jetzt saßen sie auf dem Wäschestapel, im Gegensatz zu mir sehr entspannt.

„Ich frage mich, ob es die Luft schon immer gab. War die Erde seit jeher damit ausgestattet?“

„Sprechen wir lieber von Atmosphäre als von Luft. Das ist wirklich eine höchst interessante Geschichte. Vor Urzeiten waren es die Vulkane, welche allerlei Gase in die Atmosphäre spuckten. Vulkane gibt es noch heute, und vielleicht ist dir bekannt, dass die stinkendes und giftiges Zeug produzieren, was die Gase betrifft, jedenfalls keinen Sauerstoff.“

„Ich hätte damals nicht leben können?“

„Nein, weder die Menschen noch die Tiere noch die grünen Pflanzen. Es gab zwar bereits Leben, aber das waren eigenartige Bakterien, die nur an speziellen Orten im Meer gedeihen konnten, wo sie ihre Energie aus urtümlichen chemischen Reaktionen gewannen und sich vermehrten.“

Bereits früh in der Geschichte der Erde entstand durch Vulkanismus eine Atmosphäre aus Wasserdampf, Kohlendioxid und Schwefelwasserstoff sowie etwas Stickstoff, Ammoniak, Methan und anderen Gasen. Als sich die ursprünglich heiße Erde abkühlte, wurde der Wasserdampf weitgehend ausgeregnet, und die Ozeane entstanden. Das Kohlendioxid löste sich zum größten Teil im Wasser.

Die ersten bekannten Lebewesen, die Archaeen (auch Archaebakterien oder Urbakterien genannt) entstanden vor vielleicht dreieinhalb Milliarden Jahren im Meer. An der Erdoberfläche konnten sie nicht leben, weil diese der ganzen Bandbreite an ultravioletter

Strahlung, welche die Sonne in den Weltraum freisetzt, gnadenlos ausgesetzt war. Je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher und damit schädlicher ist diese Strahlung. Kurzwelliges UV-Licht zerstört jedes Molekül, aus denen alle Lebewesen aufgebaut sind, und längerwelliges erzeugt bei uns Sonnenbrand und kann zu Hautkrebs führen, wenn wir uns ungeschützt und zu lange an den Strand oder in ein Solarium legen.

Immerhin kann kurzwelliges UV-Licht Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff spalten, und in Folgereaktionen entstand in der frühen Atmosphäre etwas Ozon (O_3). Im Verbund mit dem Wasser der Ozeane, welches bei genügender Tiefe das schädliche UV-Licht absorbiert, konnten vor über drei Milliarden Jahren in den Meeren Archaeen entstehen, oft an extremen Standorten. Es gibt auch heute noch Urbakterien, welche bei Temperaturen bis 80 °C, bei sehr hohem Druck, in saurem oder alkalischem Milieu oder bei hoher Salzkonzentration gedeihen. Ihren Stoffwechsel bestreiten sie mit Reaktionen, an denen Kohlendioxid, Wasserstoff, Methan, Eisen oder Schwefel beteiligt sind. Allerdings sind diese Prozesse energetisch nicht besonders attraktiv.

Stickstoff reicherte sich in der Gashülle der Erde durch die vom UV-Licht betriebene Zersetzung von Ammoniak (NH_3) und durch die Stoffwechselvorgänge der Urbakterien an. Von einer Atmosphäre mit Sauerstoff noch keine Spur...

Sauerstoff in der Atmosphäre!

Das war schwierig zu verstehen: eine junge Erde aus Sauerstoff-Gestein, wenn man vom metallischen Kern absah, aber kaum Sauerstoff in ihrer Gashülle. Und heute besteht die Atmosphäre zu einem guten Fünftel aus diesem Element. Ich stocherte in Kartoffelpuffer und Fleischbällchen, die ich als Abendbrot zubereitet hatte, und war einmal mehr ratlos. Wie kam der Sauerstoff in die Luft? Wann war dies geschehen?

Und schon räkelten sich die quasselnden Sauerstoffs auf dem Fensterbrett. „Nach der langen Zeit, da es nur wenig Leben auf der Erde, und selbiges nur im Wasser gab, kam endlich Betrieb in die Bude. Vor etwa drei Milliarden Jahren entstanden neuartige Bakterien, welche mit Hilfe des Sonnenlichts Fotosynthese betreiben konnten. Energetisch war das günstiger als der Stoffwechsel der früheren Bakterien. Wie in den heutigen Pflanzen wurde dabei Sauerstoff quasi als Abfallprodukt erzeugt. Anfänglich wurde er sogleich von allerhand oxidierbaren Stoffen, die im Meer vorhanden waren, aufgebraucht. Doch irgendwann war alles oxidiert, was herumschwamm. Die Bakterien setzten die Sauerstoffproduktion fort, weil sie für ihre Energiegewinnung unabdingbar war, und der überschüssige Sauerstoff gelangte in die Atmosphäre.“

„Das kann doch nicht die ganze Geschichte gewesen sein. Jetzt gibt es Landlebewesen, damals aber noch nicht. Warum konnte das Leben aus dem Wasser kriechen und sich auf dem Land breitmachen?“, fragte ich mit vollem Mund. Ich war so neugierig, dass ich die üblichen Höflichkeitsregeln missachtete. „Ich denke, dass die Sonne nach wie vor aggressives UV-Licht zur Erde schickte.“

„Da hast du Recht, und das tut sie auch heute noch. Aber zugleich mit der Anreicherung von Sauerstoff in der Atmosphäre entstand hoch oben in der Gashülle der Erde auch ein Schutzschild aus Ozon. Das sind Moleküle mit drei Sauerstoffatomen, eine ziemlich spezielle Verbindung, für deren Synthese UV-Licht benötigt wird. Die schädliche Strahlung wird dabei absorbiert und kann die Erdoberfläche nicht erreichen. Die Ozonschicht schützt das Leben vor dem energiereichen UV-Licht! Clever, nicht wahr?“

Ich schaute durchs Fenster in den mildblauen Himmel hinauf und konnte nichts Besonderes erkennen. Und doch gab es da oben einen Schild, dank dem das Leben die Inseln und Kontinente hatte erobern können.

Wie das Leben auf der Erde entstand, konnte bisher nicht entschlüsselt werden, und es ist gut möglich, dass man das nie herausfinden wird. Unbestritten ist, dass dies im Wasser geschah, weil das Leben im damaligen Sonnenlicht nicht gedeihen konnte.

Die Energieausbeute der Stoffwechselvorgänge in den Archaeen war nicht besonders hoch, doch genügte sie für das Überleben und die Fortpflanzung. Bereits mit den ersten Organismen kam natürlicherweise die Evolution in Gang, weil Fehler beim Kopieren der Erbsubstanz (die Mutationen) selten, aber zuweilen eben doch zu Organismen mit einem Überlebensvorteil führten. Und im Verlauf von hunderten Millionen Jahren entstanden neuartige Bakterien, welche das Sonnenlicht für die Fotosynthese nutzen konnten. Man nennt sie wegen ihrer blauen Farbe Cyanobakterien. Die Synthese von Zucker oder sonst einem organischen Material aus Wasser und Kohlendioxid fängt die Energie des Lichts sehr effizient ein. Und das besonders Interessante: Die „Rohstoffe“ für die Fotosynthese waren überall im Meer vorhanden, während die Archaeen auf vergleichsweise knappe Elemente wie Eisen oder Schwefel angewiesen waren.

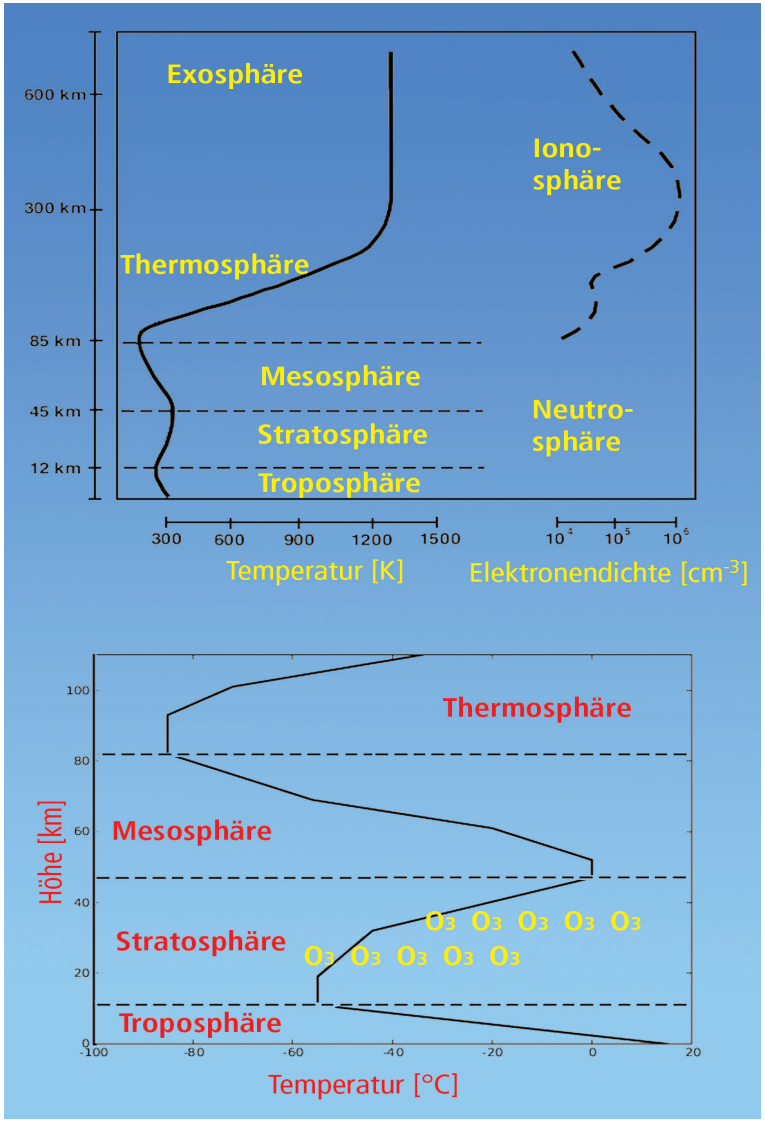
Auch die neuen Bakterien wären an Land vom intensiven UV-Licht zu Tode bestrahlt worden, aber offenbar eigneten sich die Habitate knapp unter der Wasseroberfläche für das Einfangen des „guten“ Lichts, und zusätzlich schützten zelleigene Stoffe die Bakterien vor zu viel „schlechtem“ Licht. Nebst den Cyanobakterien existierten in den obersten Wasserschichten auch bereits die ersten grünen Algen, welche ebenfalls Fotosynthese betrieben.

Es gab demnach Organismen, welche nach der Devise lebten: Aus Kohlendioxid, Wasser und Licht mache Zucker und Sauerstoff. Vorerst wurden während hunderten von Millionen Jahren das im Meerwasser gelöste Eisen und andere Stoffe oxidiert. Davon zeugen heute uralte Eisenoxid-Gesteine. Der neu entstandene Sauerstoff wurde fortwährend von diesen Prozessen aufgebraucht. Das dauerte so lange, bis in der Umwelt kaum mehr Material vorhanden

war, das oxidiert werden konnte. Ungeachtet dieser Tatsache setzten die Cyanobakterien und Algen ihre Sauerstoffproduktion eifrig fort, und das Gas reicherte sich in Meer und Luft an.

Ein schrecklicheres Unglück hätte den übrigen Organismen im Wasser nicht geschehen können, Für sie war Sauerstoff pures Gift. Deshalb kam es vor etwa zweieinhalb Milliarden Jahren zu einem Massenaussterben, so dass die heutige Forschung von der Großen Sauerstoffkatastrophe spricht. Die Bakterien, welche Sauerstoff nicht ertragen (die sogenannten Anaerobier) konnten nur an speziellen Orten, meist in großer Tiefe überleben.

Doch nach und nach sammelte sich in der Gashülle der Erde eine bedeutende Menge Sauerstoff an. Und aus einem geringen Teil davon bildete sich in 15 bis 30 Kilometer Höhe die Ozonschicht, welche verhindert, dass kurzwelliges UV-Licht zur Erdoberfläche gelangen und das dortige Leben zerstören kann. Vor 470 Millionen Jahren schuf die Evolution die ersten Landpflanzen, nämlich Moose und Flechten, welche ebenfalls nach Kräften mithalfen, die Luft mit Sauerstoff zu versorgen.



Struktur der Atmosphäre: Abhängigkeit der Temperatur bzw. Elektronendichte von der Höhe (Abb.: Rubikon).

Die heutige Atmosphäre

„Luft ist nicht nichts!“, hatten die Sauerstoffs bei einem ihrer ersten Besuche behauptet. Wie wahr, dachte ich, als ich sonntags am Seeufer saß und den Möwen zuschaute, wie sie zuweilen ruhig dahinsegelten und gleich darauf einen kühnen Sturzflug hinlegten, um einen Bissen Futter zu erwischen. Vögel tummeln sich in der Luft wie Fische im Wasser. Dann kam mir meine Reise auf die Zugspitze vor einigen Jahren in den Sinn. Oben war ich aus der Bahn gestiegen und hatte eine Treppe hinauf hasten wollen, aber ich war ins Schnaufen gekommen wie ein Hund, der Stöckchen apportiert. Ich war froh gewesen, dass ich trotz der Menschenmenge auf der Terrasse einen freien Sitzplatz fand und hatte mich erst einmal erholen müssen. Es gab eindeutig nicht beliebig viel Luft auf der Erde, sonst hätte ich mich dort oben ebenso wohl gefühlt wie hier am See unten.

Die Sauerstoffs schienen den schönen Tag auf ihre Weise zu genießen. Als ich wieder auf das Wasser blickte, kamen sie auf einer Welle angeritten. Bei deren letztem Brecher hüpften sie elegant in den Sand und fragten: „Hallo, hast du Sorgen? Bei diesem herrlichen Wetter?“

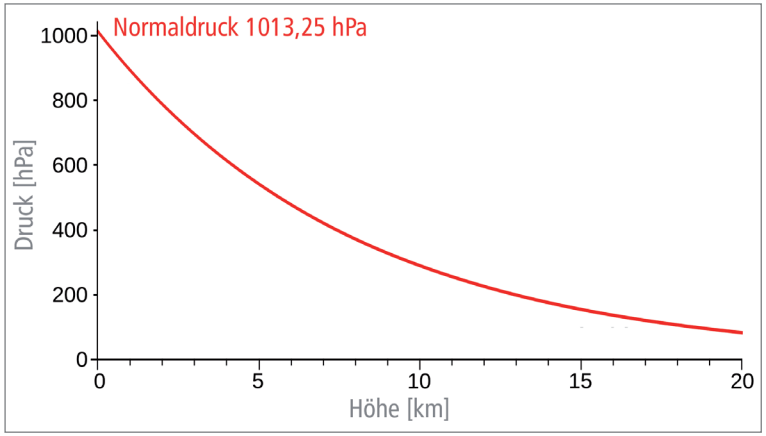
„Ich will jetzt endlich wissen, wie viel Luft wir eigentlich haben. Auf hohen Bergen ist sie jedenfalls ziemlich dünn. Reicht das wirklich für alle Menschen und Tiere? Und mit dem bisschen Kohlendioxid das sie enthält, auch für alle Pflanzen?“

Diese Frage fanden die Sauerstoffs nicht lustig, ganz im Gegensatz zu unseren früheren Unterhaltungen, bei denen sie immer ihren Riesenspaß mit meiner Unwissenheit gehabt hatten.

„Das sagen wir dir gerne. Die Masse der gesamten Erdatmosphäre beträgt fünf Millionen Gigatonnen, das ist eine Fünf mit fünfzehn Nullen – ganz schön viel Luft, nicht wahr? Aber das bedeutet nur einen Millionstel der Erdmasse – ganz schön wenig.“

„Wie hoch reicht denn die Atmosphäre hinauf?“

„Das lässt sich nicht genau sagen. Wie du selber gemerkt hast, nimmt ihre Dichte nach oben hin ab. Eigentlich hört sie erst in etwa 10 000 Kilometern Höhe auf, denn weiter oben sind so gut wie keine Moleküle mehr zu finden. Doch bereits in zehn Kilometer Höhe könntest du unmöglich ohne Atemgerät überleben, auch wenn du dich noch so sorgfältig akklimatisiert hättest!“



Der Luftdruck fällt, je höher man ist. 1013,25 hPa definiert man als Normaldruck auf Meereshöhe (Abb.: Rubikon).

„Aber zehn Kilometer sind nicht viel. Das laufe ich hier dem Strand entlang in zwei Stunden."

„Ganz meiner Meinung", sagte Sauerstoff Eins, „nicht viel Luft da oben."

„Aber genug für alle Menschen, Tiere und Pflanzen", sagte Sauerstoff Zwei. Nach einer Weile fügte er an: „Wenn ihr Sorge trägt dazu."

Auf Meereshöhe wiegt ein Kubikmeter Luft etwa 1,25 Kilogramm. Am Meeresstrand lastet die Luft mit einer Gewichtskraft von fast genau 10 Tonnen auf einem Quadratmeter Erdoberfläche. Das Phänomen „Kraft pro Fläche" beschreibt man praktischerweise mit einem speziellen Begriff, dem „Druck". Seine Einheit lautet heute Pascal, aber auch bar ist noch in Gebrauch, und früher sprach man von Atmosphäre. Das Pascal ist allerdings ein sehr kleines Maß. Die 10 Tonnen pro Quadratmeter auf Meereshöhe ergeben 100 000 Pascal oder 1 bar. Damit man den wechselnden Luftdruck mit praktischen Zahlen ohne Kommastellen bezeichnen kann, sprechen die Meteorologen von Millibar (mbar) oder heutzutage von Hektopascal (hPa), was die gleichen Zahlenwerte ergibt: 1000 mbar oder 1000 hPa auf Meereshöhe – aber nur wenn es gerade so passt. Bei heißem Wetter steigt die Luft in die Höhe und der Druck

sinkt, bei kaltem Wetter ist es umgekehrt. Das bewirkt Bewegung in der Atmosphäre, die wir als Wind oder Sturm erleben. Diese Durchmischung wird von der Sonne angetrieben. Wer in Bremerhaven wohnt und ein Barometer besitzt stellt fest, dass der Luftdruck deutlichen Schwankungen unterliegt und nur im Mittel etwa 1000 hPa beträgt.

Nebst der Beeinflussung durch das Wetter ist der Luftdruck auch von der Höhe über Meer abhängig. Auf der Zugspitze beträgt er etwa 700 hPa, auf 5600 m (etwas weniger als die Höhe des Kilimandscharo) die Hälfte und auf dem Mount Everest noch ein Drittel des Drucks auf Meereshöhe. Des weiteren wird der Luftdruck noch durch die Tatsache beeinflusst, dass sich die Atmosphäre nicht gleichmäßig um die Erde schmiegt, sondern wegen deren Rotation an den Polen etwas abgeflacht und am Äquator ein wenig dicker ist. Allerdings ist es am Äquator warm und daher der Luftdruck an einem dortigen Meeresstrand in der Regel tiefer als in Bremerhaven.

Die Zusammensetzung des Luftgemischs mit 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und einigen anderen Gasen bleibt bis in etwa 90 km Höhe unverändert. Weiter oben reichern sich die leichten Gase Wasserstoff und Helium an, was aber für uns irrelevant ist. Doch von höchster Wichtigkeit für das Leben auf der Erde ist die Ozonschicht in etwa 20 km Höhe.

Im übrigen gibt es verschiedene Definitionen, wie weit hinauf die Atmosphäre reicht. Es kommt darauf an, bei welcher Dichte von Atomen und Molekülen man diese Bezeichnung überhaupt noch gebrauchen will. Die von den Sauerstoffs erwähnten 10 000 km sind großzügig bemessen und markieren die definitive Grenze zum Weltraum. Für die Luftfahrt reicht die Atmosphäre bis 100 km hinauf, für die NASA sogar bloß bis 80 km.

Experiment 6

Sie können die Abnahme des Luftdrucks mit zunehmender Höhe leicht selber beobachten (abgesehen von Kurzatmigkeit und Kopfschmerzen auf Gipfeln wie der Zugspitze), indem Sie auf einem hohen Berg eine leere Getränke-PET-Flasche gut verschließen und sie im Tal unten wieder begutachten. Eine Höhendifferenz von 1000 Metern oder mehr ist für dieses Experiment günstig. Wenn es in Ihrer Umgebung keine richtigen Berge gibt genügen auch 500 Meter, wobei der Effekt allerdings relativ schwach

ist, oder Sie schauen sich die Sache bei Ihrem nächsten Urlaub in den Alpen an. Was ist zu beobachten? Die Flasche ist wegen des höheren Luftdrucks im Tal zusammengedrückt.

Wenn Sie noch genauer beobachten wollen, können Sie das „fehlende" Luftvolumen messen, ähnlich wie im ersten Teil in Experiment 2 beschrieben (Kapitel „Rost"). Füllen Sie ein Becken mit Wasser. Tauchen Sie die Flasche mit dem Verschluss nach unten wenige Zentimeter tief senkrecht ins Wasser und drehen Sie langsam den Deckel so weit auf, dass Wasser einströmen kann. Die Flasche nimmt wieder ihre normale Form an. Immer noch in senkrechter Position schrauben Sie den Deckel unter Wasser wieder zu und stellen die Flasche auf den Tisch. Es befindet sich jetzt so viel Wasser darin, wie es dem Luftdruckunterschied entspricht. Je höher oben Sie waren, desto mehr Wasser ist in der Flasche.

Am imposantesten ist der Effekt in unseren Breiten, wenn Sie die leere PET-Flasche der Luft auf dem Mont Blanc aussetzen, den Deckel fest zuschrauben und sie später am Meeresstrand begutachten. (Falls Sie nicht selber auf den Mont Blanc steigen können, so suchen Sie einen Bergsteiger, der die Flasche für Sie mitnimmt.)

Beim abgebildeten Experiment wurden die Flaschen auf 2500 Meter Höhe verschlossen und auf 700 Meter Höhe fotografiert.

Verschlossene, nur mit Luft gefüllte PET-Flaschen reagieren auf Höhenänderungen (Foto: V. Meyer).

Die Ozonschicht

Was war da los? Eben hatte ich mich mit einem dicken Roman, der stundenlangen Lesegenuss versprach, in den bequemsten Sessel verkrochen. Das Vergnügen dauerte nicht lange, weil sich in meinem Hals plötzlich ein scharfer Hustenreiz bemerkbar machte. Zudem breitete sich ein stechender Geruch im Zimmer aus. Ich schaute mich um und suchte nach der Ursache.

Da räkelte sich ein Ding auf dem Beistelltisch, bei dem es sich um eine Art Sauerstoff handeln musste, denn es bestand aus den wohlbekannten transparenten, miteinander verschmolzenen Kugeln, aber sie waren zu dritt, und das Gebilde schimmerte blau. Die drei Atome standen nicht in einer geraden Linie, sondern hatten sich zu einer gewinkelten Struktur arrangiert. Ich starrte sie an und musste heftig husten. „Seid ihr verrückt?", keuchte ich.

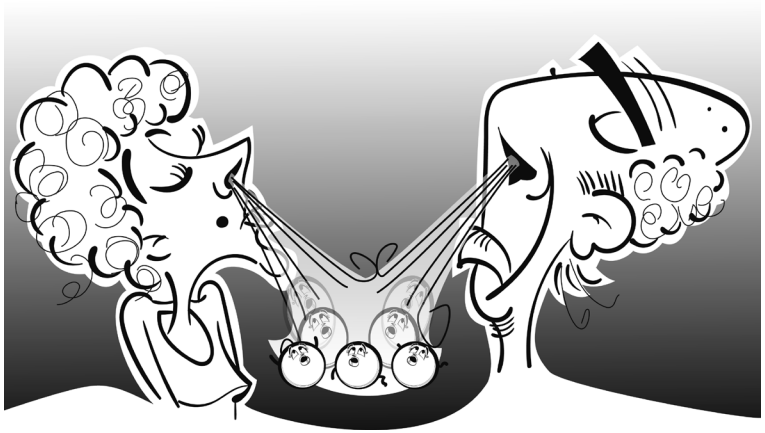
„Oh, sorry, wir wollten dich nicht belästigen. Tut uns leid, dass du husten musst, aber wir gehen gleich wieder. Wir haben dir doch vom Ozon-Schutzschild hoch oben in der Atmosphäre erzählt. Zu dritt heißen wir Ozon, wir kommen direkt von dort und haben uns beeilt, damit wir es zu dir hinunter schaffen, bevor wir uns wieder trennen müssen. Unser Arrangement ist nämlich ein bisschen wacklig..."

Das hätten sie nicht betonen müssen. Auch für mich war es augenscheinlich, dass diese ménage à trois nicht besonders stabil war. Die Händchen der Atome schienen hin und her zu springen, als könnten sie sich nicht entscheiden, mit wem sie eine Bindung eingehen wollten. Meine Neugier war stärker als der Hustenreiz: „Wie seid ihr denn entstanden?"

„Die Sonnenstrahlung ist dort oben so stark, dass sie die Bindung der gewöhnlichen Sauerstoffs aus zwei Atomen brechen kann. Aber ein einzelner Sauerstoff ist wild auf Gesellschaft. Er stürzt sich auf das nächstbeste Paar seiner Kumpane und erzwingt den Beitritt. Niemandem ist richtig wohl dabei, aber eine Weile halten wir es schon miteinander aus. Und du profitierst davon!"

„Ja, ich erinnere mich: Ihr schützt mich vor gefährlichem UV-Licht."

„Richtig! Die Energie der kurzwelligen UV-Strahlen ist so hoch, dass sie die Bindung der Sauerstoffmoleküle lösen kann, und damit ist die Strahlung unschädlich gemacht. Aus drei Sauerstoffs können



zwei Ozons entstehen. Weil diese nicht besonders lange leben, gelangen sie kaum bis zur Erdoberfläche. Doch für dich haben wir eine Ausnahme gemacht. Damit du wirklich glaubst, dass es uns gibt!“

„Somit gibt es dort oben einen lustigen Ringelreihen aus Sauerstoffs und Ozons?“

„Eigentlich schon, aber seit einigen Jahrzehnten treiben sich da auch Schädlinge herum, die es früher nicht gab. Ihr Menschen habt sie gemacht. Sie machen den Schutzschild kaputt!“

Ich schluckte leer.

„Also dann, tschüss für heute“, quäkten die drei Kleinen. „Wir gehen noch ein Weilchen auf die Straße, vielleicht finden wir dort ein paar Kollegen.“

Ozon, in der chemischen Notation O_3, ist ein bläuliches, stechend riechendes Gas. Es reizt die Atemwege und kann zu Kopfschmerzen führen, es ist demnach in der Atemluft unerwünscht. Weil es Bakterien abtöten kann, wird es zur Trinkwasseraufbereitung eingesetzt.

In Höhen von 15 bis 30 Kilometern ist die Erdatmosphäre zwar sehr dünn, aber doch dicht genug, dass die dort vorhandenen Sauerstoffatome und -moleküle aufeinander treffen und miteinander

reagieren können. Das Licht der Sonne gelangt mit voller Intensität in diese dünne Atmosphäre. Ihr Anteil an kurzwelliger UV-Strahlung ist so energiereich, dass sie die Bindung der Sauerstoffmoleküle spalten kann:

$$O_2 + \text{kurzwelliges UV-Licht} \rightarrow 2\ O$$

Damit ist die für Lebewesen höchst gefährliche Strahlung „aufgebraucht“. Die freien Atome reagieren beim zufälligen Zusammenprall mit intakten Sauerstoffmolekülen sofort zu Ozon:

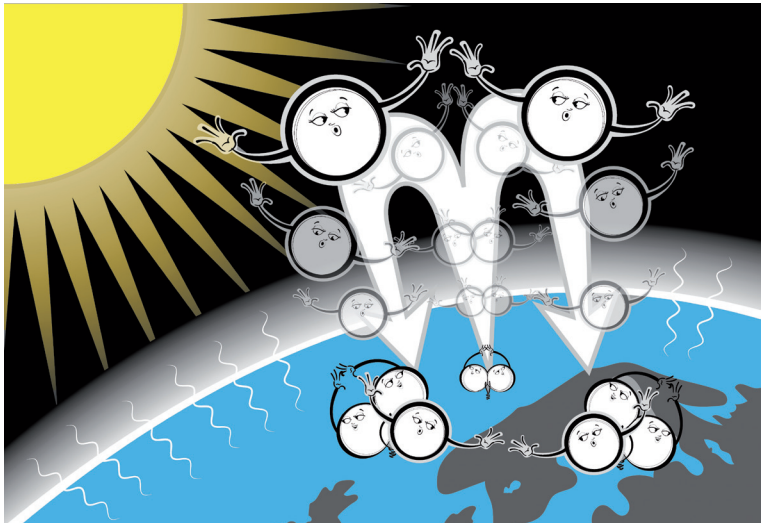
$$2\ O + 2\ O_2 \rightarrow 2\ O_3$$

Als ganzes betrachtet entstehen zwei Ozon- aus drei Sauerstoffmolekülen:

$$3\ O_2 + UV \rightarrow 2\ O_3$$

Ozon absorbiert seinerseits die etwas längerwellige UV-Strahlung des Sonnenlichts, verliert dabei eines seiner Atome und verwandelt sich dadurch zurück in Sauerstoff. Das einsame Atom findet aber gleich wieder ein O_2-Molekül, es entsteht erneut Ozon, und dieser Ringelreihen sorgt dafür, dass die Ozonschicht stabil bleibt. Sie schluckt das energiereiche UV-Licht bis etwa 300 Nanometer Wellenlänge. Es bleibt bloß das energieärmere UV- und das sichtbare Licht übrig, das bis zur Erdoberfläche gelangt. Die ankommende Strahlung besitzt dennoch viel Energie, und die Landlebewesen (Pflanzen und Tiere) schützen sich mit verschiedenen Maßnahmen vor den möglichen Schäden durch das Licht. Wie immer ist auch in dieser Beziehung das Leben eine Gratwanderung zwischen den beiden Extremzuständen „erfolgreiche Fortpflanzung“ und „Tod“.

Würde man in der Atmosphäre eines Planeten außerhalb unseres Sonnensystems Ozon finden (dieser Stoff lässt sich mit empfindlichen Messverfahren relativ einfach identifizieren), so könnte dies ein Hinweis für dortiges Leben sein. In einer Gashülle hat Ozon nur Bestand, wenn es Lebewesen gibt, die für ständigen Sauerstoff-Nachschub sorgen oder – hier kommt ein großes aber – wenn Was-



Bildung von Ozon in der oberen Atmosphäre durch Sonnenstrahlung.

serdampf durch starke ultraviolette Strahlung in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten wird. Es ist nicht vorstellbar, dass Vulkane, auf welch exotischem Planeten auch immer, Sauerstoff ausspucken, denn dieses Gas ist viel zu reaktiv als dass es sich in einer leblosen Umwelt anreichern könnte. (Umgekehrt ist überhaupt nicht bewiesen, dass auf einem Planeten kein Leben existiert, wenn weder Sauerstoff noch Ozon gefunden wird. Die Archaebakterien, welche sich auf unserer Erde nach wie vor in ihren vor Sauerstoff geschützten Schlupflöchern finden, sind Lebewesen.)

Die Ozonschicht funktioniert seit Jahrmillionen bestens und schützt durch ihre Existenz das Leben. Aber sie ist nicht unzerstörbar. Sie wird insbesondere durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe (abgekürzt FCKW) abgebaut. Die FCKWs sind industriell hergestellte Moleküle aus Kohlenstoff (C), eventuell Wasserstoff (H), Fluor (F) und Chlor (Cl). Beispiele dafür sind CHF_2Cl, $CFCl_3$ oder CF_2Cl_2. Sie wurden seit 1930 als Kältemittel (ja, auch für Kühlschränke), als Treibgas in Sprühdosen, als Treibmittel bei der Herstellung von Schaumstoffen oder als Lösungsmittel eingesetzt

weil sie weder brennbar noch giftig sind. Die Kehrseite zeigte sich erst nach und nach: Sie sind sehr stabil und damit langlebig, keine Bakterie und erst recht kein höheres Lebewesen kann sie abbauen, und deshalb reichern sie sich in der Umwelt an. Inzwischen findet man sie im Meer, im Eis der Pole, in der Luft und in der Muttermilch. Das ist höchst unerwünscht, aber damit noch nicht genug: Sie zerstören die Ozonschicht! Es läuft dort oben beispielsweise die folgende Reaktionskette ab, in welcher Chloratome Cl* als Ozonkiller fungieren:

$$CF_2Cl_2 + \text{UV-Licht} \rightarrow CF_2Cl^* + Cl^*$$

Der Stern bedeutet, dass das betreffende Atom oder Molekül ein Radikal ist, also ein freies Elektron besitzt. Dieser Zustand ist nicht stabil und schreit nach sofortiger Abhilfe:

$$Cl^* + O_3 \rightarrow ClO^* + O_2$$

Das Chlorradikal hat dem Ozon ein Sauerstoffatom gestohlen und es ist ein Chloroxid-Radikal entstanden. Dieses reagiert mit einem Kollegen:

$$2\ ClO^* \rightarrow Cl_2O_2 \rightarrow Cl_2 + O_2$$

Das Chlormolekül ist jedoch im intensiven UV-Licht der Sonne nicht stabil und zerfällt:

$$Cl_2 + \text{UV-Licht} \rightarrow 2\ Cl^*$$

Damit stehen erneut Chlorradikale zur Verfügung, welche dem Ozon den Garaus machen. Ein einziges Chloratom in einem FCKW-Molekül kann tausende von Ozonmolekülen zerstören.

Diese Reaktionen haben in den letzten Jahrzehnten unseren Ozon-Schutzschild ausgedünnt. An den Polen kommt es sogar regelmäßig zu einem Loch in der Ozonschicht, abhängig von den Jahreszeiten – dort geht bekanntlich die Sommersonne nie unter, während im Winter andauernd finstere Nacht herrscht – und der damit gekoppelten speziellen Situation der Wolkenbildung in hohen

Luftschichten. Im Winter lagern sich die Schadstoffe an den Eiskristallen der Wolken an; diese sind demnach Sammel- und Aufbewahrungsorte für die Ozonkiller, bis die Temperaturen im polaren Frühjahr wieder steigen. Dann lösen sich die Wolken auf und setzen relativ viele FCKW-Moleküle frei.

Es war nicht trivial, diesen Mechanismen auf die Spur zu kommen, doch brillante Forscher trugen die notwendigen Beweise zusammen und konnten schließlich die Weltgemeinschaft davon überzeugen, dass die FCKWs eine Gefahr für die Ozonschicht bedeuten. Die drei Wissenschaftler Mario Molina, Frank Rowland und Paul Crutzen erhielten für diese Leistung im Jahr 1995 den Chemie-Nobelpreis. 1987 beschloss die Staatengemeinschaft in Montreal, dass der Einsatz von FCKWs drastisch eingeschränkt werden solle. Inzwischen erholt sich die Ozonschicht langsam – sehr langsam, weil die Schadstoffe hundert und mehr Jahre in der Atmosphäre verweilen.

Unerwünschtes Ozon und andere Luftschadstoffe

Wieder einmal war Fenster putzen angesagt, eine Arbeit die ich hasste. Zwar konnte man sich nach getaner Arbeit am ungetrübten Blick durch die Scheiben erfreuen, doch bereits am nächsten Tag nahmen Schmutz und Staub jeweils wieder ihre heimliche Ablagerungstätigkeit auf. Wegen der prinzipiellen Aussichtslosigkeit meiner Bemühungen war ich nur mit halbem Eifer mit Wasserkübel, Putzmittel, Lappen und Abzieher zugange. Meine Stimmung hellte sich aber sofort auf, als ich die Sauerstoffs entdeckte, die locker auf der obersten Sprosse meiner Leiter balancierten. Sie waren wieder zu zweit, wie gewohnt.

„Wie wars neulich auf der Straße?“, fragte ich neugierig. Ich vergaß sogar das Grüßen.

„Oh, da war ziemlich viel los. Natürlich herrschte in der Luft das übliche Gedränge von Stickstoffs und Sauerstoffs, aber dazwischen traf man immer wieder die Drecksker le an.“

„Drecksker le?“

„Ist vielleicht ein starkes Wort, einverstanden, aber soviel wir wissen, sind sie für euch nicht gesund“, sagte Sauerstoff Eins.

Sauerstoff Zwei zählte auf: „Stickoxide, Benzindämpfe, Feinstaub, Ruß! Ganz üble Mischung!“

Das klang in der Tat nicht gut. „Und ihr seid euch in dieser Gesellschaft als etwas Besseres vorgekommen, wie?“, fragte ich skeptisch. „Ihr ward doch zu dritt unterwegs. Habt ihr eure Ozon-Kollegen gefunden?“

„Es schwirrten tatsächlich auch einige wenige Ozons umher, aber richtig viele fanden wir erst am Stadtrand. Es war ein sonniges Plätzchen, da lief die Ozonsynthese mit Hilfe von Stickstoffdioxid wie geschmiert. Sommersmog nennt man das.“

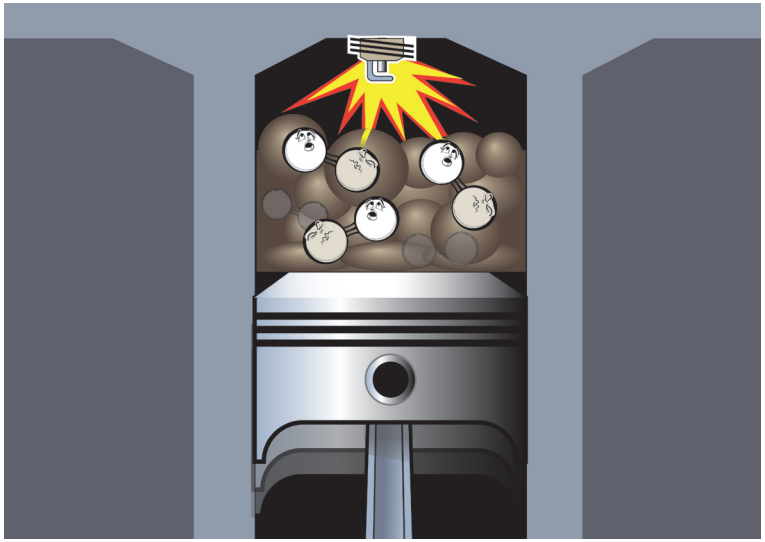
Vorerst verstand ich nichts, aber ich würde schon noch dahinter kommen. Ich hörte bloß noch: „Ozon ist nur dann etwas Besseres, wenn es sich hoch oben in der Atmosphäre aufhält. Aber hier unten beginnst du zu husten, wenn es zu viel davon in der Luft hat, du erinnerst dich doch? Wir hatten nach einer Weile Erbarmen mit euch Menschen und den anderen Lebewesen und beschlossen, unseren Dreier aufzulösen und wieder als gewöhnliche Sauerstoffs durch die Lüfte zu jagen.“ Weg waren sie, und meine Fenster blitzten leider noch nicht alle sauber.

Die Menschen leiden seit Urzeiten an der Luftverschmutzung, nämlich seit der Bändigung des Feuers. In den Höhlen mag der Rauch zu manchem Hustenanfall geführt haben. Mit der Industrialisierung seit dem 19. Jahrhundert breitete sich die Plage vor allem zur Winterzeit in den großen Städten aus, wo nicht nur die Fabriken, sondern auch alle Kohle- oder Holzheizungen der Wohngebäude die Luft verschmutzten. Im 20. Jahrhundert kamen die Emissionen aus Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor dazu. Besonders schlimm war die Situation in Gegenden mit häufigem Nebel. Herrschte dazu noch Windstille, so entstand eine gefährliche Mischung aus Rauch (smoke) und Nebel (fog), für welche das Kunstwort Smog kreiert wurde. Anfang Dezember 1952 starben in London Tausende von Menschen, als während mehreren Tagen der Smog so dicht war, dass die Sichtweite auf unter einen Meter sank. Heute leiden beispielsweise die asiatischen Millionenstädte Peking und Delhi immer wieder unter Smog.

Rauch entsteht bei unvollständiger Verbrennung. Wenn in einem Feuer die Temperatur zu tief oder die Sauerstoffzufuhr zu knapp ist, enthalten die Verbrennungsgase winzige Partikel aus Kohlenstoff, den Ruß. Deshalb unterliegen Industrie- und Hausfeuerungen strengen Vorschriften und Kontrollen. Die Behörden können stark rauchende Feuer, etwa aus feuchtem Pflanzenmaterial, verbieten.

Ruß ist ein Bestandteil von Feinstaub, welcher aus Partikeln von 0,01 Millimetern (10 Mikrometern) Durchmesser und kleiner besteht. Derartig kleine Teilchen werden in den Bronchien nicht zurückgehalten sondern gelangen in die Lunge. Feinstaub enthält des weiteren auch Abrieb, der vor allem im Straßenverkehr entsteht: Bremsbeläge, Pneus und Straßenbeläge werden mechanisch beansprucht und zerfallen daher oberflächlich zu Staub.

Unter den Stickoxiden als weiteren Bestandteilen verschmutzter Luft versteht man zwei Verbindungen aus Sauerstoff und Stickstoff, nämlich Stickstoff-Monoxid NO und Stickstoff-Dioxid NO_2. In Verbrennungsmotoren, und dabei vor allem in Dieselmotoren und Benzinmotoren mit Direkteinspritzung, entsteht wegen hohem Druck und hoher Temperatur im Brennraum aus den Hauptkomponenten der Luft zuerst NO, das anschließend zu NO_2 oxidiert wird. Zusammenfassend bezeichnet man die Stickoxide als NO_x. NO_2 ist



der Vorläufer von Salpetersäure, die beim Kontakt dieses Gases mit Wasser entsteht:

$$NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3$$

Diese Reaktion läuft natürlich auch in den feuchten Schleimhäuten von Nase und Mund ab, und die aggressive Säure ist alles andere als gesund.

Die Entfernung von Stickoxiden aus den Abgasen mit Hilfe von Katalysatoren ist nicht einfach. Ein geregelter Drei-Wege-Katalysator, geeignet für Ottomotoren, reduziert sie zu Stickstoff (und oxidiert eventuell vorhandenes Kohlenmonoxid und Reste von Benzin zu CO_2 und Wasser). In Dieselmotoren werden sie gleich am Ort ihrer Entstehung abgefangen. Dazu wird eine wässrige Lösung von Harnstoff, genannt AdBlue, eingesetzt. Harnstoff mit der Zusammensetzung CON_2H_4 ist ein „Abfallprodukt“ des menschlichen (und tierischen) Organismus, wie bereits erwähnt, man kann ihn aber auch synthetisch herstellen. Spritzt man eine Harnstofflösung direkt in den Abgasstrom, so entstehen zuerst Ammoniak NH_3 und Kohlendioxid:

$$CON_2H_4 + H_2O \rightarrow 2\ NH_3 + CO_2$$

Dann reagiert der Ammoniak mit den Stickoxiden und es entsteht harmloser Stickstoff nebst Wasser, unter anderem nach folgender Gleichung:

$$NO + NO_2 + 2\ NH_3 \rightarrow 2\ N_2 + 3\ H_2O$$

Leider ist auch Ozon ein Luftschadstoff, wenn es nicht hoch oben in der Atmosphäre sondern in Bodennähe gebildet wird. Es entsteht unter dem Einfluss von Sonnenlicht aus NO_2 und Sauerstoff:

$$NO_2 + O_2 + \text{Licht} \rightarrow NO + O_3$$

Für die Luft in einer Stadt bedeutet das: Stickoxide entstehen an Orten mit viel Verkehr, das Ozon aber typischerweise im Sommer am Stadtrand, wo die Besonnung intensiver ist als in den Häuserschluchten. Diese Mischung aus Luftschadstoffen wird Sommersmog genannt. Ozon ist ein Reizgas, wie bereits früher erwähnt.

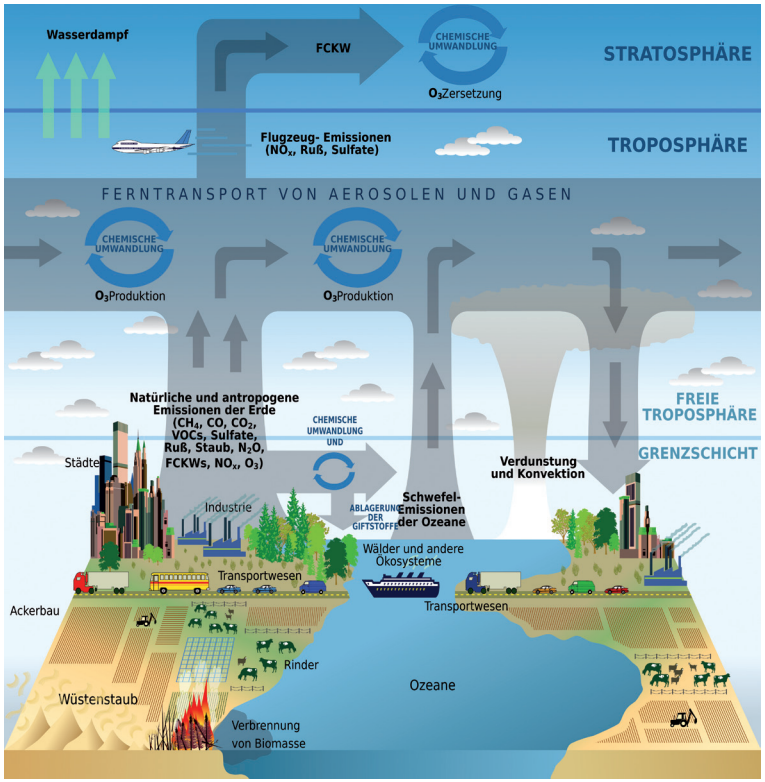
Weitere Luftschadstoffe sind die „flüchtigen organischen Stoffe“, englisch „volatile organic compounds“ oder abgekürzt VOCs. Diese Bezeichnung umfasst eine große Palette von kohlenstoffhaltigen chemischen Verbindungen mit tiefem Siedepunkt wie Benzin, Lösungsmittel (zum Beispiel Nagellackentferner oder die flüchtigen Anteile von nichtwässrigen Malerfarben) und ebenso die gasförmigen Ausdünstungen von Kunststoffteilen, Möbeln oder Teppichen. Auch die VOCs sind an der Entstehung von Ozon und anderen aggressiven Substanzen beim Vorliegen von Stickoxiden und Sonnenlicht beteiligt.

Ein höchst unerwünschter Luftschadstoff ist Schwefeldioxid SO_2, das vor allem bei der Verbrennung von schwefelhaltigem Erdöl und Kohle entsteht. An der Luft wird es weiter zu Schwefeltrioxid oxidiert, der Vorläufersubstanz von Schwefelsäure, die beim Kontakt mit Wasser gebildet wird:

$$SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

Schwefelsäure war die Ursache für den sauren Regen, der in den achtziger Jahren Wälder und Gewässer bedrohte; man sprach vom „Waldsterben“. Dank der Umstellung auf schwefelarme Erdölsorten und dem verbreiteten Einsatz von Rauchgas-Entschwefelungsanlagen konnte diese Bedrohung in vielen Ländern deutlich verringert werden. Heute sind es vor allem die Dieselantriebe mancher Hochseeschiffe, welche nach wie vor die Umwelt mit SO_2 belasten.

Dynamik des Stoffaustauschs in der Atmosphäre (Abb.: Phillipe Rekacewicz / U.S. Climate Change Science Program / atmosphere composition).



Sauerstoff und Stickstoff – ein Ringelreihen im Boden

War das nicht seltsam? Als mir die Sauerstoffs vor einiger Zeit die Zusammensetzung der Luft erklärten, behaupteten sie, der in Massen vorkommende Stickstoff sei langweilig, weil er nicht so reaktionsfreudig sei wie Sauerstoff. Doch im Verbrennungsraum eines Motors konnten diese beiden Gase offenbar zusammenfinden. War das auch in der Natur möglich? Ich stand gerade in der Gartenabteilung des Supermarkts, weil ich Tulpenzwiebeln kaufen wollte, und bemerkte in einer Ecke die dicken Säcke von „Stickstoffdünger". Das musste ich mir von den Sauerstoffs erklären lassen.

Glücklich trug ich meinen Einkauf nach Hause und begann sogleich, die Zwiebeln in die Erde meines kleinen Vorgartens zu stecken. Wunderbar würden die Tulpen im nächsten Frühjahr leuchten, rot, gelb und geflammt. Als ich fertig war und aufräumen wollte, saßen die Sauerstoffs auf einer der leeren Verpackungen und schienen das Etikett „Rote Apeldoorn" zu studieren.

„Liebt ihr die Blumen auch?", fragte ich. „Jaaaa," kam die verträumte Antwort, „schließlich sind wir in der Form von Kohlendioxid und Wasser an ihrem Gedeihen beteiligt, aber auch als Nitrat. Du musst wissen, dass Stickstoff und Sauerstoff nicht nur im Automotor miteinander reagieren, sondern auch im Boden. Dort kommen Bakterien vor, welche es fertigbringen, ohne großes Aufhebens den Stickstoff zu oxidieren, also Nitrat zu erzeugen. Pflanzen benötigen nämlich nicht nur Wasser und Kohlendioxid, sondern auch Stickstoff und andere Elemente. Ohne Stickstoff könnten sie keine Proteine synthetisieren, die du zum Leben benötigst. Es gibt ja so viel Stickstoff in der Luft, da sind schon vor Urzeiten spezielle Bakterien auf den Trick gekommen, wie sie ihn einfangen können. Dann fanden gewisse Pflanzen wie Klee, Bohnen oder Erlen, sie könnten diese Bakterien als Untermieter beherbergen, um an den Stickstoff zu gelangen. Und alle Pflanzen profitieren vom oxidierten Stickstoff in der Form von Nitrat, das durch andere Bakterienarten hergestellt wird."

„Das klingt ganz schön kompliziert", fand ich.

„Ist es auch. Im Boden läuft unablässig der Stickstoffkreislauf. Tote Lebewesen werden zersetzt und geben ihre kostbaren Inhaltsstoffe frei, so dass die Pflanzen wachsen können. Und zusätzlich fangen die

speziellen Bakterien den Luftstickstoff ein, so dass dessen Menge in der Erde steigt."

„Und das genügt den Pflanzen?"

„Wie man's nimmt. Pflanzen sind hungrig nach Stickstoff, und seine Gewinnung aus der Luft ist auch für die Bakterien kein einfaches Geschäft. Deshalb sind Landwirte und Gärtner ganz wild auf Stickstoffdünger, der in Fabriken hergestellt wird. Damit verwöhnen sie ihre Kulturen und trimmen sie auf kräftiges Wachstum. Manchmal übertreiben sie es mit dem Verwöhnen."

Der erste Schritt des Stickstoffkreislaufs im Boden geschieht durch die Stickstoff-Fixierer, jene Bakterien, welche die Sauerstoffs „speziell" genannt hatten. Sie verknüpfen in einer komplizierten Abfolge von mehreren chemischen Reaktionen Wasserstoff mit Luftstickstoff zu Ammoniak NH_3. In Kontakt mit Wasser entsteht daraus Ammonium NH_4^+. Das Gebilde trägt eine positive elektrische Ladung (durch das + angezeigt) und ist deshalb ein sogenanntes Ion.

Nun kommen zwei andere Kategorien von Bakterien zum Zug, die Nitrifizierer. Die einen oxidieren Ammonium zu Nitrit NO_2^-, das sind negativ geladene Ionen. Der dazu benötigte Sauerstoff stammt aus der Luft. Im nächsten Schritt oxidieren die Bakterien der zweiten Katego-

rie die Nitritionen durch das Zufügen eines weiteren Sauerstoffatoms zu Nitrationen NO_3^- nach denen die Pflanzen so gierig sind.

Wenn aber Pflanzen und Tiere sterben, so zersetzen Pilze und verschiedene Arten von Bakterien deren stickstoffhaltigen Moleküle zu Ammonium, und der Kreislauf beginnt von vorne.

Das Pflanzenwachstum wird üblicherweise (in unseren Breiten) nicht durch ein knappes Angebot an Wasser oder Kohlendioxid beschränkt, sondern durch den natürlichen Mangel an Stickstoff, Phosphor, Kalium und weiteren Elementen, wobei die Knappheit an Stickstoff weltweit gesehen die wichtigste Wachstumsbremse darstellt. Hofdünger (Mist und Jauche) mit seinem hohen Stickstoffgehalt, man denke an den Harnstoff, war während Jahrtausenden der wichtigste Felddünger.

Für die Ernährung der Menschheit war es von immenser Bedeutung, dass es im Jahr 1913 dank den Forschungen von Fritz Haber und Carl Bosch gelang, Ammoniak aus Wasserstoff und Luftstickstoff in großem Maßstab herzustellen:

$$3\ H_2 + N_2 \rightarrow 2\ NH_3$$

Dank des Haber-Bosch-Verfahrens kann bis heute der enorme Bedarf an Stickstoff für die Pflanzenproduktion (und in der Folge auch für die Nutztierproduktion) gedeckt werden. Der damit hergestellte Dünger muss allerdings mit Augenmaß eingesetzt werden. Landwirte und Hobbygärtner sollten den Pflanzen nur gerade so viel Stickstoff zur Verfügung stellen wie diese benötigen. Ansonsten drohen die Überdüngung von Gewässern und das Entweichen von Ammoniak und Stickoxiden in die Luft. Beides ist schädlich für die Umwelt. Bei einem zu großen Düngerangebot im Boden kann sogar eine weitere Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung entstehen: Distickstoffmonoxid N_2O, auch Lachgas genannt, ein starkes Treibhausgas und deshalb unerwünscht.

Kohlendioxid

Der Nachmittag war heiß, und ich lechzte nach einer Erfrischung. Genau für solche Situationen hatte ich mir eine Sprudelmaschine als Muntermacherin angeschafft. Ich mischte Wasser mit Himbeersirup und schraubte die Flasche an den Sprudler. Wer guckte mir dabei neugierig zu? Natürlich die Sauerstoffs.

„Was machst du?“

„Sprudelsirup, der ist so prickelnd lecker und löscht den Durst.“

„Und womit machst du das?“

„Oh, ich habs vergessen.“ Ich öffnete das Türchen zur Kartusche, die ich hin und wieder ersetzen musste, und meldete: „Kohlendioxid.“

„Erinnerst du dich? Das ist das Gas, welches Menschen und Tiere ausatmen und das umgekehrt den Pflanzen als Nahrung dient. Viel Spaß mit der Limonade!“ Das fröhliche Lachen der Sauerstoffs war nicht minder erfrischend als mein Sprudelsirup. Ich nahm einen tüchtigen Schluck und hatte plötzlich den Eindruck, dass im Lachen ein bedrohlicher Unterton mitschwang.

Kohlenstoffdioxid – oder wie bereits genannt kurz Kohlendioxid, CO_2 – löst sich gut in Wasser. Wenn man es in der Sprudelmaschine oder in einer Abfüllstraße für Getränke unter Druck in die Flüssigkeit bläst, reagiert ein kleiner Teil des Gases mit dem Wasser und bildet Kohlensäure:

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

Wie der Name sagt, ist eine Säure entstanden, allerdings eine ganz schwache, die für uns nicht schädlich ist. Zusammen mit dem gelösten Gas, das Blasen bildet, wenn man ein Flasche mit kohlensäurehaltigem Getränk öffnet, erzeugt sie einen erfrischenden Geschmack und ein Kribbeln im Mund.

Getränke, die durch Gärung hergestellt werden, enthalten ebenfalls Kohlendioxid. Bakterien oder Hefen wandeln den Zucker der Maische in Alkohol und CO_2 um. Traubensaft im Gärstadium wird als „Neuer Wein“, auch Sturm, Sauser oder Bitzler bezeichnet. Er enthält bereits Alkohol, aber noch nicht so viel wie das Endprodukt; sein spezieller Geschmack kommt nicht nur von den Trauben, son-

dern auch von Kohlensäure und Kohlendioxid. Beim Bierbrauen entsteht ebenfalls CO_2. Während des Produktionsprozesses darf das Getränk nicht mit Sauerstoff in Kontakt kommen, weil darunter die Qualität leiden würde. Deshalb wird die Abfüllanlage mit zusätzlichem CO_2 unter Druck gesetzt.

Kohlendioxid ist gefährlich, wenn es in höherer Konzentration eingeatmet wird. Enthält die Atemluft 5 % CO_2, so treten Schwindel und Kopfschmerzen auf. Ab 8 % ist das Gasgemisch tödlich. Weil CO_2 schwerer als Luft ist, reichert es sich in geschlossenen Räumen am Boden an, so dass es lebensgefährlich ist, Gärkeller oder Silos ohne vorherige gründliche Belüftung zu betreten.

Kohlendioxid gefriert bei -78,5 °C, ohne dass das Gas vorher flüssig wird. Es liegt in diesem Zustand als feste, weiße Blöcke vor. Weil es beim Erwärmen ebenfalls keinen flüssigen Zustand durchläuft, sondern gleich zu Gas wird (dieser Prozess heißt Sublimation), nennt man das feste Material Trockeneis.

Luft enthält Kohlendioxid nur in geringen Mengen. Vor der Industrialisierung waren es 0,028 % (Volumenprozent), inzwischen ist dieser Gehalt auf 0,04 % gestiegen, und er steigt weiter an. Was zahlenmäßig niedlich erscheint, bewirkt in Wahrheit einen dramatischen Prozess namens „globale Erwärmung“, der durch menschliche Aktivitäten angetrieben wird. Kohlendioxid in der Luft kann mit Salz in der Suppe verglichen werden: Ohne Salz mögen wir die Suppe nicht; mit nur wenig Salz schmeckt sie uns; wenn aber zu viel Salz hinein geraten ist, wollen wir sie nicht essen, obwohl das „zu viel“ mengenmäßig gar nicht bedeutend ist.

Die wärmende Atmosphäre

Am nächsten Tag ging ich früh auf den Markt, um das beste frische Gemüse, Käse und Brot einzukaufen. Nach einer klaren Nacht waren die ersten Morgenstunden dementsprechend kühl. Als ich fröstelnd nach Hause kam, hatte die Sonne bereits die ostseitig gelegenen Räume meiner Wohnung behaglich erwärmt. Ein Liedchen summend versorgte ich den Käse in den Kühlschrank, legte das bunte Gemüse auf dem Schneidbrett bereit und naschte vom duftenden Brot. Es passte eigentlich bestens zu meiner aufgeräumten Stimmung, dass die Sauerstoffs herbeigepurzelt kamen. Doch dann erinnerte ich mich an ihr eigenartiges Lachen anlässlich ihres letzten Besuchs.

„Wie ist das eigentlich mit diesem Kohlendioxid?“, begann ich das Gespräch. „Als ich gestern meinen Sprudelsirup herstellte, schien mir, dass euch irgendetwas nicht gefalle.“

„Deine Limonade war schon okay“, sagte Sauerstoff Eins. „Aber...“

Das klang nicht lustig. „Was aber?“, fragte ich.

„Ihr Menschen verbrennt massenhaft Kohle, Erdöl und Erdgas, das gibt viel Kohlendioxid, mehr als alle Pflanzen brauchen können, und dann wird die Atmosphäre warm“, dozierte Sauerstoff Zwei sorgenvoll.

„Warm ist doch gut!“, warf ich ein, „ich bin froh, dass die Sonne meine Küche so herrlich aufgewärmt hat, während ich weg war.“

„Die Luft ist prima eingerichtet“, erklärten meine Lehrmeister. „Sie enthält nicht nur Sauerstoff und Stickstoff, sondern auch Kohlendioxid, Wasserdampf und andere interessante Moleküle. Ohne diese wäre es auf der Erde viel kälter, sie halten nämlich die Infrarotstrahlung zurück. Aber zu viel Kohlendioxid ist zu viel! Die Gletscher werden schmelzen, die Meere ansteigen, in Indien werden viele Leute sterben wegen der Hitze, und selbst dir wird es zu warm werden. Pass auf!“

Die Strahlung der Sonne erwärmt jedes Objekt, auf das sie trifft. Es ist für uns selbstverständlich, dass wir uns bei kaltem Wetter wenn möglich an ein sonniges Plätzchen stellen, wenn wir auf den Bus warten. Ebenso werden bei Sonneneinstrahlung der Erdboden, die Gebäude, die Gewässer und Meere wärmer. Ein Objekt, das

Treibhauseffekt: Wärmestrahlung erreicht die Erde, aber CO_2 verhindert teilweise die Abstrahlung.

eine höhere Temperatur als seine Umgebung hat, strahlt infrarotes Licht ab. Diese Strahlung können wir nicht sehen, aber mit geeigneten Geräten messen. Mit der Thermografie werden beispielsweise Wärmebilder von Gebäuden erstellt um festzustellen, wie gut sie isoliert sind und wo eventuell Wärme entweicht. Diese Bilder sind der augenfällige Beweis dafür, dass die Infrarotstrahlung kein theoretisches Konstrukt ist, sondern wirklich existiert.

In einer Wohnung erwärmen sich die Fußböden, Wände und Möbel wenn die Sonne sie bescheint. Folglich strahlen sie im Infraroten, aber für diese Art von Licht sind die Fensterscheiben nicht durchlässig. Die Strahlung bleibt gefangen, und die Temperatur im Raum steigt. In der Erdatmosphäre geschieht etwas Ähnliches, weil gewisse Moleküle Infrarotstrahlung absorbieren.

Um die Wechselwirkung zu verstehen, welche infrarotes Licht auf ein Molekül ausüben kann, stellt man sich die chemischen

Bindungen seiner Atome als elastische Federn vor. Ein Molekül besitzt in diesem Modell nicht eine starre Struktur mit unveränderlichen Abständen zwischen seinen Atomen. Stattdessen wabbeln die Atome an ihren Federspiralen und können durch winzige Energiestöße in Schwingung versetzt werden. Infrarotes Licht strahlt in passenden Wellenlängen und kann die Atome anschubsen. Verändert sich dabei die elektrische Ladungsverteilung im Molekül, so wird die Strahlung absorbiert. Physikalisch gesehen bedeutet dies: Das Dipolmoment des Moleküls verändert sich.

Sauerstoff- oder Stickstoffmoleküle haben kein Dipolmoment, auch dann nicht, wenn sie in Schwingung geraten und sich dabei der Abstand zwischen ihren Atomen ändert. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass in O_2 oder N_2 beide Atome identisch sind und keine Ladungsverschiebung auftreten kann. Wabbelt aber beispielsweise ein Kohlendioxidmolekül O=C=O, so ändert sich seine Gestalt und damit auch die Verteilung der elektrischen Ladungen im Molekül: CO_2 ist infrarotaktiv! Die geringe Menge an diesem Gas in der Luft reicht aus, dass ein Teil der infraroten Strahlung, welche von der Erde abstrahlt, nicht entweichen kann, sondern die Atmosphäre erwärmt.

Die Luft enthält eine Reihe weiterer Moleküle, welche infrarotes Licht absorbieren. Die wichtigsten davon sind:

- Wasser, das in der Luft als Wasserdampf vorkommt;
- Methan, CH_4, welches bei der Verrottung von organischem Material unter Sauerstoffausschluss entsteht (beispielsweise in Sümpfen), das aber auch beim Reisanbau und im Verdauungstrakt von Rindern gebildet und nachher in die Umwelt entlassen wird;
- Lachgas, N_2O, eine Verbindung aus Sauerstoff und Stickstoff (neben den nitrosen Gasen NO und NO_2), welche natürlicherweise in Böden entsteht, allerdings auch durch übermäßige Düngung;
- Fluorkohlenwasserstoffe, welche gegenwärtig als Ersatz für die Fluorchlorkohlenwasserstoffe dienen (die bekannten Ozonschicht-Schädlinge), deren Verwendung aber in Zukunft massiv eingeschränkt werden soll, bis hin zum Verbot.

Alle diese chemischen Verbindungen in der Luft tragen dazu bei, dass auf der Erde lebensfreundliche Temperaturen herrschen

und große Mengen an Wasser in flüssiger Form vorliegen. Ohne diese Gase würde die mittlere Temperatur der Erdoberfläche -18 °C betragen, so sind es aber angenehme +14 °C. In Analogie zu gläsernen Treibhäusern, in denen Nutzpflanzen angebaut werden, spricht man vom „Treibhauseffekt“ unserer Atmosphäre dank den „Treibhausgasen“. Doch wie die Sauerstoffs sagten: Zu viel ist zu viel! Der CO_2-Gehalt in der Atmosphäre steigt gegenwärtig an, weil unsere Zivilisation einen Riesenhunger nach Erdölprodukten hat. Was vor 150 Millionen Jahren in den Tiefen der Erde gebildet wurde, verbrennen wir Menschen innerhalb von 150 Jahren, und der kostbare Rohstoff verwandelt sich zu Wasser und Kohlendioxid. Letzteres benötigen zwar die Pflanzen für ihr Gedeihen, doch ist ihr Wachstum begrenzt, weil sie dazu auch noch andere Stoffe wie Wasser, Stickstoff oder Phosphor benötigen. Zudem nimmt die Waldfläche auf der Erde durch großräumige Abholzungen ab, obwohl eine Zunahme wünschenswert wäre.

Es bedarf großer Anstrengungen aller Staaten, um den Verbrauch an Erdöl, Erdgas und Kohle massiv zu reduzieren, damit weniger Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt. Sonst droht die Erwärmung der Erde, welche bereits im Gang ist, ungehindert anzusteigen. Eine Temperaturerhöhung um zwei Grad klingt niedlich, sogar angenehm, aber sie wird einen drastischen Klimawandel zur Folge haben. Drei oder vier Grad hätten katastrophale Auswirkungen: An den Polen schmilzt das Eis, der Meeresspiegel steigt, Milliarden von Menschen müssen eine neue Bleibe suchen, die Pflanzen- und Tierwelt kann sich nicht innerhalb von wenigen Jahrzehnten an die neuen Bedingungen anpassen und unsere Versorgung mit Lebensmitteln wird kritisch. Wegen des erhöhten CO_2-Gehalts in der Luft (Sie erinnern sich, dieses Gas ist gut wasserlöslich und bildet dann Kohlensäure) werden die Ozeane saurer. Dies hat zur Folge, dass Korallen und Muscheln Mühe haben, ihre kalkhaltigen Skelette und Schalen zu bilden, denn Kalk löst sich in Säure auf. Die Nahrungskette in den Meeren ist bedroht. Und wichtige Meeresströmungen wie der Golfstrom könnten ihre Richtung ändern oder zum Stillstand kommen.

Übrigens: Wegen einer Sprudelmaschine muss man kein schlechtes Gewissen haben. Es ist allemal umweltfreundlicher, die Sprudelgetränke zu Hause herzustellen als sie in Flaschen abgefüllt im Supermarkt zu kaufen.

Leider kein Experiment

Es ist leider nicht möglich, den wärmenden Effekt von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen in einem einfachen Experiment zu zeigen. Im Internet findet man mancherlei Versuche mit Lampen, CO_2-gefüllten Flaschen, Thermometern und anderen Geräten, welche beweisen sollen, dass ein mit Kohlendioxid gefülltes Gefäß wärmer wird als dasjenige mit Luft. Alle diese Experimente haben gravierende Mängel. Es spielen sehr viele Faktoren in die Ergebnisse hinein, wie beispielsweise die Wärmekapazität der verwendeten Gase oder die Tatsache, dass schon nur mit steigendem Druck in der Flasche die Temperatur steigt (das ist ein Gesetz, welches für alle Gase zutrifft). Wenn man aber Natron-Tabletten (Natriumbicarbonat gegen Magenbrennen) in Wasser löst, um Kohlendioxid zu erhalten, so wird während der Dauer des Experiments ständig CO_2 entwickelt und der Druck in der Flasche steigt.
Falls man mit einer geeigneten Anordnung tatsächlich eine höhere Erwärmung als im Vergleichsexperiment erzeugen könnte, so wäre der Effekt viel zu klein, um mit gewöhnlichen Thermometern gemessen werden zu können. Es ist, als ob man das Zirpen einer Grille zu hören wünschte, während man neben einer Stereoanlage steht, aus welcher Heavy Metal mit voller Leistung wummert.

Rückkopplungen

Das Jahr war fortgeschritten und es kam die Zeit, da der erste Schnee fallen sollte. Ich mochte es immer, wie die weiße Pracht den Stadtlärm dämpfte und dem kleinen Vorgarten, in dem ich den Sommer über Kartoffeln, Gemüse und Blumen zog, eine glitzernden Decke schenkte. Doch dieses Mal wartete ich vergeblich. Bekümmert betrachtete ich die verdorrten Stängel und Blütenstände der Staudenpflanzen, die sich in den früheren Wintern jeweils in lustige Schneemännchen verwandelt hatten.

Anstelle einer Schneehaube saßen plötzlich die Sauerstoffs auf einer dürren Kugeldistel. Reizvoll war das anzusehen: die transparente Doppelkugel auf der immer noch violetten Blütenkugel.

„Was guckst du so betrübt?“, fragten die Sauerstoffs, neugierig wie immer.

„Ich möchte Schnee!“

„Da kannst du wohl lange warten! Gut möglich, dass in diesem Winter hier kein Schnee fallen wird. Es ist einfach zu warm“, wurde ich belehrt. Konnten die beiden Kleinen das Wetter voraussagen?

„Aber Kälte und Schnee wären für den Boden dieses Vorgartens eine Wohltat, so könnte er sich ausruhen, um dann im Frühjahr wieder zu zeigen, was er alles produzieren kann“, argumentierte ich.

„Du hast vollkommen Recht“, stimmte Sauerstoff Eins zu.

„Es ist verzwickter als du denkst“, erklärte Sauerstoff Zwei. „Die weiße Schneedecke auf der Erde würde wie eine Isolierschicht wirken und zugleich die Sonnenstrahlen reflektieren. Doch die nackte braune Erde absorbiert die Strahlen, sie erwärmt sich und von Winterruhe kann keine Rede sein. Wenn das so weitergeht mit dem Klima, kannst du deine Kartoffeln in Zukunft bereits im Januar pflanzen!“

„Das wäre aber gar nicht schlecht. Dafür würde ich sogar auf die Schneelandschaft zu Weihnachten verzichten!“

„Du denkst viel zu kurz!“, fauchten die Sauerstoffs. „Aber damit bist du nicht allein. Die Menschen haben zwar ein großes Hirn, aber oft wenig Verstand.“

Eine fehlende Schneedecke mag Gärtnern und Landwirten Sorgen bereiten, aber für das weltweite Klima können die Folgen fatal

sein. Wird ein Teil der infraroten Strahlung, die von der Erdoberfläche abstrahlt, vom Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen absorbiert, so erwärmt sich die Luft. Die mittleren Temperaturen steigen überall, von den Tropen bis zu den Eiskappen an den Polen. Deren riesige Eisflächen reflektieren wegen ihrer weißen Farbe viel Sonnenlicht und erwärmen sich kaum. Wenn aber das Eis schmilzt, kommt am Nordpol Meerwasser zum Vorschein und am Südpol Gestein. Wegen ihrer dunkleren Farbe erwärmen sich Wasser und Felsen und strahlen im Infraroten. Die Treibhausgase absorbieren auch diese Strahlung, und die Atmosphäre heizt sich mehr auf als wenn die Eiskappen intakt wären. Es entsteht ein selbständiger Verstärkungs-Mechanismus, ein Rückkopplungs-Effekt. Er könnte zur Folge haben, dass es auf der Erde ungemütlich warm wird, auch wenn wir die CO_2-Emissionen sofort stoppen würden.

Dies ist nicht die einzige Rückkopplung, die in Zukunft zu befürchten ist. In weiten Gebieten von Sibirien und Kanada sind die Böden ganzjährig gefroren; dieses Phänomen wird Permafrost genannt. Sollten sie durch die allgemeine Erwärmung auftauen, so würden sie viel Kohlendioxid und Methan freisetzen und der Anteil an Treibhausgasen in der Atmosphäre würde steigen.

An manchen tiefen und kalten Stellen findet sich in den Meeresböden gefrorenes Methanhydrat; das ist Methan mit gebundenem Wasser. Wird dort das Wasser wärmer, so kann das Hydrat auftauen und Methan in die Atmosphäre entweichen, was eine weitere Zunahme dieses starken Treibhausgases bedeutet.

Als ob alle diese Mechanismen noch nicht genug Rückkopplungen erzeugten, welche den Klimawandel beschleunigen, so gibt es noch einen weiteren Effekt. Wärmere Meere bewirken, dass mehr Wasser verdunstet. Doch Wasserdampf ist ebenfalls ein Treibhausgas. Zu wenig Rückstrahlung an den Polen, zu warme Böden und Meere – dies alles könnte zu einer fatalen Verstärkung der Klimaerwärmung führen, die sich jeder menschlichen Steuerung entziehen würde.

Was soll ich tun?

Wieder einmal saß ich in meinem bequemsten Sessel, allerdings ohne Buch. Ich dachte nach. „Pass auf!“, hatten die Sauerstoffs gesagt. Das mochte wohl stimmen, fand ich, aber worauf sollte ich achten? Was wäre zu tun?

Mein Blick schweifte zum Fenster, und da saßen meine Lehrmeister auf der Fensterbank. Sie erschienen mir heute besonders hilfsbereit und geduldig.

„Guten Tag“, sagte ich viel höflicher als sonst, „schön, dass ihr kommt. Ich habe da nämlich eine Frage.“

„Und die wäre?“

„Ich habe verstanden, dass unsere Zivilisation zu viel Kohlendioxid in die Atmosphäre entlässt. Weil auch ich zur Zivilisation gehöre, meine ich, dass ich erst mal bei mir beginnen sollte mit einer Veränderung. Was soll ich tun?“

In letzter Zeit hatte ich die Sauerstoffs selten so begeistert gesehen wie in diesem Moment. Wieder einmal überkugelten sie sich: „Toll, dass du so etwas fragst!“ Doch dann wurden sie sehr ernst: „Was tu tun sollst, ist einfach und schwierig zugleich.“

„Bitte sagt es mir!“

„Das Einfache: weniger Kohlendioxid erzeugen, das ist doch klar“, sagte Sauerstoff Eins.

Und Sauerstoff Zwei beeilte sich, mir drei Verhaltensweisen einzuschärfen: „Weniger Auto fahren und fliegen, weniger Fleisch essen, weniger Kleider kaufen, dann bist du ein Freund der Erde, auch wenn das schwierig ist für dich.“

„Das ist alles?“

„Wir sagen doch, das ist wichtig und schwierig, unterschätze die revolutionäre Kraft dieser Ratschläge nicht! Aber wenn du noch mehr tun willst, so achte darauf, dass deine Wohnung gut isoliert ist und dass du sie nicht mit Heizöl oder Gas beheizest. Du kannst eine Solaranlage aufs Dach montieren oder eine Erdsonde im Boden versenken.“

Im 18. Jahrhundert formulierte der deutsche Philosoph Immanuel Kant mehrere Fragen welche uns heute noch umtreiben, weil sie

zeitlose Grundlagen der menschlichen Existenz in Worte fassen: Was kann ich wissen? Was soll ich tun? Was darf ich hoffen?

In Bezug auf den Klimawandel lassen sich diese Fragen zum heutigen Zeitpunkt durchaus beantworten.

Was kann ich wissen?

Nun, wir wissen es: Der deutliche Anstieg der Durchschnittstemperaturen in jeder Jahreszeit kann nicht mehr bestritten werden, egal, wo man wohnt. Die Ergebnisse der Klimaforschung sind eindeutig, oder mindestens zu 99% klar – und das letzte Prozent kann man den professionellen Schönfärbern überlassen, bis sie ausgestorben sein werden. Der Temperaturanstieg ist von den intelligentesten Lebewesen auf der Erde, genannt Homo sapiens, gemacht, weil sie zu viel Kohle, Erdöl und Erdgas zum Zweck des Verbrennens aus den Lagerstätten fördern. Dadurch steigt der Gehalt an Kohlendioxid in der Luft, und die wärmende Atmosphäre erwärmt sich zu stark. Es gibt keinen Zweifel mehr an diesem Zusammenhang.

Was soll ich tun?

Die radikalsten und zugleich wirksamsten Maßnahmen, die wir als Einzelpersonen verwirklichen können, sind der Verzicht auf das Autofahren (wobei das Auto als Personenwagen verstanden wird, der mit Benzin, Diesel oder Erdgas angetrieben wird und in dem eine bis vier Personen sitzen) und auf das Fliegen. Der Verkehr mit diesen Fortbewegungsmitteln verwandelt kostbare Rohstoffe in Kohlendioxid und Wasserdampf. Kaum weniger schlimm ist die Fleischerzeugung im großen Maßstab, weil sie Wasser, Kraftfutter wie Soja, Pestizide und Land benötigt. Für den Anbau von Soja und anderen Futterpflanzen wird nach wie vor in Brasilien und sonst wo Urwald gerodet; diese Flächen sind für die Natur auf lange oder sogar alle Zeit verloren. Stammt das Fleisch von Rindern so kommt noch dazu, dass sie als Wiederkäuer nicht unbedeutende Mengen des Klimagases Methan ausstoßen. Was die Kleidung betrifft, so ist nahezu jeder Stoff mit einem gewichtigen Rucksack an Umweltproblemen belastet. Beispielsweise benötigt Baumwolle für den Anbau sehr viel Wasser und Pestizide. Werden Textilien aus Chemiefasern

nur eine kurze Zeit lang verwendet und dann weggeworfen, so hat sich die „Zwischennutzung“ des Erdöls, bevor es verbrannt wird, kaum gelohnt.

Was darf ich hoffen?

Wir dürfen hoffen, dass viele Menschen sich dieser Zusammenhänge bewusst werden und es der Völkergemeinschaft durch große Anstrengungen gelingen wird, die Erde vor einer Klimakatastrophe zu bewahren. Erde – das heißt doch: ein kleiner Planet mit viel Wasser und genügend Luft, um eine unglaublich bunte Pflanzen- und Tierwelt zu beherbergen. Und die intelligentesten Lebewesen sind zu wunderbaren kulturellen und wissenschaftlichen Leistungen fähig.

Kant hat nicht nur Fragen gestellt, sondern auch Antworten formuliert. Eine davon lautet: „Handle so, dass die Maxime deines Willens jederzeit zugleich als Prinzip einer allgemeinen Gesetzgebung gelten könnte.“ Wir dürfen uns daher nicht einreden, wir müssten nicht umweltverträglich handeln, bloß weil unser Nachbar dies nicht tut.

Die Zukunft der Atmosphäre, der Erde und der Sauerstoffs

Das Jahr neigte sich seinem Ende zu, und wie immer in der Altjahreswoche wurde ich melancholisch. Was war in den letzten Monaten gelungen, was missraten, was würde das kommende Jahr bringen?

Zwischen den silbernen und roten Glaskugeln am Weihnachtsbaum entdeckte ich die Sauerstoffs, die sich gemütlich auf einem Tannenzweig räkelten. „Ihr seid vielleicht acht Milliarden Jahre alt, habt ihr mir einmal erzählt.“ Eine Diskussion mit den Kleinen würde meine Gedanken davon abhalten, sich in den immer gleichen Kreisen zu drehen. „Seid ihr eigentlich unzerstörbar? Werdet ihr nie zu Tode kommen?“

„Nein.“

Das war krass. Ich hatte gemeint, meine Fragen seien rhetorischer Natur, und deshalb keine so klare Antwort erwartet. Vor Überraschung fiel mir keine Entgegnung ein.

„Die Sonne deines Planetensystems ist ja nichts Besonderes. Sie ist so kosmischer Durchschnitt und jedenfalls nicht wirklich groß oder schwer. Sie wird allmählich immer etwas größer und heller werden. In einer Milliarde Jahren wird es für Tiere und Pflanzen auf der Erde zu warm werden, und sie werden wohl aussterben. Aber Menschen gibt es dannzumal vielleicht schon lange nicht mehr. Viel später wird sich die Sonne gewaltig aufblähen und dabei Merkur und Venus verschlucken. Die Erde wird sich gegen ihren Untergang noch eine Zeitlang wehren können, aber schließlich wird auch sie in die Sonne fallen. Wir werden mitfallen, aber das bringt uns nicht um. Für uns werden heiße und vor allem langweilige Zeiten anbrechen. Zuletzt wird die Sonne zu einer kleinen, kompakten und nicht mehr leuchtenden Kugel zusammenfallen, einem Weißen Zwerg.“

„Und ihr werdet einfach in dieser Kugel stecken und nichts tun?“

„Genau so wird es sein. Wir haben dir doch erzählt, dass wir in einem sehr großen Stern entstanden sind. Auch die Sonne wird auf ihr Alter hin noch Kohlenstoff- und Sauerstoffatome erzeugen, aber das wird es dann gewesen sein. Jedenfalls wird sie nicht, wie große Sterne, explodieren und ihre Materie weit in den Weltraum hinaus

schleudern. Als Weißer Zwerg wird sie langsam immer kühler werden und auf alle Zeiten im All herumdümpeln. Gar nichts mehr los für uns. Das sind deprimierende Zukunftsaussichten, aber bis dahin werden wir noch jede Menge Spaß haben!“

Die nähere Zukunft der Atmosphäre ist ungewiss, weil zur Zeit nicht abschätzbar ist, ob die Menschheit einen massiven Klimawandel noch abwenden kann. Falls der Gehalt an Kohlendioxid weiter ungebremst ansteigt, werden die Temperaturen überall auf der Erde ansteigen, mit sehr ungemütlichen Folgen.

Innerhalb von geologischen Zeiträumen (hundert Millionen Jahre sind da nicht besonders lang) stabilisiert sich der CO_2-Gehalt in der Luft eigentlich selber: Bedeutende Mengen verschwinden ständig in der Form von carbonatischen Sedimenten im Meeresgrund (am häufigsten als Calciumcarbonat $CaCO_3$), werden aber nach komplizierten geochemischen Prozessen im Erdinnern von Vulkanen wieder als CO_2 ausgespuckt. Allerdings könnte dieser Kohlenstoffkreislauf durch einen deutlichen Temperaturanstieg in der Atmosphäre gestört werden. Ist es auf der Erde wärmer, so ist auch das Regenwasser wärmer und die Erosion von Gesteinen geht schneller vonstatten. Dadurch wird mehr Carbonat sedimentiert und der CO_2-Gehalt der Luft sinkt schneller als er von Vulkanen wieder regeneriert werden kann. Weniger Kohlendioxid bedeutet weniger Pflanzenwachstum. Es gibt Klimamodelle, welche davon ausgehen, dass deswegen in 900 Millionen Jahren die Pflanzen und folglich auch die Tiere verhungern werden; so gesehen gehören die Menschen ebenfalls zu den Tieren. Bakterien werden nicht so schnell verschwinden. Sie werden bisherige und neuartige Strategien zur Energiegewinnung für ihre Lebensvorgänge benützen.

Die Sonne wird allerdings im Lauf von Milliarden Jahren heller werden und die Erde immer stärker erwärmen. Es wird mehr Wasser verdunsten, und weil Wasserdampf auch ein Klimagas ist, verstärkt dies den Treibhauseffekt. In etwa zwei Milliarden Jahren wird alles flüssige Wasser verschwunden sein, die Oberflächentemperatur der Erde wird 70 °C erreichen, und dann sind auch die Bakterien zum Aussterben verurteilt. Die Erde wird ein toter Planet sein.

In sieben Milliarden Jahren wird sich die Sonne massiv aufblähen und in den Zustand eines Roten Riesen gelangen. Sie wird die inneren Planeten, die Erde (und die Sauerstoffs) inklusive, verschlucken. In zehn Milliarden Jahren wird sie sich ausgetobt haben und zu einem extrem dichten und kleinen Weißen Zwerg schrumpfen. Ihr Leuchten wird über Milliarden von Jahren immer schwächer werden bis sie sich zu einem Schwarzen Zwerg gewandelt hat. Sie wird bis ans Ende der Zeiten nutzlos im All herumirren.

Ein Kribbeln im kleinen Zeh

Wieder saß ich in meinem Arbeitszimmer, Papiere ordnend. Und wieder saßen die Sauerstoffs auf dem Bücherbord.

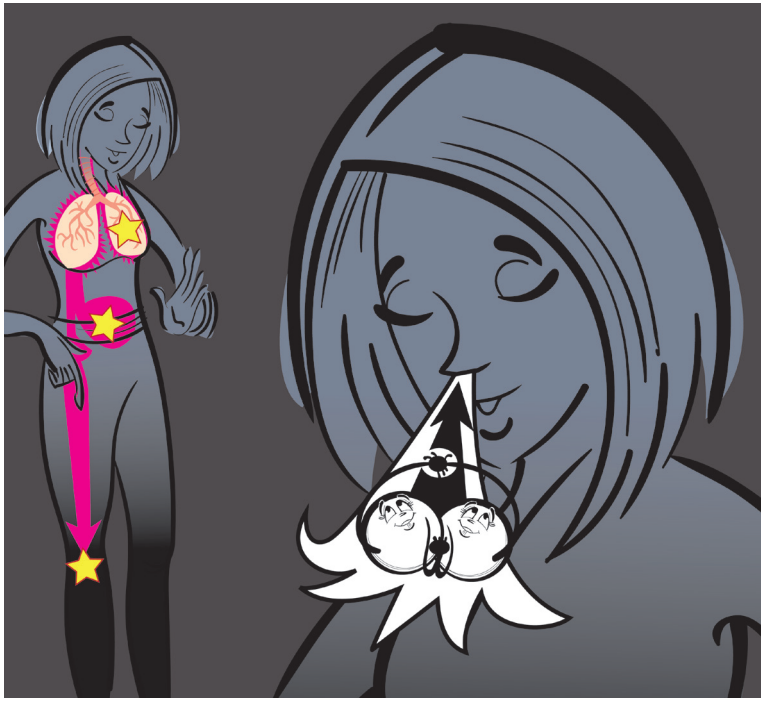
„Hallo, wie geht's?", piepsten sie. „Wir sind gekommen, um uns zu verabschieden. Wir haben dir alles erzählt was wir wissen."

„Oh, vielen Dank. Und jetzt wollt ihr gehen? Ich werde euch vermissen!"

„Nein, wir gehen nicht, wir kommen. Wir werden dir unsere Energie schenken, damit du leben kannst, nicht frierst und dir kluge Sachen überlegst. Und dann danach handeln, vergiss es nicht!"

Ich starrte die Doppelkugel an. Die Sauerstoffs bewegten sich auf mich zu, schrumpften und steuerten geradewegs mein linkes Nasenloch an. Es kribbelte in der Nase, gleich darauf in der Lunge und nach zwei Sekunden im Herzen. Das Kribbeln pflanzte sich durch den Bauch und das rechte Bein fort bis in den Fuß. Es kribbelte im rechten kleinen Zeh.

Ich sprang auf die Füße. Sie waren warm und beweglich. Ein Molekül, dank Sonnenlicht von einer Pflanze hergestellt, hatte in meinem Körper ein winziges Feuer entzündet.



Verzeichnis der Experimente

Experiment 1	Kohlendioxid als Löschmittel	Seite 20
Experiment 2	Rost (Büroklammer)	Seite 29
Experiment 3	Rost (Stahlwolle), Sauerstoffgehalt der Luft	Seite 30
Experiment 4	Fotosynthese	Seite 38
Experiment 5	Pflanzenkeimung	Seite 39
Experiment 6	Luftdruck	Seite 55

Stichwortverzeichnis

Das Stichwortverzeichnis soll helfen, wichtige Begriffe zu erkennen und zu finden. Nur in Ausnahmefällen werden diese mehrmals genannt: wenn sie wichtig sind und auf weit auseinander liegenden Seiten stehen. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit.

A
AdBlue 69
Adenosintriphosphat 22
Aluminium 36
Antioxidantien 29
Archaebakterien 51, 64
Archaeen 51
Atemgas 28
Atmosphäre 57

B
Bakterien 53, 72
Bienenwachs 19
Blutkörperchen 15

C
Calciumcarbonat 88
Chlorophyll 40
Cofaktor 17
Crutzen, Paul 66
Cyanobakterien 54

E
Edelgase 14
Eisenoxid 30
Eiweiße 22
Elektronen 10
Erde 47

F
FCKW 64
Feinstaub 68
Fette 24
Feuer 19
Fluorchlorkohlenwasserstoffe 64
Fotosynthese 40

G
Gärung 75
Gold 35
Gravitation 45

H
Häm 17
Hämoglobin 15
Harnstoff 26, 69
Hexan 20
Holz 19, 41
Hydroxyl-Radikal 27

I
inert 14, 36
Infrarotstrahlung 78

K
Kalifeldspat 50
Kant, Immanuel 84
Katalysator 69
Kerze 19
Kohlendioxid 14, 75
Kohlenhydrate 22
Kohlenmonoxid 18
Kohlenstoffdioxid 14, 75
Kupfer 38

L
Lignin 41
Luft 12, 57
Luftdruck 58

M
Magnesium 35, 48
Magnetresonanz-Tomograf 14
Molina, Mario 66
Myoglobin 22

N
Natrium 37
Natriumbicarbonat 81
Natron-Tabletten 81
Neutronen 9
Nickel 48
Nitrifizierer 73
Nitrit 73
Normaldruck 58
Nukleosynthese 45

O
Ozon 53, 62
Ozonschicht 55, 61

P
Paraffin 19
Permafrost 83
PET-Flasche 33, 59
Proteine 24
Protonen 9

R
Radikale 27
Rost 30
Rostschutzfarbe 31
Rowland, Frank 66
Rückkopplungen 82
Rückkopplungs-Effekt 83
Ruß 68

S
Sauerstoffmolekül 8
Schutzschild 61
Schwefeldioxid 70
Schwefeltrioxid 70
Silicium 48
Smog 68
Spurenelemente 22
Stickoxide 68
Stickstoff-Dioxid 68
Stickstoff-Fixierer 73
Stickstoff-Monoxid 68

T
Thermografie 78
Treibhauseffekt 80

U
Urbakterien 51
Urknall 45
UV-Licht 52, 61

V
Verbrennung 7, 24
Verbrennungsmotoren 68
Verstärkungs-Mechanismus 83
VOCs 70
volatile organic compounds 70

W
Wasser 20

Z
Zellulose 41
Zündquelle 21

Dr. Veronika R. Meyer ist Chemikerin mit Promotion in analytischer Chemie an der Universität Bern. Habilitation 1996 und Lehrtätigkeit ebenda. Autorin von Lehrbüchern zur HPLC. Interessensgebiete ihrer beruflichen Laufbahn an der EMPA St. Gallen waren analytische Chemie, insbesondere Chromatographie, Qualitätssicherung, Messunsicherheit. 2017 wurde sie von der IUPAC zur „Distinguished Woman in Chemistry / Chemical Engineering" ernannt.
Seit ihrer Jugend ist Veronika Meyer zudem begeisterte Bergsteigerin. 2010 zählte sie ihre 1000. Bergbesteigung – wobei als Berg ein solcher mit mindestens 2000 Metern Höhe galt. Einer der 1000 Gipfel war der Mount Everest.
2011 veröffentlichte sie darüber das Buch „Gaias Gipfel". Nicht erst seit ihrem Ruhestand vor wenigen Jahren hinterfragt sie auch aktuelle technische und gesellschaftliche Entwicklungen. Ein Szenario dazu veröffentlichte sie in dem Buch „Stromlos – Ein Wimmelbild des Schreckens" 2016.
Dieses vorliegende kleine Buch ist ein Beispiel für die Begeisterung der Autorin für die Naturwissenschaften sowie für ihr Interesse, dies einer breiten Allgemeinheit verständlich und unterhaltsam zu vermitteln.

Hallo, wir heißen Sauerstoff

Ein Gespräch mit Erläuterungen und Experimenten

Veronika R. Meyer

In diesem kleinen Buch geht es um das häufigste Element auf unserer Erde, um Sauerstoff. Geschrieben ist es in populärer und amüsanter, aber wissenschaftlich korrekter Form. Der Witz des Textes ist, dass es sich dabei um eine Kommunikation mit dem Sauerstoff handelt, er also selbst zu Wort kommt. Jedes Gesprächsteil, jedes Thema wird dann allerdings noch um einen erläuternden Text erweitert, um die Sache genauer darzustellen.

ISBN 3-9810449-5-9

9 783981 044959