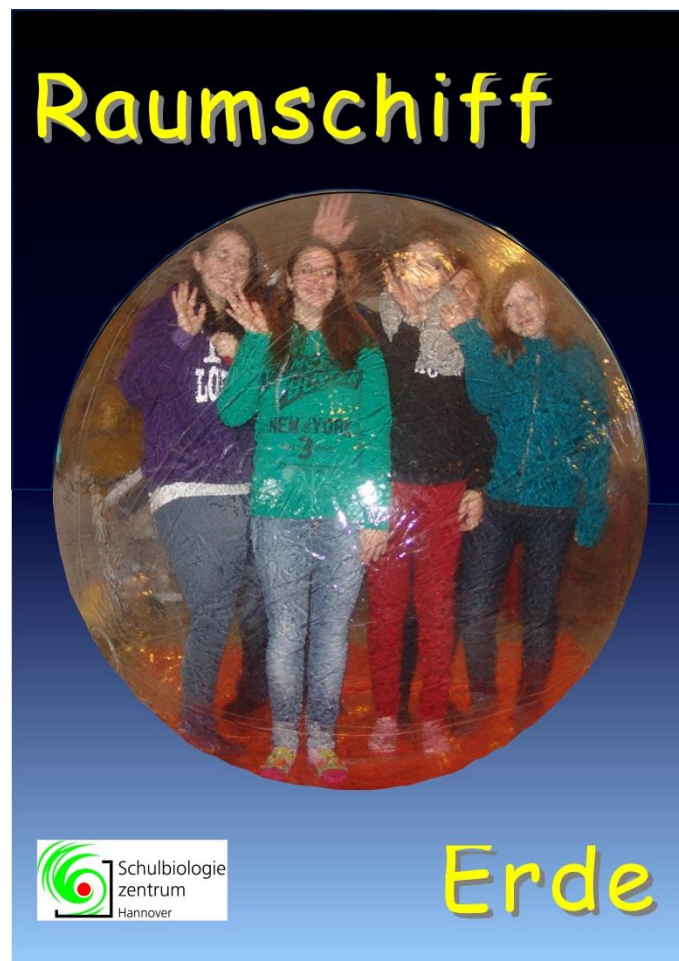


**Landeshauptstadt
Hannover**



Schulbiologiezentrum



19.67

**"Raumschiff Erde":
(Über)Leben in der Gummisphäre?**

Dezember 2013

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Schulbiologiezentrum Hannover

Titel: "Raumschiff Erde"
(Über)Leben in der Gummisphäre?

Arbeitshilfe 19.67

Verfasser: Ingo Mennerich

Titelbild: Ingo Mennerich

Herausgeber: Landeshauptstadt Hannover
Fachbereich Bibliothek und Schule
Schulbiologiezentrum
Vinnhorster Weg 2
30419 Hannover
Tel: 0511/168-47665
Fax: 0511/168-47352
E-Mail: schulbiologiezentrum@hannover-stadt.de
Internet: www.schulbiologiezentrum.info

Inhalt

Vorwort	1
Unsere Erde ist viel kleiner als wir denken	2
Wie viel Platz brauchen wir Menschen?	3
Darf man Lebewesen einsperren?	4
Das „Raumschiff Erde“ auf der IdeenExpo 2013	5
Ressource „Luft“	7
• Wie viel Platz ist im „Raumschiff Erde“?	7
• Wie viel Sauerstoff steht mir eigentlich auf der Erde zur Verfügung?	8
• Wie groß ist mein „CO ₂ -Würfel“?	8
• Wie viel Atemluft ist im „Raumschiff Erde“ enthalten?	8
• Stickstoff-, Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt im „Raumschiff Erde“	9
• Ein- und ausgeatmete Luft	10
• Das Nettovolumen des „Raumschiffs“	10
• EXCEL-Programm: O ₂ - und CO ₂ -Konzentration im "Raumschiff"	11
• Anstieg der CO ₂ -Konzentration mit einem "Raumfahrer"	12
• CO ₂ - und O ₂ -Gehalt mit einem oder mehreren "Raumfahrern"	13
• Grenzwerte CO ₂ und O ₂	13
• Auswirkung und Gefährdung abnehmender Sauerstoffkonzentration	13
• Auswirkung und Gefährdung zunehmender CO ₂ -Konzentration	13
• Monitoring im "Raumschiff": Unsere Messgeräte	14
• Sauerstoff-Messgerät.....	14
• Kohlenstoffdioxid-Messgerät	14
• Atemvolumen mit dem Spirometer messen	15
• Thermometer und Hygrometer	15
• Luftdruck mit dem Barometer messen.....	15
• Pflanzen ersetzen verbrauchten Sauerstoff.....	16
• Sauerstoffbildung durch die Wasserpest Elodea	17
• Wie viel Sauerstoff können Pflanzen erzeugen?	17
• Sauerstoffproduktion durch Elektrolyse	18
• Wie man CO ₂ "entsorgen" kann	19
• Aufbau einer CO ₂ -"Entsorgungseinrichtung"	22
• Wie viel CO ₂ kann Atemkalk binden?	23
Ressource „Wasser“	24
• Luftfeuchtigkeit Im „Raumschiff Erde“	25
• Temperatur und maximaler Wasserdampfgehalt der Luft.....	26
• Wasserrecycling: Urin in Trinkwasser verwandeln?.....	29
• Destillation von „Urin“ mit Teelichten.....	29
Ressource „Wärme“	31
• Wärmendes Feuer?.....	32
• Alternative „Solarkollektoren“.....	32
• Gibt es einen Treibhauseffekt im „Raumschiff Erde“?.....	33
Ressource „Licht“	33
Ressource „Strom“	33
• Vom "Muskelkraftwerk“ zur solar betriebenen Brennstoffzelle.....	33
• Wie viel Strom verbrauchen wir im „normalen“ Leben?	34

Ressource „Nahrung“	36
• Zucker als Energiequelle.....	36
• Wie viel Sauerstoff verbrauchen wir beim Essen? Wie viel CO ₂ und H ₂ O entstehen dabei?	37
• Grund- und Leistungsumsatz: Energieverbrauch eines Menschen.....	38
• Die einfachste Lösung: Müsli-Riegel (Lecker, raumsparend bei hohem Energiegehalt).....	39
• Brötchen: Mitnehmen oder selbst erzeugen?	39
• Der „Brötchenacker“ im Schulbiologiezentrum.....	41
• Wie viele Weizenkörner muss man für eine gute Ernte in die Erde bringen?	41
• "Hühner oder Eier": Was nehme ich mit?	42
• Wie viel Futter, wie viel Platz braucht ein Hühnerei?	42
• Wie viel Futter brauchen die Hühner im Schulbiologiezentrum?	43
• Noch mehr Platz: Chicken-Nuggets.....	44
Ressource „Abfall“	46
• Dünger für das „Raumschiff“? Die Recycle“-Toilette.....	46
• Wer Eiweiß isst muss „Wasser lassen“!.....	46
• Pee-Poo: Das "Große Geschäft" wird zu Dünger.....	47
• Wie viel „Müll“ erzeugt der „Raumfahrer“?.....	48
• Sauerstoffverbrauch und CO ₂ -Entwicklung durch Abbauprozesse.....	48
• Abbaubare und nicht abbaubare Stoffe.....	49
• Biomüll.....	49
• Papier.....	49
• Kunststoffe.....	49
• Metalle.....	51
• Wie lang braucht es, bis der Müll verschwunden ist?	51
Ein kurzes Nachwort.....	52

Vorwort:

Die Idee zu diesem Thema entstand beim hannoverschen Maschseefest: Kinder tollten in riesigen aufgeblasenen Bällen, so genannten "Water-Walking-Balls" auf dem See herum, wild darin herumspringend, Purzelbäume schlagend, verloren in einer scheinbar eigenen Welt. Man muss Vertrauen haben, wenn man in einen solchen Ball einsteigt. Nachdem man sich durch den engen Schlitz in das Innere der Gummihülle gezwängt hat, die Haare im Luftstrom des Kompressors durcheinander gewirbelt wurden und der Reißverschluss hinter einem zugezogen wurde ist man in einer anderen Welt. Zwar lässt die Gummihülle noch einen, allerdings etwas verschleierten Blick auf die Umwelt zu, dann aber dringen alle Außengeräusche nur noch wie durch Watte an unsere Ohren.

Maximal 10 Minuten, hat der Mann gesagt, dann ist Schluss. Nicht nur, weil noch andere warten und nicht nur, weil der mit 5 Euro bezahlte Spaß natürlich einmal ein Ende haben muss. Nein, irgendwann ist die Luft im Ball verbraucht und dann sollte der Reißverschluss rechtzeitig wieder geöffnet werden. Was man übrigens nur von außen tun kann...

So verlassen muss man sich also auf jemanden verlassen können...

Beim Zusehen dachte ich, was wohl wäre, wenn jeder in einer solch kleinen Welt leben müsste. Wie lange würde er sich darin wohl fühlen? Was hätte man mitnehmen sollen?

Ich bin dann selbst in einen solchen Ball gestiegen, im Trockenen und habe, unter den Augen eines Kollegen, an mir selbst ausprobiert, wie lange ich es darin aushalten kann.

In dieser dreiviertel Stunde schossen mir viele Gedanken durch den Kopf.

Einer davon ist mir besonders in Erinnerung geblieben:

Was brauchen wir wirklich auf dieser Erde?

Wieviel Pflanzen braucht man im Weltall?

Lehrer lernen auf Fortbildung im Schulbiologiezentrum spannende Experimente für ihre Schüler

VON ANDREAS KRASSELL

HANNOVER. Wie lange hält man es in einem Plastikball aus? Veronika Katterbe und Stefan Zantopp testen es aus. Während sie atmen, verbrauchen sie Sauerstoff, erzeugen Kohlendioxid. Auf Messgeräten kontrollieren sie die Konzentration der Gase in der durchsichtigen Hülle.

Die Lehrer lernen bei einer Fortbildung im Schulbiologiezentrum (SBZ), wie sie ihren Schülern Themen wie Biodiversität und Klimawandel anschaulich vermitteln können. Der Plastikball ist dabei eine Biosphäre und stellt das „Raumschiff Erde“ dar, die Passagiere sollen sich überlegen, was sie mitnehmen müssten, wenn sie morgen den Heimatplaneten verlassen und nicht zurückkehren würden.

Pflanzen wären bei einer solchen Reise unverzichtbar, da sie das Kohlendioxid wieder in Sauerstoff umwandeln. Vorausgesetzt, die Photosynthese funktioniert. Zu der man Licht bestimmter Wellenlängen braucht.

Rund 20 Pädagogen von Schulen aus der ganzen Region nehmen an der Fortbildung teil. Sie ist Teil des EU-Projekts Inquire oder auch Inquiry Based Science Education (IBSE), was wissenschaftlich-forschendes Lernen meint. Schüler sollen so erfahren, wie wissenschaftliche Erkenntnisse zu Stande kommen: Beobachten, Fragen entwickeln, dann Hypothesen, Experimente, um sie zu überprüfen. Ergebnisse kritisch reflektieren, gegebenenfalls neue Hypothesen aufstellen.

Im Inquire-Projekt erarbeiten 17 Institutionen aus elf Ländern einjährige Fortbildungskurse, die europaweit mehrere Hundert Lehrkräfte und Tausende von Schülerinnen und Schülern erreichen sollen. Neben einem Bremer Uni-Institut ist das Schulbiologiezentrum dabei die einzige deutsche Einrichtung.

Der klassische Lernweg von Versuch und Irrtum, doch im Schulalltag bleibt dafür meistens keine Zeit. Auch die Bilehrer müssen sich erst mit dieser Methode vertraut machen. Die Mitarbeiter des Schulbiologiezentrums haben Kisten mit Pflanzen aus den verschiedensten Klimazonen gepackt, die nun auf den Tischen ausgebreitet werden. Die Lehrer teilen sich in Gruppen auf. Jede hat es nun mit 24 Pflanzen zu tun. Das große Programm für die Experten: „Schüler bekommen nur 13 Pflanzen“, sagt Projektleiterin Anke Maethan, „aber für die ist jede Pflanze auch erst mal nur grün. Diesen Zahn wollen wir ihnen ziehen.“

Es geht darum, die Pflanzen nach Klimazonen zu sortieren. Die Lehrer sollen anhand der äußeren Beschaffenheit auf die Bedürfnisse schließen. Trocken, feucht oder gar nass? Sonnig oder schattig? Kalt oder heiß? „Diese hier könnte nicht in kalten Gebieten stehen“, vermutet eine Teilnehmerin. „Die Oberfläche der Blätter ist zu groß.“ Eine andere Pflanze hat besonders fleischige Blätter, Zeichen einer sonnigen Umgebung? Das Fleischtige schützt gegen die Sonne und Verdunstung.

Eines von vielen Experimenten, dass die Lehrer bei dieser Fortbildung ausprobieren können. Zu allen hat das SBZ Experimentierkästen entwickelt, die die Schulen ausleihen können.

Das Fortbildungsprojekt besteht aus drei Projekttagen, vergangene Woche war Halbzeit. Die Lehrer sind begeistert. „Viele Schüler blähen dabei richtig auf“, sagt Almuth Kläß von der Sophien-schule. Sie hatte schon vom ersten Projekttag Anregungen mitgenommen und im Unterricht einer fünften Klasse eingebaut.



REISE: Stefan Zantopp und Veronika Katterbe simulieren das „Raumschiff Erde“. Foto: SBZ



VERSUCH: Verschiedenfarbige Flüssigkeiten helfen, den Ablauf der Photosynthese unter verschiedenen Lichteinwirkungen nachzuvollziehen. Foto: SBZ



STUDIUM: Unter dem Mikroskop kann Veronika Katterbe den Blattaufbau unterschiedlicher Pflanzen leicht untersuchen.

Bericht über einen Lehrerfortbildungskurs ("Inquire") im Schulbiologiezentrum Hannover (Hannoversche Presse), 2012

Unsere Erde ist viel kleiner als wir denken...



Foto: WIKIPEDIA

Auf dem 150 m langen "Planetenpfad", einem Teil des Energiegartens im Schulbiologiezentrum, sind die Sonne und die neun* Planeten des Sonnensystems maßstabsgetreu aufgereiht.

Unser Planet ist hier ein nur 7 m vom "Golfball Sonne" entfernter "Krümel Erde", kleiner als ein Stecknadelkopf.

Dabei ist die Erde noch viel kleiner! Wir bewohnen nämlich nur die äußerste Schicht - die unterste Atmosphäre vom Erdboden bis zur Höhe von wenigen tausend Metern. Diese dünne "Haut" macht nur einen Bruchteil unseres Planeten aus.

*) Pluto war zum Zeitpunkt des Baus noch ein Planet

Im Folgenden vergleichen wir das Volumen der von Lebewesen bewohnte "Ökosphäre" der Erde und das Volumen des gesamten Planeten und formen diesen als Schale auf der Erde liegenden Lebensraum zu einer Kugel um.

Die Erde ist keine Kugel sondern ein durch die Eigenrotation abgeplattetes Rotations-Ellipsoid. Der Erddurchmesser beträgt 12.756,32 km (am Äquator) bzw. 12.713,55 km (am Pol). Wir denken uns im Folgenden aber vereinfachend die Erde als Kugel mit einem durchschnittlichen Durchmesser von 12734,935 km und einem Radius von $r = d/2 = 6367,4675$ km. Das Volumen dieser Kugel beträgt nach

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \rightarrow V_{\text{Erde}} = 3,442222567 \times 10^{11} \text{ km}^3$$

Die vom Menschen nutzbare Ökosphäre reicht vom Erdboden (von Kellern, U-Bahn-Schächten und ähnlichem einmal abgesehen) bis zu einer Höhe von etwa 5300 m Höhe, wobei das Leben in Höhen oberhalb von 2500 m einer Akklimatisation bedarf. Flugzeuge steigen auf 13000 m auf, sind aber von der Umgebung isolierte "Klimakammern".
Gehen wir aber einmal von 5300 m aus:

Wir addieren zum Erdradius die Höhe der Ökosphäre:

$$6367,4675 \text{ km} + 5,3 \text{ km} = 6372,7675 \text{ km}$$

Anschließend berechnen wir das Volumen Erde und der Ökosphäre:

$$V_{\text{Erde+Ökosphäre}} = 3,450825188 \times 10^{11} \text{ km}^3$$

Das Volumen der nutzbaren Ökosphäre ist dann:

$$V_{\text{Ökosphäre}} = (V_{\text{Erde+Ökosphäre}}) 3,450825188 \times 10^{11} \text{ km}^3 - (V_{\text{Erde}}) 3,442222567 \times 10^{11} \text{ km}^3 = 860262100 \text{ km}^3$$



Ökosphäre der Erde

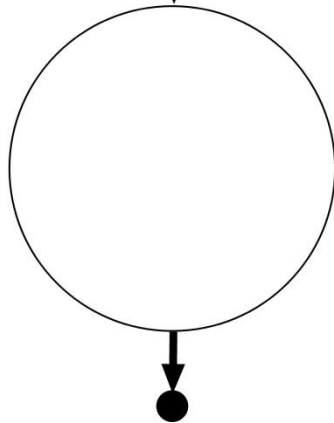


Foto: WIKIPEDIA,
Grafik Ingo Mennerich

Formen wir die dünne, die Erde umspannende "Haut" der Ökosphäre zu einer Kugel um beträgt ihr Radius

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{4\pi}} = 589,99 \text{ km und der Durchmesser } 1179,99 \text{ km}$$

Für jeden einzelnen der 7,106 Milliarden auf der Erde Menschen stünde, ganz gerecht verteilt, ein Volumen von $860262100 \text{ km}^3 / 7,106 \times 10^9 = 0,121061371 \text{ km}^3$ oder $121061370,7 \text{ m}^3$ zur Verfügung.

Das ist eine Kugel mit dem Radius $r = \sqrt[3]{\frac{V}{4\pi}} = 306,88 \text{ m}$ oder dem Durchmesser $613,76 \text{ m}$.

Man kann es auch einfacher (und ohne große Zahlen) darstellen: Ein blauer Gymnastikball sei die Erde. Sie wird in einen eng anliegenden Sack gesteckt der oben fest zugebunden und dort abgeschnitten wird. Der Sack sei die Atmosphäre der Erde. Der Stoff darf also nur so dick sein wie die Atmosphäre im Verhältnis zur "Erde". Wenn wir den Sack öffnen, die Erde herausholen und den Stoff zu einer Kugel zusammenknüllen können wir sehen wie klein unsere "Biosphäre" im Verhältnis zu "Mutter Erde" ist...

Im Prinzip nimmt unser Lebensraum noch weniger Raum ein: Wer nicht gerade auf einer Leiter steht oder auf einem Baum sitzt besetzt nur den untersten Teil der Ökosphäre bis zu einer Höhe die seiner eigenen Körpergröße entspricht.

Wie viel Platz brauchen wir Menschen?

Die Landfläche der Erde, verteilt auf alle Kontinente und Inseln ist etwa 148,9 Millionen km^2 groß. Das sind ungefähr 29 % der Erdoberfläche. Auf der Erde leben etwa 7,106 Milliarden Menschen. Ganz gerecht verteilt steht jedem von uns eine Fläche von $0,021 \text{ km}^2$ oder 20954 m^2 zur Verfügung. Das ist ein Quadrat mit der Seitenlänge $144,76 \text{ m}$.

Nehmen wir einmal an, jeder Mensch müsste als Selbstversorger damit auskommen.

Reicht diese Fläche?

Nur 49,1 Millionen km^2 (32,9%) der Landfläche werden landwirtschaftlich genutzt.

Das reduziert die Subsistenzfläche auf etwa 6912 m^2 pro Kopf der Weltbevölkerung. Das ist ein etwa $83 \times 83 \text{ m}$ großer "Acker".

Reicht diese Fläche? Wie viel Fläche brauchen wir um unsere Nahrungsmittel selbst herzustellen?

Wie viele Brötchen, Äpfel, Salatköpfe oder Rindersteaks brauchen wir?

Ein anderer Gedanke:

Nehmen wir einmal an dass sich alle 7,106 Milliarden Menschen dieser Erde zu einem spontanen "Flashmob" in Hannover verabreden. Dicht an dicht gedrängt stehen 4 Menschen auf einem Quadratmeter.

Die Gesamtheit der Menschen bedeckt damit eine Fläche von $7,106 : 4 = 1776500000 \text{ m}^2$.

Ein Quadratkilometer enthält $1000 \times 1000 \text{ m} = 1000000 \text{ m}^2$.

Die Menschheit hätte also, so dicht zusammenstehend, auf einer Fläche von $1776,5 \text{ km}^2$ Platz.

Das ist ein Kreis mit dem Radius $23,78 \text{ km}$ ($r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$).



Grafik: WIKIPEDIA

Die Region Hannover hat eine Fläche von 2291 km^2

Etwas geräumiger, mit einer Person pro Quadratmeter würde die Menschheit eine Fläche mit der Seitenlänge $84,3 \text{ km}$ bedecken (7106 km^3).

Das entspricht einer Kreisfläche mit dem Radius $47,56 \text{ km}$.

Würden sich alle Menschen der Erde in Deutschland ($357.121,41 \text{ km}^2$) versammeln stünden jedem von uns $3,5712141 \times 10^{11} / 7,106 \times 10^9 = 50,26 \text{ m}^2$ Land zur Verfügung. Etwa 7×7 Meter. Wäre das genug?

Nicht berücksichtigt bei diesen Überlegungen ist natürlich die Tatsache, dass wir Menschen uns die Welt mit anderen Lebewesen, Lebermoosen, Strandnelken, Stieleichen, Dattelpalmen, Eisbären, Giraffen, Flohkrebse und Pantoffeltierchen teilen! Auch sie brauchen Platz!

Darf man Lebewesen einsperren?



Darf man das?

Eine Maus* unter eine Glasglocke setzen?

Nein, natürlich nicht!

Aber die Frage sei erlaubt:

Wie lange hält sie das aus, bevor ihr die Luft ausgeht?



Fotos: Ingo Mennerich

Was ist, wenn man eine Pflanze dazusetzt?

Kann die Pflanze genug Sauerstoff für die Maus liefern?

Wie lange hält die Maus* dann aus?

Oder sollte man besser mehrere Pflanzen nehmen?

Wenn ja, wie viele?

*) Die "Maus" ist ein Katzenspielzeug aus Stoff!

Manchmal muss etwas erst nicht mehr da sein bevor man merkt, was man daran gehabt hat



Das "Raumschiff Erde" auf der IdeenExpo 2013

Überleben in der "Gummisphäre":
Was nehmen wir mit?

(Bewerbungs-Exposé)

Unsere gemeinsame Heimat, die Erde, ist groß. So groß, dass die meisten nur einen kleinen Teil davon kennen lernen werden.

Die Erde ist zugleich, verglichen mit der Sonne und dem Sonnensystem, nur ein unbedeutender winziger "Krümel", ein durch das All jagendes und sich dabei drehendes blaues "Raumschiff".

Doch wann nehmen wir die Erde schon mal als "Raumschiff" wahr? Das möglicherweise "abstürzen" könnte?

Alle "lebenserhaltenden Systeme" wie Luft, Nahrung und Rohstoffe und daraus hergestellte Dinge scheinen unbegrenzt und selbstverständlich vorhanden zu sein. Das sind sie nicht.

- Was wäre, wenn morgen ein Komet auf die Erde träfe?
- Was wäre, wenn sowohl unsere Atemluft als auch unsere Nahrung vergiftet wäre?
- Was wäre, wenn uns die Nahrung und das Wasser ausginge?
- Was wäre, wenn wir von tödlichen Viren bedroht wären
- Was wäre, wenn unsere einzige Überlebenschance darin bestünde, ein kleines "Raumschiff" zu besteigen? Würden wir sie nutzen?
- Was wäre, wenn wir uns auf kleinstem Raum beschränken müssten?
- Was würden wir dann mitnehmen?

Wir überlegen uns gemeinsam, wie wir uns für eine Reise ohne Wiederkehr oder ein Überleben in einer lebensfeindlichen Umwelt einrichten wollen. Die Enge des "Raumschiffs" zwingt uns, über die wirklich wichtigen Dinge im Leben nachzudenken, z.B.:

- Wie viele dürfen mit ins "Raumschiff"? Wer und wer nicht?
- Wie lange reicht die Luft, das Wasser, die Nahrung? Wie könnte man sie ersetzen?
- Was machen wir, wenn uns zu kalt oder zu warm wird?
- Was machen wir, wenn es dunkel ist?
- Was geschieht mit unseren "Hinterlassenschaften" die wir normalerweise ohne groß nachzudenken der Toilettenspülung überlassen?
- Wo lassen wir unseren Müll?

Dann besteigen wir das "Raumschiff", eine "Gummisphäre"¹ mit zwei Metern Durchmesser für einen ersten imaginären "Testflug":

Alle Weltraumprojekte haben mit Fragen und dazu passenden Experimenten begonnen. In Biosphären hat man versucht, die Lebensbedingungen der Erde im Kleinen nachzuahmen.

¹ Das Raumschiff ist ein handelsüblicher Water-Walking-Ball.

Das Schulbiologiezentrum Hannover beschäftigt sich seit mehr als zwanzig Jahren mit künstlichen dicht verschlossenen Ökosystemen. Einige der sich daraus ergebenden Fragestellungen und Experimente möchten wir auf der IdeenExpo 2013 präsentieren.

- Wie viel Luft braucht ein Mensch eigentlich?
Wir messen das Atemvolumen und die Atemfrequenz, den O₂ und CO₂-Gehalt der ein- und ausgeatmeten Luft und überschlagen am Computer die mögliche Aufenthaltszeit in der "Gummisphäre".
- Wie viel O₂ erzeugen Pflanzen und unter welchen Bedingungen? Wie viel CO₂ binden sie?
Wir messen die O₂-Produktion bei der Photosynthese sowie die Gaszusammensetzung in kleinen Biosphären und errechnen, wie viele Pflanzen wir im "Raumschiff" halten müssten.
- Wirkt sich der steigende CO₂-Gehalt als ein das Raumschiff erwärmender "Treibhauseffekt" aus?
Wir messen die Temperaturen in mit CO₂ angereicherten Glasglocken.
- Lässt sich Sauerstoff aus Wasser und Sonnenlicht gewinnen?
Wir spalten Wasser mit aus Solarzellen gewonnenem Strom in H₂ und O₂ und ermitteln, wie viel Wasser und elektrische Leistung zur Deckung unseres Sauerstoffbedarfs erforderlich wäre.
- Wie viel Wasser wird im "Raumschiff" benötigt? Lässt es sich recyceln?
Wir experimentieren mit geschlossenen Wasserkreisläufen und versuchen, "verbrauchtes" Wasser und unsere Ausscheidungen in Trinkwasser zurück zu verwandeln.
- Wie viel Nahrung benötigen wir? Und wie viel Platz zu ihrer Erzeugung?
Wir backen ein Brot aus Getreidekörnern und ermitteln dabei, wie viel Ackerfläche dazu notwendig ist. Und wie viel Ackerfläche in einer Packung Chicken-Nuggets steckt.
- Wie viel Nahrung können wir in einer Biosphäre erzeugen?
Wir säen Getreide in verschlossenen Gefäßen aus und versuchen es zur Reife zu bringen.

Die künstliche Verknappung der als unbegrenzt erlebten Ressourcen führt zu weiteren Fragen:

- Wie viel Atemluft gibt es eigentlich auf der Erde?
- Wie viel Atemluft steht einem Menschen (gerechterweise) eigentlich zur Verfügung?
- Wie viel Wasser braucht die mit ihren großen Ozeanen so wasserreiche Erde?
- Wie viel Platz brauchen wir zur Erzeugung unserer Nahrung?
- Wie viel Platz brauchen wir zur Erzeugung der Dinge des täglichen Konsums?
- Wie viel Platz und wie viele Ressourcen braucht der Mensch?
- Wie können wir uns diesen zwar großen aber doch endlichen Lebensraum nachhaltig sichern?



Unsere erste gemeinsame "Raumfahrt":
 IGS Mühlenberg, Wahlpflichtkurs NW 7. Jg, Herbst 2010
 Foto: Ingo Mennerich

Ressource "Luft"

Wie viel Platz ist im "Raumschiff Erde"?

Der Water-Walking-Ball hat einen Durchmesser von 2 m.
 Das Volumen der Kugel beträgt nach der Formel

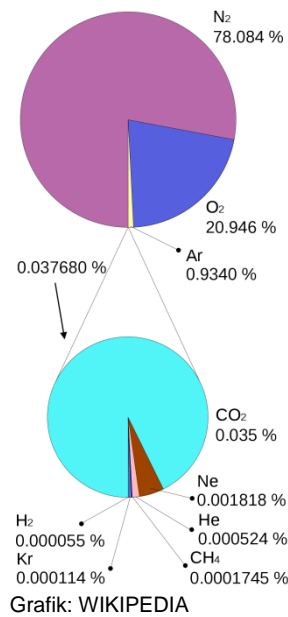
$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad V = 4,189 \text{ m}^3$$

Ein Quader mit dem gleichen Volumen hätte die Seitenlängen $\sqrt[3]{4,189} = 1,61 \text{ m}$

Die wichtigsten Gase der Erdatmosphäre sind:

Stickstoff (N ₂)	78,1 %	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	0,04 %
Sauerstoff (O ₂)	20,9 %	Wasserdampf (H ₂ O)	0 - 4 %
Argon (Ar)	0,9 %		

Wie viel Sauerstoff steht mir eigentlich auf der Erde zur Verfügung?



Die Gesamtmasse der Erdatmosphäre beträgt etwa 5×10^{18} kg entsprechend 5×10^{15} Tonnen (5.000.000.000.000.000 t).
Drei Viertel der Gesamtmasse befinden sich unterhalb einer Höhe von 11 Kilometern.

Sauerstoff macht 20,9% des Volumens der Erdatmosphäre aus. In Bezug auf ihre Masse sind es 23,16 %.

Damit befinden sich $1,158 \times 10^{15}$ t O_2 (1.158.000.000.000.000 t) in der Atmosphäre..

Quellen: Wikipedia, „Sauerstoff“, „Atmosphäre of Earth“, eigene Berechnung

Jedem der 7,106 Milliarden Menschen auf der Erde stehen also 162960,8 t O_2 zur Verfügung.

Bei einer Dichte von $1,17 \text{ g/l}$ (20°C , 1013 hPa) = $1,117 \text{ kg/m}^3$ wären das 182027301 m^3 Sauerstoff oder ein "Sauerstoffwürfel" mit etwa 567 m Seitenlänge...

Auch hier dreht sich alles nur um den Menschen der sich ja – und das bleibt hier der Einfachheit halber unberücksichtigt – die Erde mit anderen Lebewesen teilt!

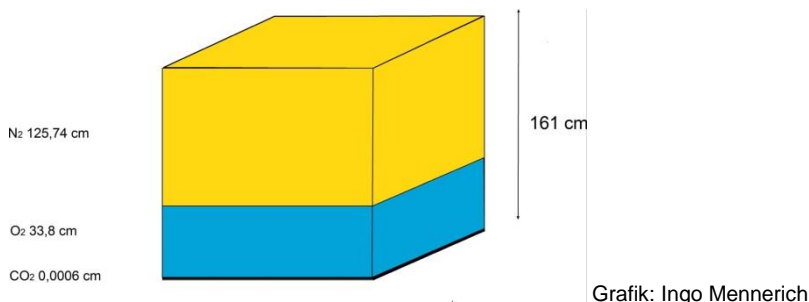
Wie groß ist mein CO₂-Würfel?

In der Atmosphäre sind etwa 3000 Gigatonnen CO_2 enthalten. Das sind 3×10^{12} t.

Auf jeden Menschen entfallen damit 422 Tonnen (die er sich natürlich mit anderen Lebewesen teilt!). Bei einer Dichte von $1,98 \text{ kg/m}^3$ (0°C , 1013 hPa) sind das 213221 m^3 entsprechend einem CO_2 -Würfel mit etwa 60 m Seitenlänge.

Wie viel Atemluft ist im „Raumschiff Erde“ enthalten?

In einem Würfel mit dem Volumen eines Water-Walking-Balls würden sich CO_2 , O_2 und N_2 so verteilen:



Wenn man N_2 -, O_2 - und CO_2 - Anteile, bezogen auf ein Volumen eines Water-Walking-Balls in Form von einzelnen Würfeln veranschaulichen möchte:

Gas	Volumen	Seitenlänge Würfel
Stickstoff (N_2)	$3,272 \text{ m}^3$	1,485 m
Sauerstoff (O_2)	$0,876 \text{ m}^3$	0,957 m
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	$0,0017 \text{ m}^3$	0,119 m

In geschlossenen Räumen liegt der CO₂-Gehalt bei etwa 0,1%

Bezogen auf den Water-Walking-Ball (4,189 m³):

Stickstoff (N ₂)	3,309 m ³
Sauerstoff (O ₂)	0,880 m ³
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	0,040 m ³

Zur Darstellung der Volumenanteile benutzen wir den Water-Walking-Ball:

Kugelkalotte

$$V_{KS} = \frac{h^2\pi}{3}(3r - h).$$

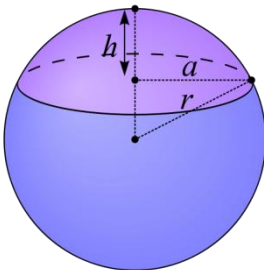


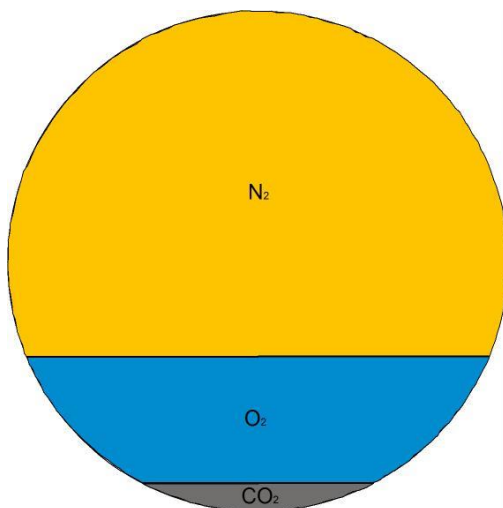
Abb.: WIKIPEDIA

Es ist sehr kompliziert, diese Formel nach h aufzulösen.

Die unten folgenden Höhen der Kugelkalotten bzw. -schnitte wurden durch Tabellenkalkulation (EXCEL) und Annäherung ermittelt:

Stickstoff-, Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidgehalt im „Raumschiff Erde“

Hinweis: Edelgase (Argon) und Wasserdampf wurden vom Gesamtvolumen abgezogen.



Grafik: Ingo Mennerich

	Volumen	Höhe im Ball
Stickstoff (N ₂)	3,272 m ³	1,39 m
Sauerstoff (O ₂)	0,876 m ³	0,50 m
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	0,0017 m ³	0,11 m

Ein- und ausgeatmete Luft:

Für die Atmung sind nur die Gase O₂ und CO₂ relevant. Ihr Anteil an der gesamten ein- und ausgeatmeten Luft beträgt

	O ₂	CO ₂
Eingeatmete Luft	21%	0,1 %
Ausgeatmete Luft	16 %	5 %

Das Atemzugsvolumen bei normaler Atmung liegt bei etwa 0,5 Litern

	O ₂	CO ₂
Eingeatmete Luft	21 % (0,105 l)	0,1 % (0,0005 l)
Ausgeatmete Luft	16 % (0,08 l)	5 % (0,025 l)

Das heißt:

Bei jedem Atemzug entnehmen wir unserer Umgebung 0,105 - 0,08 = 0,025 Liter Sauerstoff und fügen ihr 0,025 - 0,0005 = 0,0245 Liter Kohlenstoffdioxid hinzu.

Das Gesamt O₂-Volumen von 0,826 m³ oder 826 Liter würde - rein theoretisch - für 33040 Atemzüge reichen. Beim Ausatmen würde - ebenfalls rein theoretisch - 0,809 m³ CO₂ abgegeben.

Bei einem durchschnittlichen Atemzugvolumen (AZV) von 0,5 l und einer Atemfrequenz (AF) von 12 Atemzügen pro Minute errechnet sich ein Atemminutenvolumen (AMV) von 6 Litern pro Person.

	O ₂	CO ₂
Eingeatmete Luft	21 % (1,26 l)	0,1 % (0,006 l)
Ausgeatmete Luft	16 % (0,96 l)	5 % (0,3 l)

Pro Minute "verbrauchen" wir 0,3 Liter O₂ und geben 0,294 Liter CO₂ ab.

Die im Water-Walking-Ball enthaltenen 826 Liter Sauerstoff würden - wenn der "Raumfahrer" den Ball wie eine "Taucherflasche" nutzen würde - für 2753 Minuten reichen, das sind fast 2 Tage.

Das Nettovolumen des "Raumschiffes"

Das Volumen des "Raumschiffes" wird um das Volumen der "Raumfahrer" vermindert:

Die Dichte (ρ) des menschlichen Körper beträgt etwa : 1062 kg/m³ = 1.062 g/cm³

Und das Volumen eines erwachsenen 75 kg schweren Menschen

$$V = \frac{m}{\rho} \text{ ungefähr } 0,070 \text{ m}^3.$$

Bei Besetzung mit einer oder mehreren Personen bleibt ein Restvolumen von

"Raumfahrer"	1	2	3	4	5	6	7	8
Volumen m ³	4,119	4049	3979	3909	3839	3769	3699	3629

EXCEL-Programm: O₂- und CO₂-Konzentration im "Raumschiff"

Das Programm benötigt als Eingabe (gelbe Felder):

- Volumen des "Raumschiffes" (Rechenergebnis Formel eingeben)
- Konzentration N₂, O₂, CO₂ (Messwerte eingeben)
- Atemzugvolumen in Liter (Messwert Spirometer)
- Atemfrequenz (Messwert Minute / Atemzüge)
- Konzentration O₂ und CO₂ der ausgeatmeten Luft (Messwerte eingeben)
- Anzahl der "Raumfahrer" im "Raumschiff"
- Dauer des Aufenthaltes in Minuten

Das Programm berechnet:

- Volumen der Gase N₂, O₂, CO₂ im "Raumschiff" in Liter
- Seitenlänge der sich rechnerisch ergebenden N₂, O₂, CO₂ - Würfel
- Atemminutenvolumen in Liter (Produkt Atemzugvolumen x Atemfrequenz)
- Volumen des eingeatmeten O₂ und CO₂ pro Minute
- Volumen des ausgeatmeten O₂ und CO₂ pro Minute
- Abnahme des im Raumschiff vorhandenen O₂ in Litern pro Minute
- Zunahme des im Raumschiff vorhandenen CO₂ in Litern pro Minute
- O₂-Gehalt (l) bzw. Konzentration (% , ppm) nach X Minuten
- CO₂-Gehalt (l) bzw. Konzentration (% , ppm) nach X Minuten

Das Programm ist auf www.schulbiologiezentrum.info abrufbar

Die Langversion zeigt bei sonst ähnlichem Aufbau tabellarisch die O₂- und CO₂ Entwicklung über einen längeren Zeitraum.

Gas	Prozent	ppm	Volumen	Würfel (Seitenlänge in Meter)
Stickstoff (N ₂)	78 %	780000	3212,82 Liter	1,48
Sauerstoff (O ₂)	21 %	210000	864,99 Liter	0,95
Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	0,1 %	1000	4,19 Liter	0,16

Parameter	Value
Atemzugvolumen	0,5 Liter
Atemfrequenz	12 /min
Atemminutenvolumen	6 Liter

Einatmung	Gas	Prozent	Volumen
Einatmung	O ₂	21 %	1,26 Liter
	CO ₂	0,1 %	0,006 Liter
Ausatmung	O ₂	16 %	0,96 Liter
	CO ₂	5 %	0,3 Liter

Parameter	Value
Abnahme O ₂ /min	0,3 Liter
Zunahme CO ₂ /min	0,294 Liter

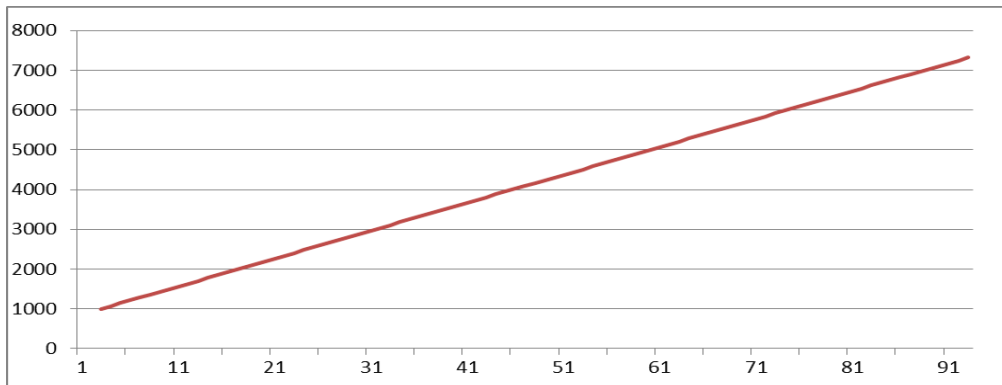
Parameter	Value
"Sphäre" ist mit	1 Person(en) besetzt
O ₂ - und CO ₂ -Gehalt nach	10 Minuten:

Gas	Volumen	Prozent	ppm
O ₂ -Gehalt	861,99 Liter	20,93 %	209272 ppm
CO ₂ -Gehalt	7,1 Liter	0,17 %	1714 ppm

Screenshot: Ingo Menerich

Anstieg der CO₂-Konzentration mit einem "Raumfahrer"

Grundlage: Eigene Berechnung EXCEL, Bedingung AZV 0,5 l, AF 12/min, AMV 6 l



Minuten:	CO ₂ -Konzentration (Liter)	Konzentration %	Konzentration ppm	Minuten:	CO ₂ -Konzentration (Liter)	Konzentration %	Minuten:	CO ₂ -Konzentration (Liter)	Konzentration %	Konzentration ppm	
0	4,12	0,10	1000								
1	4,41	0,11	1071	31	13,23	0,32	3213	61	22,05	0,54	5354
2	4,71	0,11	1143	32	13,53	0,33	3284	62	22,35	0,54	5425
3	5,00	0,12	1214	33	13,82	0,34	3355	63	22,64	0,55	5497
4	5,30	0,13	1286	34	14,12	0,34	3427	64	22,94	0,56	5568
5	5,59	0,14	1357	35	14,41	0,35	3498	65	23,23	0,56	5639
6	5,88	0,14	1428	36	14,70	0,36	3570	66	23,52	0,57	5711
7	6,18	0,15	1500	37	15,00	0,36	3641	67	23,82	0,58	5782
8	6,47	0,16	1571	38	15,29	0,37	3712	68	24,11	0,59	5854
9	6,77	0,16	1642	39	15,59	0,38	3784	69	24,41	0,59	5925
10	7,06	0,17	1714	40	15,88	0,39	3855	70	24,70	0,60	5996
11	7,35	0,18	1785	41	16,17	0,39	3926	71	24,99	0,61	6068
12	7,65	0,19	1857	42	16,47	0,40	3998	72	25,29	0,61	6139
13	7,94	0,19	1928	43	16,76	0,41	4069	73	25,58	0,62	6210
14	8,24	0,20	1999	44	17,06	0,41	4141	74	25,88	0,63	6282
15	8,53	0,21	2071	45	17,35	0,42	4212	75	26,17	0,64	6353
16	8,82	0,21	2142	46	17,64	0,43	4283	76	26,46	0,64	6425
17	9,12	0,22	2213	47	17,94	0,44	4355	77	26,76	0,65	6496
18	9,41	0,23	2285	48	18,23	0,44	4426	78	27,05	0,66	6567
19	9,71	0,24	2356	49	18,53	0,45	4497	79	27,35	0,66	6639
20	10,00	0,24	2428	50	18,82	0,46	4569	80	27,64	0,67	6710
21	10,29	0,25	2499	51	19,11	0,46	4640	81	27,93	0,68	6782
22	10,59	0,26	2570	52	19,41	0,47	4712	82	28,23	0,69	6853
23	10,88	0,26	2642	53	19,70	0,48	4783	83	28,52	0,69	6924
24	11,18	0,27	2713	54	20,00	0,49	4854	84	28,82	0,70	6996
25	11,47	0,28	2784	55	20,29	0,49	4926	85	29,11	0,71	7067
26	11,76	0,29	2856	56	20,58	0,50	4997	86	29,40	0,71	7138
27	12,06	0,29	2927	57	20,88	0,51	5068	87	29,70	0,72	7210
28	12,35	0,30	2999	58	21,17	0,51	5140	88	29,99	0,73	7281
29	12,65	0,31	3070	59	21,47	0,52	5211	89	30,29	0,74	7353
30	12,94	0,31	3141	60	21,76	0,53	5283	90	30,58	0,74	7424

EXCEL-Tabellen: Ingo Mennerich

CO₂- und O₂-Gehalt mit einem oder mehreren "Raumfahrern" (1 Person 70 Liter)

Anzahl "Raumfahrer"	1	2	3	4	5	6	7	8
Volumen Liter	4119	4049	3979	3909	3839	3769	3699	3629
O ₂ -Gehalt %	20,93	20,85	20,77	20,69	20,61	20,52	20,43	20,34
O ₂ -Gehalt ppm	209272	208518	207738	206930	206093	205224	204323	203387
CO ₂ -Gehalt %	0,17	0,25	0,32	0,40	0,48	0,57	0,66	0,75
CO ₂ -Gehalt ppm	1714	2452	3217	4008	4829	5680	6564	7481

Grundlage: Eigene Berechnung EXCEL, Bedingung AZV 0,5 l, AF 12/min, AMV 6 l

Grenzwerte CO₂ und O₂

Auswirkung und Gefährdung abnehmender Sauerstoffkonzentration

O ₂ -Anteil in der Atemluft	Gefährdung und Auswirkung
21 - 18 Vol.-%	Betroffene können keine erkennenden Symptome feststellen.
18 - 11 Vol.-%	Ohne dass der Betroffene es merkt, sind körperliche und geistige Leistungsfähigkeiten beeinträchtigt.
11 - 8 Vol.-%	Mögliche Ohnmacht innerhalb weniger Minuten ohne Vorwarnung. Unter 11% tödliches Risiko.
8 - 6 Vol.-%	Ohnmacht nach kurzer Zeit. Bei sofortiger Durchführung ist Wiederbelebung möglich.
6 - 0 Vol.-%	Unmittelbare Ohnmacht. Hirnschäden, auch bei Rettung.

Quelle: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV,
<http://www.gefaehrungsbeurteilung.de/de/gefaehrungsfaktoren/arbeitsumgebungsbedingungen/ertrinken/grenzwerte>

Hinweis:

Der in geschlossenen Räumen nimmt der CO₂-Gehalt im gleichen Maße zu wie die O₂-Konzentration sinkt. Sinkt der Sauerstoffgehalt auf von 20,9% auf 16% ist der CO₂-Spiegel auf etwa 5% angestiegen!

Auswirkung und Gefährdung zunehmender CO₂-Konzentration

CO ₂ -Anteil in der Atemluft	Gefährdung und Auswirkung
ca. 0,5 - 1 Vol.-%	Bei nur kurzzeitiger Einatmung generell noch keine besonderen Beeinträchtigungen der Körperfunktionen.
ca. 2 - 3 Vol.-%	Zunehmende Reizung des Atemzentrums mit Aktivierung der Atmung und Erhöhung der Pulsfrequenz.
ca. 4 – 7 Vol.-%	Verstärkung der vorgenannten Beschwerden; zusätzlich Durchblutungsprobleme im Gehirn, Aufkommen von Schwindelgefühl, Brechreiz und Ohrensausen.
Ca. 8 – 10 Vol.-%	Verstärkung der vorgenannten Beschwerden bis zu Krämpfen und Bewusstlosigkeit mit kurzfristig folgendem Tod.
> 10 Vol.-%	Tod tritt kurzfristig ein

Quelle: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung DGUV,
<http://www.gefaehrungsbeurteilung.de/de/gefaehrungsfaktoren/arbeitsumgebungsbedingungen/ertrinken/grenzwerte>

Monitoring im "Raumschiff": Unsere Messgeräte

Alle hier vorgestellten Messgeräte sind im Schulbiologiezentrum Hannover ausleihbar.

Sauerstoff-Messgerät:



Fotos Messgeräte: Ingo Mennerich

Unsere Messgeräte GOX100T messen die O₂-Konzentration in der Luft von 0 bis 100%. Ein externer, mit einem Stecker verbundener Sensor lässt sich z.B. in einem Terrarium oder in einem Klassenraum aufhängen.

Das Messprinzip:

Der galvanische Sensor ist eine Art Brennstoffzelle: Er enthält Kaliumhydroxid, das wenn es mit Sauerstoff zusammentrifft zu einem zwischen einer Blei-Anode und einer vergoldeten Kathode über einen Lastwiderstand fließenden elektrischen Strom führt. Am Lastwiderstand fällt eine Spannung ab.

Ein zusätzlich aufsteckbares T-Stück ermöglicht Schläuche anzuschließen und den Sauerstoffgehalt der durchfließenden Luft zu erfassen.

So kann z.B. über ein austauschbares Mundstück in eine, auf der anderen Seite befestigten Tüte hinein ausgeatmet werden um den O₂-Gehalt der ausgeatmeten Luft zu bestimmen.

Die Anzeige erfolgt in Prozent O₂.

Sensorbedingt muss das Gerät vor jedem Gebrauch auf den Normalwert von 20,95% kalibriert werden. Dazu ist die CAL-Taste drei Sekunden gedrückt zu halten, dann erscheint die Anzeige 100P und danach die aktuelle O₂-Konzentration. Sollte der Sensor verbraucht sein erscheint eine Fehlermeldung.

Der Sensor hat eine begrenzte Lebensdauer, da sich der Sauerstoff mit dem Blei der Anode verbindet. Die Lebensdauer lässt sich deutlich verlängern, wenn der Sensor in sauerstoffarmer Umgebung gelagert wird, z.B. in einer Tüte oder wenn die Öffnung nach der Messung durch einen Stopfen verschlossen wird.

Kohlenstoffdioxid-Messgerät:



Das Multifunktions-Messgerät TESTO 435 kann mit Hilfe eines externen Sensors den CO₂-Gehalt der Luft erfassen.

Die CO₂-Konzentration wird in Parts per Million (ppm) angegeben.

Der heute typische Wert von 0,04% CO₂ entspricht 400 ppm. In Städten erreicht dieser Wert gerne 600 bis 800 ppm (0,06 - 0,08 %), In geschlossenen Räumen 1000 ppm (0,1%) und mehr.

Die CO₂-Konzentration der ausgeatmeten Luft (etwa 5% oder 50000 ppm).

Leider endet der CO₂-Messbereich des Geräts bei 10000 ppm.

Damit ist die CO₂-Erfassung der ausgeatmeten Luft nicht direkt - sondern indirekt nur über den O₂-Gehalt - möglich:

Beträgt die O₂-Konzentration der eingeatmeten Luft 21% und die der ausgeatmeten Luft 16% ist die enthält die Ausatemluft 5 + 0,04% CO₂. Der zugleich eingeatmete Stickstoff wird praktisch zu 100% wieder ausgeatmet.

Weitere Messmöglichkeiten des Gerätes: Temperatur, Relative Feuchte, Luftdruck.

Atemvolumen mit dem Spirometer messen



Mit Spirometern wird das Atemvolumen in ccm³ gemessen. Über ein austauschbares Mundstück wird Atemluft ins Gerät geblasen.

Ein Zeiger und eine Skala zeigen das Volumen an.

Durch einfache Multiplikation des Atemzugvolumens (AV) mit der Atemfrequenz (AF) erhält man das Atemminutenvolumen (AMV).

Thermometer und Hygrometer



Das Hygrometer misst die **relative Feuchte** (rF) in Prozent.

Die relative Feuchte ist der Quotient aus dem absoluten und dem maximal möglichen Wasserdampfgehalt der Luft. Das maximale Aufnahmevermögen ist abhängig von der Lufttemperatur.

Kalte Luft kann weniger Wasserdampf speichern als warme Luft.

Erreicht die relative Feuchte 100% ist das

Aufnahmevermögen erschöpft und die überschüssige Feuchtigkeit kondensiert als Flüssigkeit (Nebel, Beschlag, Niederschlag).

Luftdruck mit dem Barometer messen



Das Barometer misst den Luftdruck in Hektopascal (hPa) bzw. in Millibar (mb). Beide Werte sind identisch.

Die Angabe in Millimetern oder Torr bezieht sich auf die Höhe der vom Luftdruck gehaltenen Quecksilbersäule.

1013,25 hPa ist gleich 760 mm oder Torr.

Ein Pascal ist der Druck, den eine Kraft von einem Newton auf eine Fläche von einem Quadratmeter ausübt. Ein Newton ist ungefähr die Gewichtskraft die (auf der Erdoberfläche) eine Masse von 100 g ausübt. Demnach entspricht 1000hPa (oder 100000Pa) einer "Last" von 10 Tonnen/m².

Pflanzen ersetzen verbrauchten Sauerstoff

Auf der IdeenExpo boten wir kleine Starter-Sets für "Raumfahrer" an:

Selbst hergestellte Stecklinge zweier schnell sich bewurzelnder und wachsender Pflanzen, *Calisia repens* und *Pilea depressa*, in einem kleinen Topf in unsere "hauseigene" Erde gepflanzt werden, mit etwas Wasser versehen anfangs in einer Plastiktüte vor Austrocknung geschützt üppig wuchern.

Später kann man sie mit dem Topf in ein großes verschlossenes Marmeladen- oder Gurkenglas setzen. Wir haben schon viele solcher "Regenwälder" oder "Biosphären" hergestellt. Unsere erste, im März 1995 angesetzt, ist mit 18 Jahren schon "volljährig".

Natürlich kann man die Pflanze auch einfach auf das Fensterbrett stellen. Durch Abschneiden von Trieben kann man neue Stecklinge und viele weitere Topfpflanzen herstellen...

Wie viele Pflanzen bräuchte man um sich im "Raumschiff" mit Sauerstoff zu versorgen?

Zehn, Hundert, Tausend?

Wie viel Sauerstoff erzeugt eine Pflanze eigentlich?



Foto: Ingo Mennerich

Unsere Sauerstoffmessgeräte zeigen Werte zwischen 0 und 100% O₂ an.

Wird eine Pflanze unter eine Glasglocke gestellt und belichtet steigt die Sauerstoffkonzentration nach einiger Zeit vom üblichen Basiswert 20,9% um 1 - 2 % an.

Die Glasglocke hat ein Volumen von 5 Litern. Das Volumen der Pflanze einschließlich Topf muss davon abgezogen werden:

Der Topf ist ein Kegelabschnitt mit dem Volumen

$$V = \frac{h \cdot \pi}{3} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2)$$

h = Höhe, R = Radius Öffnung, r = Radius Boden.

Das Volumen eines Topfes mit 8 cm Öffnung, 6 cm Höhe und 6 cm Boden beträgt 716 cm³ oder 0,716 l.

Das Volumen der Pflanze lässt sich durch Eintauchen (Wasserverdrängung) messen.

Im Experiment (siehe Abbildung) stieg die O₂-Konzentration innerhalb einer Stunde um 1 %.

Bei einem Restvolumen von 4 Litern und 20,9% Sauerstoffgehalt ist das O₂-Volumen 0,836 l, bei 21,9% 0,876 l O₂. Der Zugewinn von 1% O₂ (siehe Abbildung) beträgt 0,04 Liter.

Zum Vergleich: Pro Minute verbraucht der Mensch etwa 0,3 Liter Sauerstoff, d.h. in einer Stunde 18 Liter. Um ihn zu ersetzen bräuchte man (bei Licht) etwa 450 Pflanzen.

Sauerstoffbildung durch die Wasserpest Elodea



Foto: Ingo Mennerich

Die Sauerstoffproduktion durch Photosynthese wird noch deutlicher bei der in Teichen lebenden Wasserpest Elodea. Geeignetes Licht mit hohem Blauanteil und ein ausreichendes CO₂-Angebot vorausgesetzt steigen viele Bläschen mit O₂ auf. Statt Sonnenlicht kann man auch das Licht eines Tageslichtprojektors nutzen.

Zu berücksichtigen ist, dass Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur, Sauerstoff in gelöster, unsichtbarer Form aufnehmen kann. Erst wenn das Wasser O₂-gesättigt ist entstehen Bläschen.

Der O₂-Nachweis erfolgt entweder durch die Glimmspanprobe oder durch Ausschalten der Beleuchtung. Die Bläschenbildung muss dann aussetzen um bei Wiedereinschalten erneut zu beginnen.

Der aufsteigende Sauerstoff sammelt sich in einer mit einer Skala versehenen Bürette.

Im Experiment auf einem Tageslichtprojektor entstanden pro Stunde etwa 0,1 Liter O₂.

Neben der spektralen Zusammensetzung des Lichts hat der pH-Wert und die Temperatur des Wassers des Wassers großen Einfluss auf die Sauerstoffproduktion:

Frisches Teichwasser mit pH 7,5 liefert deutlich bessere Ergebnisse als (hannoversches)

Leitungswasser mit pH 8,2. Wassertemperaturen um 15°C führen zu erheblich höheren O₂-Raten als die Wassertemperaturen, die sich nach einiger Zeit auf einem OH-Projektor einstellen.

Wie viel Sauerstoff können Pflanzen erzeugen?

In Ermangelung eigener Messmöglichkeiten und angesichts der Vielfalt weit auseinanderklaffender Zahlen folgt hier eine kleine unkommentierte Auswahl von Quellen zu diesem Thema:

<http://chemistry.about.com/od/environmentalchemistry/f/oxygen-produced-by-trees.htm>

- ▶ "A single mature tree can absorb carbon dioxide at a rate of 48 lbs./year and release enough oxygen back into the atmosphere to support 2 human beings."
- *McAliney, Mike. Arguments for Land Conservation: Documentation and Information Sources for Land Resources Protection, Trust for Public Land, Sacramento, CA, December, 1993*
- ▶ "One acre of trees annually consumes the amount of carbon dioxide equivalent to that produced by driving an average car for 26,000 miles. That same acre of trees also produces enough oxygen for 18 people to breathe for a year."
- *New York Times*
- ▶ "A 100-ft tree, 18" diameter at its base, produces 6,000 pounds of oxygen."
- *Northwest Territories Forest Management*
- ▶ "On average, one tree produces nearly 260 pounds of oxygen each year. Two mature trees can provide enough oxygen for a family of four."
- *Environment Canada, Canada's national environmental agency*
- ▶ "Mean net annual oxygen production (after accounting for decomposition) per hectare of trees (100% tree canopy) offsets oxygen consumption of 19 people per year (eight people per acre of tree cover), but ranges from nine people per hectare of canopy cover (four people/ac cover) in Minneapolis, Minnesota, to 28 people/ha cover (12 people/ac cover) in Calgary, Alberta."
- *U.S. Forest Service and International Society of Arboriculture joint publication*

<http://www.gartendatenbank.de/forum/wieviel-sauerstoff-produziert-ein-baum-fuer-wieviele-menschen-t-243-1>

- ▶ Allgemein produziert ein alter, gesunder **Baum** (Laubbaum einschließlich **Kastanienbaum**) wohl 10-15 kg Sauerstoff täglich. Bei diesem Wert handelt es sich um die durchschnittliche Sauerstoff-Produktion im gesamten Jahr, also einschließlich der Zeit, in der die Laubbäume ohne Blätter dastehen.

Ein Mensch verbraucht etwa 0,5-2 kg Sauerstoff pro Tag. Ebenfalls ein grob geschätzter Mittelwert, denn das hängt von seinem Zustand, seiner Aktivität und etlichen weiteren Variablen ab.

Also kann ein ausgewachsener Baum ungefähr 10(-20) Menschen am Tag mit Sauerstoff versorgen.

http://sciencefocus.com/qa/how-many-trees-are-needed-provide-enough-oxygen-one-person

- ▶ A mature sycamore tree might be around 12m tall and weigh two tonnes, including the roots and leaves. If it grows by five per cent each year, it will produce around 100kg of wood, of which 38kg will be carbon. Allowing for the relative molecular weights of oxygen and carbon, this equates to 100kg of oxygen per tree per year.
- ▶ A human breathes about 9.5 tonnes of air in a year, but oxygen only makes up about 23 percent of that air, by mass, and we only extract a little over a third of the oxygen from each breath. That works out to a total of about 740kg of oxygen per year. Which is, very roughly, seven or eight trees' worth.

Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Baum>

- ▶ Ein europäischer Laubbaum trägt durchschnittlich 30.000 Blätter, die zusammen eine enorme Transpirationsleistung ergeben. An warmen Sommertagen kann der Baum mehrere hundert Liter Wasser verdunsten. Beispiel einer 80-jährigen, allein stehenden Rotbuche: In diesem Lebensalter ist der Baum 25 m hoch, und seine Baumkrone mit einem Durchmesser von 15 m bedeckt eine Standfläche von 160 m². In ihren 2.700 m³ Rauminhalt finden sich 800.000 Blätter mit einer gesamten Blattoberfläche von 1600 m², deren Zellwände zusammen 160.000 m² Fläche betragen. Pro Stunde verbraucht diese Buche 2,352 kg Kohlenstoffdioxid, 0,96 kg Wasser und 25.435 Kilojoule Energie (das ist die in Form von Traubenzucker gespeicherte Energie, die eingestrahlte Sonnenenergie ist ca. siebenmal größer); im gleichen Zeitraum stellt sie 1,6 kg Traubenzucker her und deckt mit 1,712 kg Sauerstoff den Verbrauch von zehn Menschen. Die 15 m³ Holz des Baumes wiegen trocken 12.000 kg, allein 6000 kg davon sind Kohlenstoff.“

Sauerstoffproduktion durch „solare“ Elektrolyse

Bei der Elektrolyse von Wasser werden - summarisch betrachtet - 2 Moleküle Wasser in zwei Moleküle Wasserstoff und ein Molekül Sauerstoff gespalten: $2 \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \rightarrow 2 \text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g})$

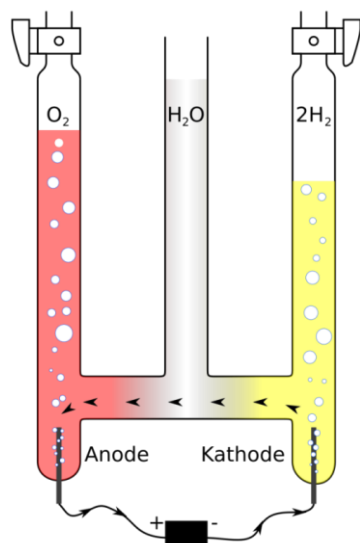


Abb.: Wikipedia, Hofmann voltameter.svg

Zur Demonstration dient ein Hofmann'scher Wasserzersetzungsapparat.

Um das destillierte Wasser leitfähig zu machen werden geringe Mengen eines Elektrolyts hinzugesetzt, z.B. einige Tropfen Schwefelsäure (H₂SO₄).

Zur Elektrolyse wird Gleichstrom, z.B. von Solarmodulen verwendet.

Die Elektroden bestehen aus korrosionsbeständigem Metall, z.B. Platin.

Über der Anode (positiv, +) steigt Sauerstoff auf, über der Kathode (negativ, -) Wasserstoff.

Das Verhältnis H₂ : O₂ ist etwa 2:1, gestört allerdings durch mögliche Undichtigkeiten (H₂ ist sehr flüchtig!) und die relativ hohe Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser.

Stöchiometrisch betrachtet werden 2 Mol H_2O , also $2 \times 16 = 32$ g Wasser in 2 Mol H_2 ($2 \times 1 \text{ g} = 2 \text{ g}$) und ein Mol O_2 ($2 \times 16 = 32 \text{ g}$) verwandelt.

- 32 g Wasser entspricht einem Volumen von 32 ml
- 1 Mol eines Gases entspricht einem Volumen von 24 Litern

Aus 32 ml Wasser werden durch Elektrolyse 48 Liter Wasserstoff und 24 Liter Sauerstoff.

24 Liter O_2 würden bei einem Verbrauch von 0,3 Litern pro Minute (s.o.) etwa 80 Minuten reichen.

Die Reaktionsenthalpie ΔH_0 ist +571,8 kJ. Daraus lässt sich der elektrische Mindestenergieeinsatz ableiten:

Wenn $1 \text{ J} = 1 \text{ VAs}$ entspricht sind $571800 \text{ J} = 571800 \text{ VAs}$.

Bei einer Spannung von 24 Volt (etwa 2 Solarmodule in Reihe geschaltet) und einem durch den Widerstand des leitfähig gemachten Wassers bestimmten Stromfluss von z.B. 1 Ampere wären bei 100% Wirkungsgrad $571800 \text{ J} / (24 \text{ V} \times 1 \text{ A}) = 23825 \text{ s}$ oder etwa 6,6 Stunden notwendig um 2 Mol Wasser (32 ml) in 1 Mol Sauerstoff (24 Liter) zu verwandeln. In 6,6 Stunden hat ein Mensch - und nur den Grundumsatz gerechnet - aber schon fast 120 Liter Sauerstoff verbraucht.

Leider ist der Wirkungsgrad unseres "Sauerstoffgeräts" erheblich niedriger als 100%!

Grundsätzlich gilt aber zunächst die Annahme: Je höher die Spannung, desto größer die O_2 -Ausbeute.

In wie weit einer die Spannung erhöhenden Reihenschaltung oder eine, den Stromfluss erhöhende Parallelschaltung (oder einer Kombination beider) der Vorzug gegeben werden soll kann dem Experiment überlassen bleiben.



Foto: Ingo Mennerich

Mit zwei 10-Watt-Solarmodulen, einem Elektrolyse-Gerät ("Hofmann'scher Wasserzersetzungsapparat") und einem 500-Watt Baustellenstrahler lag der Ertrag nach einer Stunde bei etwa 5 ml O_2 . Im Sonnenlicht entstanden 10 ml O_2/h . Also nur Bruchteile des oben genannten Wertes. Sonnenlicht stünde im "Raumschiff" zwar zur Verfügung, mit größerem Abstand zur Sonne aber entsprechend weniger: Die auf eine Fläche treffende solare Leistung sinkt mit dem Quadrat der Entfernung zur Sonne oder einer Leuchte (Abstands- oder Entfernungs-Quadrat-Gesetz $1/r^2$).

Wie man CO_2 "entsorgen" kann

Das bei etwa 4 m^3 große Luftvolumen des Water-Walking-Balls, der damit immer noch recht hohe absolute Sauerstoffgehalt und die auch nach längerer "Raumfahrt" nur langsam sinkenden O_2 -Messwerte zeigen, dass dem "Raumfahrer" entgegen üblicher Meinung nicht so schnell die Luft ausgeht.

Erst bei einem Absinken auf 18% bis 11% kommt es zu (prinzipiell noch ungefährlichen) meist vom "Raumfahrer" unbemerkten Leistungseinbußen. Erst ab 11% besteht ein tödliches Risiko.

Die 876 Liter Sauerstoff im Ball könnten auf 461 Liter zurückgehen bis die Grenze von 11% erreicht wäre. Die Differenz von 415 Litern würden für einen "Raumfahrer" bei einem (dann sehr unrealistischen) konstantem Atemminutenvolumen von 0,3 l/min rund 23 Stunden reichen. Würden wir, wie die Wasserspinne *Argyroneta aquatica*, die ihren Luftvorrat in Form einer eingesponnenen Luftblase in die Tiefe zieht, den Ball als "Taucherflasche" benutzen, würde der Sauerstoff so lange reichen. Nicht aber, wenn wir uns als "Raumfahrer" im Ball aufhalten! Dann bringt uns der steigende CO₂-Spiegel um, lange bevor der Sauerstoff zur Neige geht.

Naheliegender ist der Gedanke, beim Ausatmen das CO₂ einfach durch einen Schlauch in All zu entsorgen. Genau das geschieht beim Tauchen mit komprimiertem Sauerstoff.

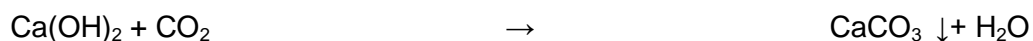
Im "Raumschiff" würde dabei allerdings auch viel Sauerstoff hinausgeblasen. Die ausgeatmete Luft enthält immer noch 16% O₂.

In geschlossenen Systemen ist es notwendig, den in der ausgeatmeten Luft enthaltenen Sauerstoff rückzuführen und das CO₂ abzuscheiden. Das ist im SpaceLAB und in U-Booten nicht anders als in Druckkammern die zur Therapie z.B. von Tinnitus benutzt werden.

Die CO₂-Bindung kann auf chemischem, auch in der Natur üblichem Wege durch den "Einbau" in Kalk geschehen (Kalkstein enthält große Mengen gebundenes CO₂!).

In der Schule wird CO₂ üblicherweise mit "Kalkwasser" nachgewiesen. Bläst man z.B. mit einem Trinkhalm in klares Kalkwasser wird es milchig, ähnlich wie ein Ouzo (oder Raki), dem man Wasser hinzufügt. CO₂ reagiert mit Kalkwasser und Kalk (CaCO₃) fällt aus.

Kalkwasser ist eine gefilterte, klare wässrige Calciumhydroxid-Lösung. Calciumhydroxid - Ca(OH)₂ - löst sich nur schwer in Wasser, deshalb ist es ratsam, dem Wasser nur kleine Mengen des weißen, staubigen Calciumhydroxid-Pulvers hinzuzufügen.



Durch Einleitung von CO₂ entsteht Kalk (CaCO₃) der ausfällt (↓). Kalkwasser ist daher ein gutes Nachweismittel für CO₂ (Trübung).

Die molare Masse ("Molgewicht") von Ca(OH)₂ ist 74,10 g/mol. Ein Mol Ca(OH)₂, d.h. 74,10 g in Wasser gelöstes Calciumhydroxid könnte 1 Mol CO₂ in Form von Kalk (CaCO₃) binden.

1 Mol CO₂ (12 + 2x16 = 44g) hat ein Volumen von 24 Litern. Ca(OH)₂ ist in Wasser nur schwer löslich so dass der Stoff kaum geeignet ist größere Mengen CO₂ zu binden.

In den zwanziger Jahren erfand der US-Amerikaner Ralph M. Waters den heute in Tauchgeräten eingesetzten "Atemkalk", eine Mischung aus Natriumhydroxyd und Calciumhydroxyd. Es wird zur CO₂-Abscheidung in Narkosegeräten und in Tauchgeräten verwandt.



Abb: Wikipedia, Soda Lime

Das in im englischsprachigen Raum als "Soda Lime" bezeichnete, in Tauchsportläden meist als Granulat gehandelte Stoffgemisch enthält:

- Calciumhydroxid, Ca(OH)₂ (etwa 75%)
- Wasser, H₂O (etwa 20%)
- Natriumhydroxid, NaOH (etwa 3%)

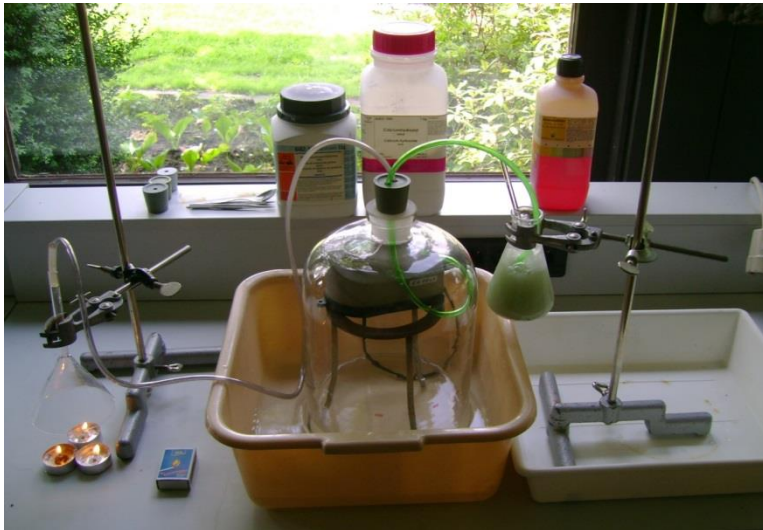
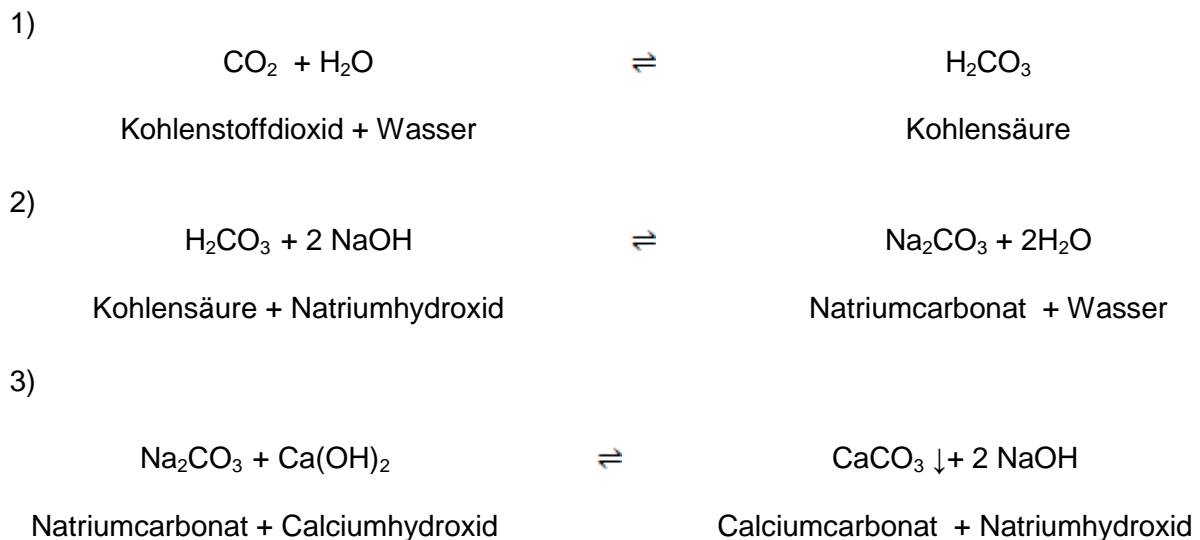


Foto: Ingo Mennerich

Erster Versuchsaufbau im Schulbiologiezentrum:

Ein Glastrichter (links) fängt das CO₂ der drei Teelichte auf. Das "Abgas" wird von einer Aquariumpumpe in einen mit "Atemkalk" (Lauge) gefüllten Erlenmeyerkolben (rechts) gedrückt. Die Aquariumpumpe steht auf einem Dreibein unter einer an der Basis von Wasser umschlossenen Glasglocke. Das isolierte Kabel der Aquariumpumpe wird durch das Wasser geführt. Der Lauge ist ein pH-Indikator hinzugefügt.

Bei der Bindung von CO₂ laufen drei Reaktionsschritte ab:



Die Reaktionen bilden einen Kreisprozess, bei dem NaOH vollständig regeneriert wird und daher nur als Katalysator fungiert.

Das CO₂ wird zunächst in Kohlensäure (H₂CO₃), dann in Natriumcarbonat (Na₂CO₃) gebunden um dann als Calciumcarbonat (CaCO₃) ausgefällt zu werden.

Die Reaktion kommt zum Stillstand, wenn kein Calciumhydroxyd mehr zur Verfügung steht. Mit dem Anstieg der Kohlensäure-Konzentration sinkt der ursprünglich sehr hohe pH-Wert. Durch erneute Zugabe von Ca(OH)₂ kommt die Reaktion wieder in Gang.



Aufbau einer CO₂-"Entsorgungseinrichtung"

Drei brennende Kerzen geben CO₂ ab das durch die Hitze aufsteigt, von einem Glastrichter aufgefangen und durch Unterdruck in der Glasglocke angesogen wird.

Der Sog entsteht durch eine auf einem Dreibein in der Glocke aufgestellte Aquariumpumpe.

Die Glocke steht in einem flachen Wasserbad. Dadurch wird gewährleistet dass trotz des Netzkabels nur die CO₂-angereicherte Luft angesogen wird.

Die Pumpe führt das Abgas der Kerzenflammen in einen mit wässriger Natriumhydroxyd- und Calciumhydroxid-Lösung gefüllten Erlenmeyerkolben. Etwas Universalindikator (pH 4 - 10) gibt Aufschluss über den aktuellen pH-Wert.

Versuchsaufbau auf der IdeenExpo
Fotos: Ingo Mennerich

Zu Beginn der CO₂-Abscheidung ist das Reaktionsgemisch stark alkalisch (pH 10) und wird im Laufe der Zeit immer saurer (bis pH 6).



Frischer "Atemkalk" mit pH 10



Nahezu verbrauchter "Atemkalk" mit pH 6

Die CO₂-Konzentration am Ausgang der Waschflasche ist direkt mit dem CO₂-Messgerät oder indirekt durch O₂-Messung erfassen. Im ersten Fall liegt sie etwa beim in Räumen üblichen Wert (< 1000 ppm CO₂), im zweiten bei 21% O₂.

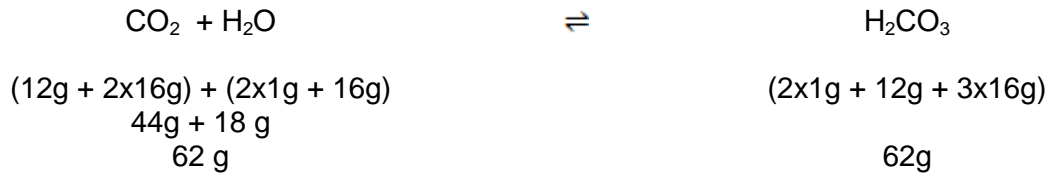
Eine naheliegende Frage wäre, warum nicht alles anthropogen erzeugte, möglicherweise "klimaschädigende" CO₂ auf diese einfache Art gebunden wird.

Wie viel CO₂ kann Atemkalk binden?

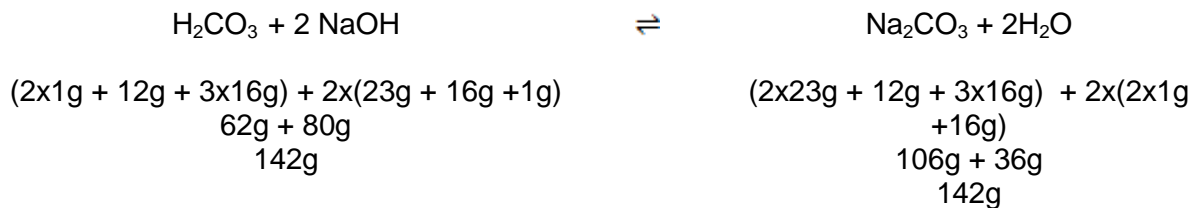
Wie viel CO₂ kann das NaOH/Ca(OH)₂-Gemisch binden?

Stöchiometrische Betrachtung der Reaktionen

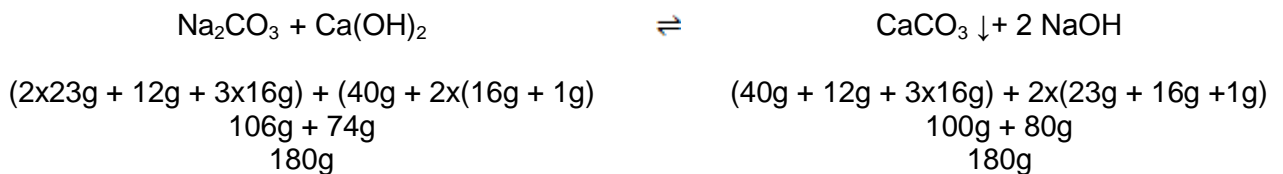
1)



2)



3)



Die summarische Reaktion ist $\text{CO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. NaOH tritt nur als Mittler auf. Daher gelten die oben genannten Werte: 74g Ca(OH)₂ (1 Mol) könnten 44g CO₂ (1 Mol) binden, also 24 Liter.

Da die ausgeatmete Luft nur 5% CO₂ enthält beträgt das Volumen der von 1 Mol Ca(OH)₂ CO₂-frei gemachten Luft das zwanzigfache, also 480 Liter. Unter der Annahme, dass pro Minute 0,3 Liter CO₂ ausgeatmet werden reichen 74 g Ca(OH)₂ für 1600 Minuten oder mehr als 26 Stunden.

Für in Kreislaufatemgeräten („Tauchrettern“) eingesetzten Atemkalk sind bei Wikipedia folgende Werte zu finden:

„Theoretisch können 100 g Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) ca. 30 Normliter CO₂ binden.

Durchschnittlicher Atemkalk besteht aus:

5 % NaOH, 1 % KOH, 0,2 % Silicium/Kieselgur, 14-19 % Wasser und ca. 75 % Ca(OH)₂.

Damit ergibt sich für 1 kg Atemkalk bei 20 °C eine theoretische CO₂-Bindungsfähigkeit von 225 Normlitern CO₂. Die Hersteller geben für 1 kg Atemkalk eine Bindungsfähigkeit von 120 Normlitern an!

Die Wirksamkeit lässt allerdings mit der Temperatur des Atemkalks nach:

100 % bei 21 °C, 80 % bei 15,5 °C, 65 % bei 10 °C und < 50 % bei 1,5 °C.“

Leider fällt die Energiebilanz der Calciumhydroxid-Herstellung sehr ungünstig aus und setzt selbst CO₂ frei, einmal durch die dabei verfeuerten fossilen Energieträger (Kohle, Gas etc.), zum anderen dadurch, dass der Kalk (CaCO₃) auf dem Wege zum Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) ein Molekül CO₂ freisetzt.

Ca(OH)_2 entsteht in zwei Schritten durch Brennen von Kalk (CaCO_3). Der gebrannte Kalk, auch Ätzkalk genannt, ist Calciumoxid (CaO). In einem zweiten Schritt wird der Branntkalk durch Wasserzusatz zu Calciumhydroxid (Ca(OH)_2) "gelöscht" das durch CO_2 -Aufnahme wieder zu Kalk werden kann.

Löschkalk als CO_2 -Absorber macht von der CO_2 -Bilanz also keinen Sinn.

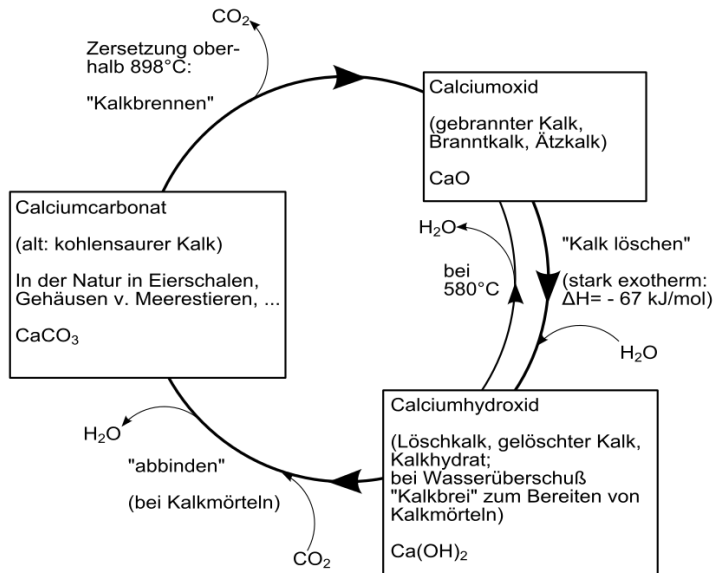


Abb: Wikipedia: Kalkkreislauf.svg

Bei Verwendung eines Kreislaufatemgerätes muss nur der verbrauchte Sauerstoff (0,3 Liter/min) ersetzt werden.

Ressource „Wasser“

Der Mensch verdurstet schneller als er verhungert.
Der tägliche Flüssigkeitsbedarf liegt bei 2 - 3 Litern.

Durchschnittliche Wasserbilanz eines Erwachsenen pro Tag

Wasseraufnahme	ml/Tag	Wasserabgabe	ml/Tag
Getränke	1440	Urin	1440
Wasser in fester Nahrung	875	Stuhl	160
Oxidationswasser	335	Haut	550
		Lunge	500
Wasseraufnahme	2650	Wasserabgabe	2650

Quelle: Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.

Das Volumen eines Water-Walking-Balls böte Platz für 4189 Liter Wasser, ausreichend für fast 6 Jahre. Hier bliebe für den "Raumfahrer" allerdings kein Platz!

Jede über uns hinausgehende Last (weitere Personen, "Gepäck" in Form von Proviant oder Raum für lebenserhaltende Systeme geht zu Lasten des Luftvolumens, schränkt also den Sauerstoffvorrat ein und erhöht den CO₂-Spiegel.

Ein Wasservorrat für ein Jahr, etwa 730 Liter (2 Liter x 365 Tage) entspricht einem Volumen eines Würfels ($\sqrt[3]{0,73}$) von 0,9 m Kantenlänge. Das Restvolumen liegt dann nur noch bei 4,189 - 0,070 - 0,730 = 3,389 m³.

Mehrere "Raumfahrer" würden das Luftvolumen noch erheblich weiter reduzieren:

Beispiel:

$$4,189 - 2 \times 0,070 - 2 \times 0,730 = 2,589 \text{ m}^3$$

$$4,189 - 3 \times 0,070 - 3 \times 0,730 = 1,789 \text{ m}^3$$

$$4,189 - 4 \times 0,070 - 4 \times 0,730 = 0,989 \text{ m}^3$$

$$4,189 - 5 \times 0,070 - 5 \times 0,730 = 0,189 \text{ m}^3.$$

Das aufgenommene Wasser wird wieder ausgeschieden mit der Folge, dass es sich im "Raumschiff" ansammelt, sei es in Form von Urin, Schweiß oder ausgeatmeter feuchter Luft. Alle "Raumfahrer" die sich längere Zeit im Water-Walking-Ball aufgehalten haben berichten, dass die Luft feucht und stickig wird und der Schweiß auf der Haut klebt.

Das Aufnahmevermögen der Luft für Wasserdampf ist begrenzt und richtet sich nach der Temperatur und dem Feuchtigkeitsgehalt. Überschreitet die relative Feuchtigkeit 100% ist der Taupunkt erreicht und die feuchte Luft kondensiert.

Luftfeuchtigkeit im „Raumschiff Erde“

Bereits nach kurzem Aufenthalt steigt die Wärme und Feuchtigkeit im "Raumschiff" merk- und messbar an. Den Umstehenden schlägt beim Aussteigen der "Raumfahrer" eine fast tropische Luft entgegen.

Ein Test mit 6 erwachsenen Personen (japanische Studenten und ihr Professor) führte trotz des 25°C warmen Raumes nach etwa 5 Minuten zum Beschlagen der Gummihaut. Die Luft, bei unkritischen 20,4% O₂ und 2500 ppm CO₂ wurde unerträglich stickig und machte das Atmen schwer. Der Versuch wurde abgebrochen.

Erreicht die relative Feuchte 100% könnte sich Nebel und schließlich "Regen" bilden.

Da die ausgeschiedene Feuchtigkeit im "Raumschiff" bleibt und der Niederschlag aus "destilliertem" Wasser besteht könnte er als "Trinkwasser" aufgefangen werden.



Foto: Ingo Mennerich

Temperatur und maximaler Wasserdampfgehalt der Luft

Temperatur (°C)	Max. Wasserdampfgehalt (g/m ³)	Temperatur (°C)	Max. Wasserdampfgehalt (g/m ³)	Temperatur (°C)	Max. Wasserdampfgehalt (g/m ³)
34	37.58	19	16.33	4	6.37
33	35.66	18	15.40	3	5.96
32	33.82	17	14.50	2	5.57
31	32.07	16	13.65	1	5.20
30	30.40	15	12.95	0	4.85
29	28.80	14	12.09	-1	4.49
28	27.27	13	11.37	-2	4.14
27	25.80	12	10.68	-3	3.82
26	24.40	11	10.03	-4	3.52
25	23.07	10	9.41	-5	3.25
24	21.80	9	8.83	-6	2.99
23	20.60	8	8.28	-7	2.75
22	19.45	7	7.76	-8	2.53
21	18.35	6	7.27	-9	2.33
20	17.31	5	6.80	-10	2.14

Aus Arbeitshilfe "Wetterküche", Schulbiologiezentrum Hannover

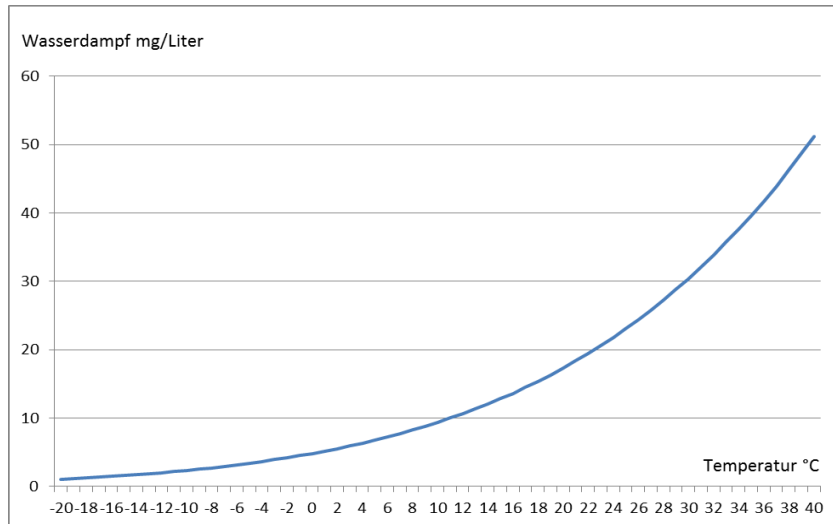
- Bei 16°C kann Luft maximal 13,6 g Wasserdampf pro Kubikmeter aufnehmen.
- Bei 26°C kann Luft maximal 24,4 g Wasserdampf pro Kubikmeter aufnehmen.
- Die absolute Feuchte ist 13,6 g, die relative Feuchte ist $13,6/24,4 \times 100 = 56 \%$.
- Beträgt die relative Feuchtigkeit bei 25°C 50% beträgt die absolute Feuchte $(23,07\text{g}/100) \times 50\% = 11,54 \text{ g Wasserdampf}$. Bei Abkühlung wäre Taupunkt bei etwa -1°C erreicht. Bei konstanter Temperatur könnten die Raumfahrer 11,54 g Wasserdampf hinzufügen bis Niederschlag eintritt.

Der mathematische Zusammenhang zwischen Temperatur (x, °C) und absoluter Feuchte (y, mg/Liter) kann durch folgendes Polynom ausgedrückt werden:

$$y = 4,84755 + 0,33465x + 0,01013x^2 + 1,73335 \cdot 10^{-4}x^3 + 1,7824 \cdot 10^{-6}x^4 + 1,01316 \cdot 10^{-8}x^5 + 1,30095 \cdot 10^{-11}x^6$$

Quelle: Bernhard Sedlacek, Die Befeuchtungsleistung hydrophober Heat and Moisture Exchanger (HME) unter klinischen Bedingungen, Dissertation FU-Berlin, 2006, http://www.diss.fu-berlin.de/diss/receive/FUDISS_thesis_00000002168?lang=en
 Mit Excel lässt sich daraus eine Kurve erstellen:

$$=4,84755+0,33465*A1+0,01013*A1^2+(1,73335*10^{-4})*A1^3+(1,7824*10^{-6})*A1^4+(1,01316*10^{-8})*A1^5+(1,30095*10^{-11})*A1^6$$



EXCEL-Diagramm: Ingo Menerich

Über die Atmung wird (unsichtbar) Wasserdampf abgegeben. An kalten Wintertagen kondensiert er und bildet Wolken um Nase und/oder Mund. Pro Tag verlieren wir (bilanzmäßig) bis zu 0,5 Liter Wasser durch die Atmung. Das dieser Wert nicht höher ist verdanken wir einem komplizierten System der "Wasserrückgewinnung" in der Lunge, den Bronchien und der Nase. Der Wasserdampfgehalt der ausgeatmeten Luft lässt sich mit einer Tüte, einem darin befindlichen Hygrometer und einem Thermometer messen:

Zunächst messen wir die relative Feuchte der Umgebungsluft und rechnen sie unter Einbeziehung der Temperatur in den absoluten Wasserdampfgehalt in mg/L um. Dann atmen wir (ganz normal) in eine Tüte hinein, verschließen sie fest und lassen sie auf die Umgebungstemperatur abkühlen.

Der Differenzbetrag der relativen bzw. errechneten absoluten Feuchte entspricht dem Wasserdampfgehalt in mg/Atemzug.

Beispiel:

Bei einer Raumtemperatur von 20°C wird eine relative Feuchte von 40% gemessen. Bei 20°C ist die Luft bei 17,3 mg/Liter gesättigt. 40% davon sind 6,9 mg. Beim Einatmen wird die Luft angefeuchtet so dass sie in den winzigen Alveolen der Lunge einen Wert von 100% r. F. erreicht. Bei 37°C Körpertemperatur entspricht das 44 mg/l.

Bei Ausatmen fällt die Temperatur der Luft von 37°C in der Lunge auf etwa 32°C in der Nase. Bei 32° ist die Luft bei 33,8 mg/l gesättigt. Der Differenzbetrag 44 mg/l - 33,8 mg/l = 10,2 mg/l verbleibt im Körper.

Der Netto-Wasserverlust beträgt in diesem Fall 33,8 - 6,9 = 26,9 mg/l

Bei einem Atemvolumen von 0,5 l sind das 13,45 mg/Atemzug. Bei einer Atemfrequenz von 12/min verliert der Körper durch Atmung 161,4 mg/min oder etwa 232 g Wasser pro Tag.

Steigt die Temperatur im "Raumschiff" auf 37°C und die relative Feuchte auf 100% (entsprechend einer absoluten Feuchte von 44 mg/l) ist der Wasserverlust durch Atmung gleich Null weil in der Lunge die gleichen Bedingungen herrschen wie im "Raumschiff".

Der Wasserverlust durch Schwitzen und Abgabe über die Hautoberfläche führt zu einer Austrocknung (Dehydration) des Körpers. Diese hat zugleich einen u.U. lebensbedrohenden Elektrolytverlust (Salze!) zur Folge.

Eine (lebenserhaltende) Konsequenz aus dieser Tatsache könnte sein, genug Salze (im richtigen Mischungsverhältnis) mitzuführen oder sich damit abfinden zu müssen, das Salz von der Haut zu lecken...

Ohne starke körperliche Aktivität oder heiße Umgebung verliert ein Mensch etwa 100–200 ml Wasser über die Schweißdrüsen pro Tag (WIKIPEDIA, Schweiß). Dazu kommt ein Wasserverlust von etwa 300 ml durch die Haut so dass wir allein über die äußere Körperoberfläche etwa 0,5 Liter pro Tag verlieren.



Fotos: Ingo Mennerich



Auf der IdeenExpo 2013 testeten vier junge "Raumfahrer" eines Braunschweiger Gymnasiums, auf welche Werte die Temperatur und die Feuchtigkeit bei einem längeren Aufenthalt und erhöhter körperlicher Aktivität in der "Gummisphäre" steigen würden. Als wir den Versuch nach 15 Minuten abbrechen waren 31,5°C erreicht. Die Innenwand des Balls war beschlagen und regte zu spontanen Graffiti an. Hätten wir den Versuch noch längerer ausgedehnt und wäre die Temperaturdifferenz zwischen dem Inneren "Gummisphäre" und der umgebenden Halle größer gewesen wäre das ausgeschiedene Wasser möglicherweise am Boden zusammengelaufen.

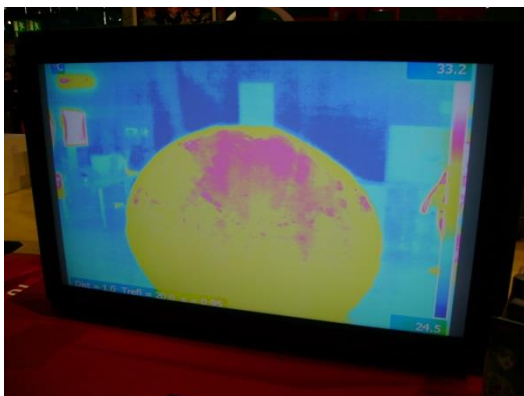


Foto: Ingo Mennerich

Die vom PHAENO dankenswerterweise zur Verfügung gestellte Wärmebildkamera zeigt sogar noch höhere Werte (33,2° im Maximum).

Die beim Öffnen des Reißverschlusses ausströmende Luft war tropisch warmfeucht und die "Raumfahrer", weil die warme Wasserdampf-gesättigte Luft kein Wasser mehr aufnehmen konnte, schweißnass.

Beim Aussteigen fröstelten sie ein wenig...

Wasserrecycling: Urin in Trinkwasser verwandeln?

Normalerweise verliert der Mensch über Harn etwa 1 - 1,5 Liter Flüssigkeit/Tag (Wikipedia, Urin). Dieser bleibt, wie abgeatmetes Wasser, Schweiß und über die Haut verdunstetes Wasser im System "Raumschiff".

Das bedeutet: Jeder Liter Wasser den man trinkt erhöht letztendlich den Wasserspiegel im Raumschiff! Es sei denn, man "entsorgt" das ausgeschiedene Wasser...

Eine Möglichkeit, das ausgeschiedene, aber wenig appetitliche Wasser zurückzugewinnen ist, es zu destillieren. Das verdunstete Wasser (z.B. Schweiß) zurückzugewinnen wäre einfach: Man muss das an der Gummihaut des "Raumschiffes" kondensierte Wasser nur ablecken oder es am Boden zusammenlaufen lassen. Das Ergebnis dieses einfachen "Destillationsprozesses" riecht nicht ist nicht salzig!

Statt echten Urin zu destillieren (was in der Schule wohl zu Disziplinarmaßnahmen führen würde...) nehmen wir farblich ähnliches alkoholfreies Bier (vielleicht mit etwas Cola vermischt) das man, um Schaumbildung zu vermeiden, einige Stunden lang abstehen lassen sollte. Leider riecht das farblose Destillat danach immer noch nach "Bier"...

Zum Erhitzen werden wahlweise Strom (Heizhaube), fossile Brennstoffe (Paraffin-Kerzen) oder - CO₂-frei und keinen Sauerstoff zehrend - durch Parabolspiegel konzentrierte Sonnenenergie genutzt. Um Wasser zu destillieren braucht es allerdings einen großen Spiegel der viel Platz im "Raumschiff" einnimmt.

Destillation von „Urin“ mit Teelichten



Foto: Ingo Mennerich

Teelichte verbrennen Paraffin, also ein Gemisch aus Erdöl raffinierter Kohlenwasserstoffe. Bei ihrer Verbrennung wird Sauerstoff verbraucht CO₂ frei.

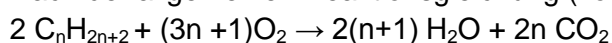
Der O₂-Verbrauch bzw. die CO₂-Freisetzung eines Teelichtes lässt sich in Kenntnis der Reaktionsgleichung stöchiometrisch berechnen:

Man kann das Ergebnis aber auch als gegeben nehmen und nur noch mit der Zahl der zur Produktion der notwendigen Wassermenge eingesetzten Kerzen multiplizieren.

Paraffin ist ein Alkan-Gemisch mit der Summenformel C_nH_{2n+2} mit n zwischen 18 und 32. Die Moleküle enthalten also 18 - 32 Kohlenstoffatome (C). Die molare Masse liegt zwischen 275 und 600 g pro Mol. Bei einem angenommenen Mittelwert n = 25 ergibt sich für C₂₅H₅₂ eine molare Masse M = 352 g/mol.

Ein Teelicht mit (gewogenen) 13 g Paraffin enthält also 0,037 mol.

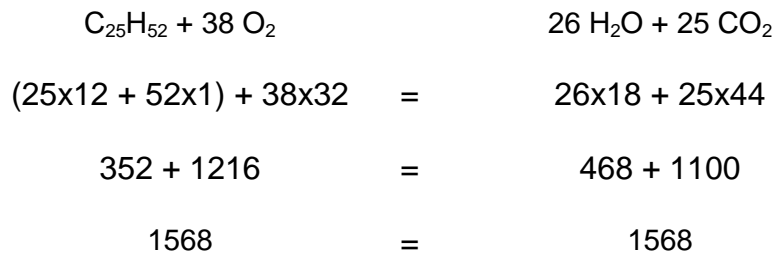
Nach der allgemeinen Reaktionsgleichung (vollständige Verbrennung) für Alkane



kann man für Paraffin formulieren: $2 \text{C}_{25}\text{H}_{52} + 76 \text{O}_2 = 52 \text{H}_2\text{O} + 50 \text{CO}_2$

Oder vereinfacht: $\text{C}_{25}\text{H}_{52} + 38 \text{O}_2 = 26 \text{H}_2\text{O} + 25 \text{CO}_2$

Die Atommasse von Kohlenstoff (C) ist 12, die von Sauerstoff (O) 16 und die von Wasserstoff (H) 1. Durch Einsetzen in die Reaktionsgleichung erhalten wir



Bezogen auf 13 g Paraffin (1 mol Paraffin = 352g) folgt: 1 Teelicht entspricht 0,037 mol.

Aus der Reaktionsgleichung geht hervor, dass bei der Verbrennung von 1 Mol Paraffin 38 mol O₂ verbraucht werden.

Der **Sauerstoffverbrauch** eines Teelichts errechnet sich zu

$$38 \times 32 \text{g} \times 0,037 \text{ mol} = 50 \text{ g Sauerstoff (O}_2\text{)}$$

$$\text{Das entspricht } 50 \text{ g} / 32 \text{ g} = 1,4 \text{ mol}$$

Allgemein gilt:

1 mol eines idealen Gases entspricht einem Volumen von 24 l (20°C, 1013 hPa)

Daraus folgt: Bei der vollständigen Verbrennung eines Teelichts wird

$$24 \text{ l} \times 1,4 \text{ mol} = 33,6 \text{ Liter Sauerstoff verbraucht.}$$

Die **Kohlenstoffdioxidfreisetzung** eines Teelichts ist dann

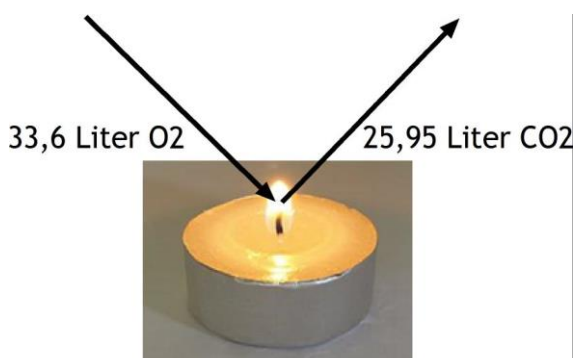
$$25 \times 44 \text{g} \times 0,037 \text{ mol} = 40,7 \text{ g Kohlenstoffdioxid (CO}_2\text{)}$$

$$1 \text{ mol CO}_2 = 44 \text{ g}$$

$$44 \text{g} / 40,7 \text{g} = 1,08 \text{ mol}$$

$$24 \times 1,08 \text{ mol} = 25,95 \text{ Liter CO}_2$$

1 Teelicht



Der Differenzbetrag zwischen O₂ und CO₂ entspricht dem bei der Verbrennung entstehenden Wasser H₂O.

Foto:WIKIPEDIA

Bei einer Brenndauer von maximal 4 Stunden bedeutet das:

Der Sauerstoffverbrauch eines Teelichts ist fast halb so groß wie der des Menschen

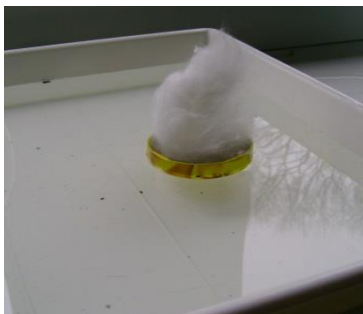
- Teelicht: 33,6 Liter O₂
- Mensch: 72,0 Liter O₂ (0,3 Liter x 4 x 60 min)

Ressource "Wärme"

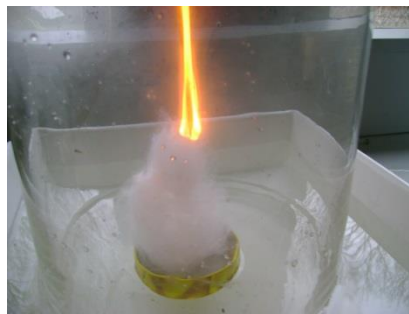
Wärmendes Feuer?

Im Weltall ist es kalt. Ein wärmendes Feuer im "Raumschiff" zu entzünden würde sich aus Sicherheitsgründen verbieten. Die Flammen würden durch Sauerstoffmangel schnell verlöschen und dabei die Besatzung schnell in den Erstickungstod reißen. Es würde das Luftvolumen auch dramatisch reduzieren. Der sinkende Luftdruck würde den Ball kollabieren lassen!

Ein einfacher Versuch zeigt, was bei einem Feuer in einem geschlossenen Raum geschieht: Gebraucht werden eine große mit Wasser gefüllte flache Schale, ein Schraubdeckel, etwas Watte und eine große verschließbare Glasglocke.



"Schiffchen" mit Wattebausch



Wattebausch wird entzündet



Feuer geht aus, Wasser steigt auf,
Nebelbildung
Fotos: Ingo Mennerich

Der Schraubdeckel wird als "Schiffchen" auf die Wasseroberfläche gesetzt und ein Bausch Watte hinzugefügt. Anschließend wird die noch offene Glasglocke darüber gestülpt und die Watte mit einem in die Öffnung gehaltenen brennenden Holzstab entzündet. Kurz nach dem Schließen verlöscht das Feuer. Gleichzeitig steigt das Wasser gegen die Schwerkraft hoch und es bildet sich Nebel ("Wolke").

Eine oft gehörte Interpretation des Versuches ist, dass das Feuer die Luft (oder den Sauerstoff) verbraucht hat. Diese Erklärung lässt außer Acht, dass bei der Verbrennung CO₂ entsteht. Auch die etwas differenziertere Vermutung, dass genau so viel CO₂ entsteht wie Sauerstoff verbraucht wird, das CO₂ aber im Wasser leichter gelöst wird als O₂ greift zu kurz. Entscheidend ist, dass bei der Verbrennung nicht nur CO₂ sondern auch Wasser entsteht ("Kohlenwasserstoffe"). Bei der Verbrennung entsteht zunächst Wasserdampf (unsichtbares, gasförmiges Wasser) der nach dem Verlöschen des Feuers abgekühlt wird und sich in flüssiges Wasser verwandelt. Wasser nimmt aber viel weniger Platz ein als Wasserdampf! 1 Mol flüssiges Wasser (16 g) entspricht 24 Liter Wasserdampf.

Dass ein einziges Teelicht pro Zeiteinheit schon halb so viel Sauerstoff verbraucht bzw. CO₂ abgibt wie ein Mensch ist schon beim Thema "Urinrecycling" erwähnt worden.

Damit entfällt auch die Option mit Feuer Nahrung zuzubereiten!

„Solarkollektoren“ als Alternative?

So lange das "Raumschiff" von der Sonne beschienen wird können schwarze Oberflächen durch Strahlung ("Licht") in Schwingungen gebracht werden ("Wärme"). Schwarze, Sonnenlicht absorbierende Bekleidung wäre weißen, reflektierenden Stoffen vorzuziehen. Schwarze, absorbierende Flächen könnten so aufgestellt werden, dass sie möglichst viel Sonnenlicht auffangen. Auch das Material spielt eine Rolle: Sich schnell erwärmende Stoffe geben die Wärme auch schnell wieder ab. Das kann in einigen Fällen erwünscht sein. Ein leerer schwarzer Metallkanister wird in der Sonne schnell heiß und erwärmt die Umgebung. Soll er aber auch in der Nacht Wärme abgeben, füllt man ihn mit Wasser was sich zwar langsam erwärmt, die Wärme aber auch über einen langen Zeitraum abgibt.

Gibt es einen Treibhauseffekt im „Raumschiff Erde“?

Führt ein steigender Wasserdampf- und CO₂-Gehalt in der "Gummisphäre" zu einem Treibhauseffekt? Ist die Wärmeabgabe des "Raumschiffs" dadurch herabgesetzt?

Der "Klimawandel durch menschengemachten Treibhauseffekt" ist ein hochaktuelles, hochkomplexes und hochkontroverses kontroverses Thema. Einige Grundlagen zum Verständnis können auch im Rahmen unseres "Raumschiff Erde"-Projektes problematisiert und untersucht werden. Dabei zeigt sich, dass die das Mikroklima des "Raumschiffes" bestimmenden Faktoren schon schwer zu deuten. Wie ungleich komplexer muss die Bestimmung der Stellgrößen der irdischen Atmosphäre sein? Wie ungleich schwieriger die Prognose ihrer zukünftigen Entwicklung? Hier nur einige (hoffentlich) weiter führende Ansätze:

Wasser, sowohl in flüssiger als auch in Gasförmiger (Wasserdampf) Phase kann große Wärmemengen aufnehmen. Das hätte im Prinzip eine kühlende Funktion, ähnlich den Ozeanen der Erde die einen großen Teil der Wärme aufnehmen und das Klima dadurch puffern.

Verdunstende Körperflüssigkeiten (Schweiß, Feuchtigkeitsabgabe über die Haut) entziehen der Umgebung Wärmeenergie, haben also eine kühlende Funktion. Das ist aber nur so lange der Fall wie die umgebende Luft Wasserdampf aufnehmen kann.

Steigende Temperaturen im "Raumschiff" führen dazu dass mehr Wasser in Form von gasförmigem Wasserdampf aufgenommen werden kann.

Wasser im flüssigen Zustand hat eine Wärmekapazität von etwa 4,2 J/g,
Die Wärmekapazität von Wasserdampf ist temperaturabhängig, im Bereich "normaler" Lufttemperaturen liegt er um 1,86 J/g

Wärmekapazität von Wasserdampf

Temperatur (K)	kJ/kg	Temperatur (K)	kJ/kg
175	1.850	275	1.859
200	1.851	300	1.864
225	1.852	325	1.871
250	1.855	350	1.880

Quelle: http://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-d_979.html

Wasserdampf und flüssiges Wasser absorbieren Wärmestrahlung. Die an der Innenseite des "Raumschiffs" kondensierten Wassertröpfchen könnten eine ähnliche Wirkung wie Wolken haben die den Rückfluss der tagsüber aufgenommenen und in Wärme verwandelte Sonnenenergie einschränken.

Die Bereitschaft zur Kondensation hängt ab vom absoluten Wasserdampfgehalt der Luft und von der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen. Eine "Raumfahrt" im Winter im Freien könnte mehr Aufschluss geben.

Das Prinzip "Treibhauseffekt" ließe sich im Winter bei Sonnenschein studieren:

Bleibt die Temperatur im Inneren erträglich? Und wenn ja, was ist die Ursache?

- Ist es die dünne Außenhaut des Raumschiffs die möglicherweise Sonnenlicht hinein, aber Wärme nicht herauslässt?
- Ist es die (wie in einem Treibhaus) auf das Innere der Kugel eingeschränkte Konvektion?
- Ist es der Wärmestrahlung absorbierende Wasserdampf bzw. der Wasserfilm auf der (kühleren) Gummihaut?
- Ist es der ansteigende, Wärmestrahlung absorbierende CO₂-Gehalt?

Ressource „Licht“

Ein fliegendes „Raumschiff“ könnte, eine entsprechende Bahn vorausgesetzt, ständig Sonnenlicht empfangen. Gesetzt aber den Fall, das „Raumschiff“ wäre einem Tag-Nacht-Wechsel ausgesetzt (wie z.B. die Besatzung der internationalen Raumstation ISS) müsste man in der Dunkelheit für Licht sorgen.

Kerzen konkurrieren mit den „Raumfahrern“ um den knappen Sauerstoff. Ein Teelicht brennt etwa 4 Stunden lang und verbraucht dabei etwa halb so viel Sauerstoff wie ein Mensch (s.o.). Bis es ganz heruntergebrannt ist hat es rund 26 Liter CO₂ erzeugt.

Ressource „Strom“

Vom „Muskelkraftwerk“ zur solar betriebenen Brennstoffzelle

Heutzutage wird Licht zumeist durch Strom erzeugt. Kann man als „Raumfahrer“ Strom – und wenn wie viel? - wie auf einer „Insel“ selbst erzeugen?

Dazu braucht man z.B. einen mit einer Kurbel versehenen Dynamo. Im Schulbiologiezentrum gibt es ein zum „Muskelkraftwerk“ umgebauten Fitness-Rad. Mit ihm kann man feststellen, wie viel „Power“ man hat, d.h. wie viel Watt (Leistung) man in die Pedalen treten kann. Der „Dynamo“, ein 500 Watt Windgenerator liefert Strom der entweder direkt, z.B. zum Radio hören genutzt werden kann oder für spätere Nutzung in einen Akku fließt.

Unter den isolierten und subsistentiellen Bedingungen ist Nachhaltigkeit oberstes Gebot. Man kann den Speicher (Akku) nicht über Gebühr belasten und muss ihm „tags“ so viel Input zuführen wie er im Laufe der „Nacht“ abgeben sollte. Beim Laden des Akkus darf auch nicht zu viel Strom fließen, sonst wird er schnell zerstört. Auf der anderen Seite dürfen die Verbraucher ihn auch nicht zu schnell entladen. Das heißt: Die Leistung der Solarmodule müssen zur Kapazität des Akkus passen und die Leuchten zum Akku.

Mit Messgeräten (Volt- und Amperemetern) kann man beim Strom erzeugen die Lade- und Verbraucherspannungen bzw. die Lade- und Verbraucherströme kontrollieren.

Auch hier ist ständige Kontrolle angesagt. Beispielsweise sollte der Ladestrom ein Zehntel der Akku-Kapazität nicht überschreiten. Ein Akku mit 7 Amperestunden (Ah) Kapazität sollte also mit 700 mA geladen werden.

Welche Leuchte passt zum Akku? Eine an den 7Ah-Akku angeschlossene 12 V/10W Glühlampe „zieht“ etwa 0,8 Ampere Strom. Eine verkürzte Überschlagsrechnung könnte lauten: Bei vollem Akku könnte die Leuchte rund 9 Stunden lang brennen. Schaut man auf die Messgeräte wird man feststellen müssen, dass die Akkuspannung zurückgeht und die Glühlampe immer schwächer (und rötlicher) leuchtet. Auch wenn der Glühfaden nur noch schwach oder gar nicht mehr leuchtet fließt noch Strom und entlädt den Akku vollständig. Tiefentladungen aber verringern sein Speichervermögen erheblich!

Eine 12V-LED-Leuchte erlischt schon bei Unterschreiten einer bestimmten Mindestspannung (z.B. bei 10 Volt). Abgesehen davon, dass sie bei gleicher Lichtqualität viel weniger Strom als eine Glühlampe braucht schaltet sie das System selbsttätig ab und verhindert Tiefentladungen! Wird der Strom durch Muskelkraft erzeugt wird Sauerstoff verbraucht und es entsteht CO₂. Unter den beengten Verhältnissen der knappen Luftvolumen sollte man sich eher dem Nichtstun hingeben und wenig atmen!

Solarmodule sind eine O₂ - und CO₂ -freie Alternative: Mit ihnen kann man „tags“ Licht einzufangen um es „nachts“ zu nutzen.

Im Schulbiologiezentrum Hannover haben wir eine kleine Solaranlage zum Experimentieren. Sie bestehen aus einem (oder mehreren) 10 Watt-PV-Modul(en), einem passenden Akku und verschiedenen, unterschiedlich viel Strom verbrauchenden Leuchten. Auch hier gilt: Sie müssen zum Akku passen und mit den Leistungsansprüchen der Verbraucher abgestimmt sein. Das kann man mit Messgeräten kontrollieren oder einen Laderegler einsetzen:

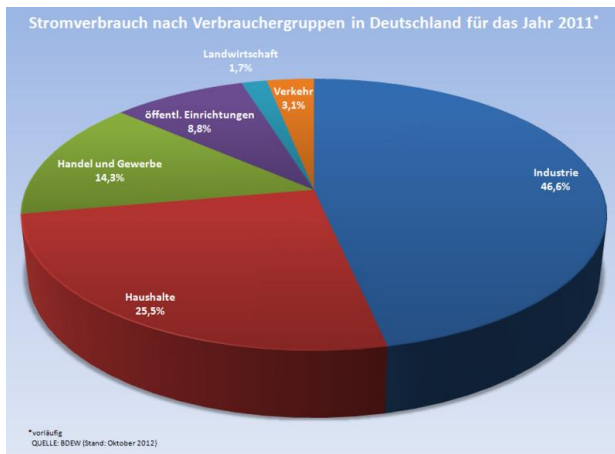
Ein elektronischer Laderegler kann das Energie-Management sehr effektiv und nachhaltig übernehmen. Er sorgt für den Akku schonende Ladeströme und schaltet den Akku selbsttätig ab, bevor er durch Überbelastung „in die Knie“ geht“ und durch wiederkehrende Tiefentladung dauerhaft geschädigt wird.

Mit Solarzellen kann man Wasser in Wasser und Sauerstoff trennen (Elektrolyse, s.o.) und zu einem späteren Zeitpunkt die Gase in einer Brennstoffzelle wieder in Wasser verwandeln. Die Beleuchtung in zwei unserer Unterrichtsräume arbeitet nach dem „Inselprinzip“. Der Strom wird von Solarmodulen und einem Windgenerator erzeugt und über Laderegler in Akkus gespeist. Ein solcher „Inselbetrieb“ ist nicht mit dem allgegenwärtigen Stromnetz verbunden und hat den Vorteil auch bei Stromausfällen zu funktionieren.

Man muss dabei immer „nachhaltig“ wirtschaften und kann keine „Schulden“ machen.

Wie viel Strom verbrauchen wir im „normalen“ Leben?

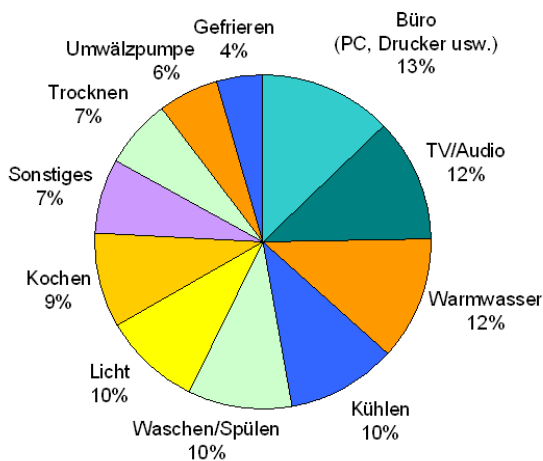
Der Gesamtstromverbrauch pro Person in Deutschland (Bruttogesamtverbrauch Deutschland geteilt durch Bevölkerung) betrug 2011 6648 kWh/a. Darin ist der private und öffentliche Stromverbrauch genau so enthalten wie der zur Fertigung der in Deutschland erzeugten Güter. Das sind etwa durchschnittlich 18 kWh pro Tag und Person.



Stromverbrauch Deutschland nach Verbrauchergruppen 2011 (Wikipedia)

Auf dem „Muskelkraftwerk“ lassen sich über einen längeren Zeitraum hinweg ohne größere Anstrengung 100 W elektrische Leistung „erstrampeln“. Für eine Kilowattstunde bräuchte man also 10 Stunden, für 18 KWh 180 Stunden. Das ist nur mit „Energiesklaven“ möglich und diese brauchen auch Nahrung und Sauerstoff!
Und was ist mit der „Solaren Alternative“? Welche installierte PV-Leistung müsste vorgehalten werden um 18 KWh täglich abzudecken?

Laut Wikipedia kann „in Deutschland kann ein mittlerer Energieertrag von etwa 650 bis 1150 kWh pro kW_{peak} i(KWp) installierter Leistung der Anlage und Jahr erwartet werden. Dies entspricht einer über das Jahr gemittelten Leistung von 7,5 % bis 13 %, bezogen auf die kW_{peak}-Angabe.“ (Wikipedia, „Photovoltaikanlage“). Das heißt: Jede Person bräuchte beim oben genannten Gesamtstromverbrauch/Kopf eine Anlage von etwa 6 kWp. Für 1 KWp ist bei monokristallinen Solarzellen etwa 8 m², bei Dünnschichtzellen 10m² und bei amorphen Zellen 12m² Modulfläche erforderlich. Als grobe aber merkbare Faustformel kann gelten: 100 kWh pro m² Modulfläche. Nebenbei bemerkt: In Deutschland wären bei 80 Millionen Einwohnern 80x10⁶ x 6 x 8 = 3840 km² Modulfläche (kristallin) erforderlich. Das ist etwas mehr als 1% der Gesamtfläche Deutschlands.



Anteil verschiedener elektrischer Verbraucher am privaten Haushaltsstromverbrauch (Wikipedia)

Der private Stromverbrauch liegt je nach Haushaltsgröße (1 – 6 Personen) zwischen etwa 1800 und 1000 kWh pro Jahr und Person.
Quelle Wikipedia, „Bedarf an elektrischer Energie“). Pro Tag und Person sind das 5 – 2,7 kWh. beim Preis von tendenziell 30 Cent/kWh. Auf dem Muskelkraftwerk müsste man dafür 50 – 27 Stunden 100 W Leistung erstrampeln.

Für den privaten Haushaltsstromverbrauch läge die installierte PV-Leistung pro Kopf zwischen 2 und 1 KWp oder – mit monokristallinen Zellen - etwa 16 bzw. 8 m² Modulfläche.

Die PV-Module mit denen wir im „Raumschiff Erde“ experimentieren haben eine Leistung von 10Wp. 100 Stück davon würden 1 KWp liefern.

Ob mit endlicher Muskelkraft oder begrenzter Fläche für Solarmodule: Die „Raumfahrer“ werden sich auf bescheidenere Verhältnisse einstellen müssen und sich fragen, welche elektrischen Verbraucher sie tatsächlich brauchen.

Ressource „Nahrung“

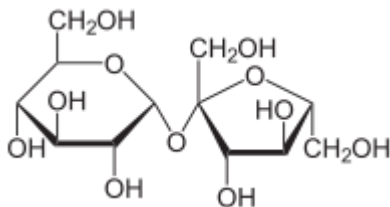
Zucker als Energiequelle

Die in der Nahrung enthaltenen Nährstoffe sind der „Treib- oder Brennstoff“ aller Lebewesen, also auch des Menschen. Sie sind die alle Lebensprozesse tragende Energiequellen, vergleichbar mit Benzin oder Diesel die Fahrzeuge mit Energie versorgen.

Der Treibstoff von der Tankstelle wird unter Sauerstoffverbrauch in Kohlenstoffdioxid und Wasser verwandelt. Im Falle der Nahrung ist es nicht anders. Nur dass die biologische Verbrennung, die Zellatmung, ein viel komplexerer, stiller, Feuer- und Rauchfreier Vorgang ist. Gemein ist beiden Verbrennungsarten dass ein Teil der umgesetzten Energie als Wärme anfällt.

Nahrungsmittel wie Zucker und Speiseöl sind Brennstoffe: Ein Zuckerwürfel lässt sich entflammen und mit Raps- oder Sonnenblumenöl kann man sich eine Kerze bauen.

Könnten wir Im Raumschiff von Zucker leben? Eine derart einseitige Diät ist natürlich alles andere als gesund und soll hier auch nicht empfohlen werden. Hier beschränken wir uns nur deshalb auf den Zucker um die Zusammenhänge zwischen Energiegehalt, Energieverbrauch, Sauerstoffverbrauch und CO₂-Abgabe deutlich werden zu lassen.



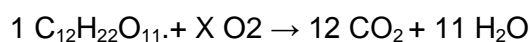
Grafik: Wikipedia

Haushaltszucker besteht aus Saccharose, einem Doppelzucker aus zwei miteinander verbundenen Glucose-Molekülen mit der Summenformel C₁₂H₂₂O₁₁.

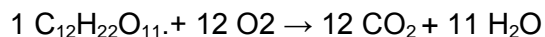
Wie viel Sauerstoff (O₂) wird bei der Saccharose-Verbrennung verbraucht? Wie viel CO₂ und Wasser entstehen dabei?

Ein Molekül C₁₂H₂₂O₁₁ verbrennt zu 12 Molekülen CO₂ und 11 Molekülen H₂O.

Damit lässt sich schon ein Teil der Reaktionsgleichung formulieren:



Die 12 CO₂- und die 11 H₂O Moleküle enthalten zusammen 24+11 = 35 O Atome. 11 O-Atome stammen aus dem Saccharose-Molekül. Die fehlenden 24 O-Atome (= 12 O₂ Moleküle) ergeben den Sauerstoffbedarf. Damit lautet die vollständige Reaktionsgleichung:



Um den Sauerstoffbedarf bzw. die CO₂ und H₂O-Abgabe in Litern bestimmen zu können müssen die umgesetzten Stoffmengen (Massen) ermittelt werden.

1 Saccharose-Molekül hat eine Masse von 342 u. 1 u ist die atomare Masseneinheit, definiert als 1/12 der Masse eines Kohlenstoff-Atoms (¹²C)

Ein Wasserstoffatom (H) hat 1 u, ein Kohlenstoffatom (C) 12 u und ein Sauerstoffatom (O) 16 u.

Daraus ergibt sich für 1 C₁₂H₂₂O₁₁: 2 x 12 + 22 x 1 + 11 x 16 = 342 u

Um Stoffmengen miteinander vergleichen zu können wurde die Einheit „Mol“ eingeführt:

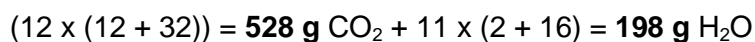
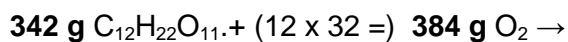
1 Mol ist die Menge der in 12 g Kohlenstoff enthaltenen Teilchen (hier Atomen). Da Atome sehr klein sind und eine nur sehr geringe Masse haben ist die Teilchenmenge sehr groß.

Ein Mol entspricht daher etwa $6,02 \times 10^{23}$, 6,02 Trilliarden oder 6020000000000000000000000000 Teilchen.

Ist die Molekülmasse eines Stoffes bekannt ist die Masse eines Mols leicht zu bestimmen. Die molare Masse von Saccharose mit der Molekülmasse von 342 u ist 342 g.

Wenn 342 g Saccharose (z.B. Würfelzucker) verbrannt werden 12 Mol O_2 verbraucht bzw. entstehen 12 Mol CO_2 und 11 Mol H_2O .

Nur zur Vollständigkeit das Gesetz des Massenerhalts:
Bei der Verbrennung werden Stoffe verwandelt, ihre Massen bleiben dabei erhalten:



Aus 726 g Edukten werden 726 g Produkte.

1 Mol eines Gases hat bei 20°C und normalen Druck (1013 hPa) ein Volumen von etwa 24 Liter.

Daraus folgt: Bei der Verbrennung von 1 Mol Saccharose (342 g) werden 12 Mol = 12 Mol (= 288 Liter) Sauerstoff verbraucht und es entstehen 12 Mol (= 288 Liter) CO_2 .

Wenn Wasser als gasförmiger Wasserdampf abgegeben wird sind das 11 Mol (= 264 Liter) H_2O .

Im flüssigen Zustand sind es 198 g (= 198 ml) Wasser.

1 g Saccharose ist der 342ste Teil eines Mols Saccharose

1 g Saccharose	$384/342 = 1,1 \text{ g } O_2$	→	$528/342 = 1,5 \text{ g } CO_2$	$198/342 = 0,6 \text{ g } H_2O$
	$288/114 = 0,8 \text{ l } O_2$		$288/342 = 0,8 \text{ l } CO_2$	$(264/342 = 0,8 \text{ l } H_2O)$

Ein Stück Würfelzucker „wiegt“ (besser: hat eine Masse von) etwa 3 g. Das sind weniger als 1%, genauer den 114en Teil eines Mols Saccharose.

Die Bilanz der Verbrennung eines Stücks Würfelzucker sieht damit so aus:

3 g Saccharose	$384/114 = 3,4 \text{ g } O_2$	→	$528/114 = 4,6 \text{ g } CO_2$	$198/114 = 1,7 \text{ g } H_2O$
	$288/114 = 2,5 \text{ l } O_2$		$288/114 = 2,5 \text{ l } CO_2$	$(264/114 = 2,3 \text{ l } H_2O)$

Wie viel Sauerstoff verbrauchen wir beim Essen?

Wie viel CO_2 und Wasser entstehen dabei?

Wie viel Stücke Würfelzucker müsste man essen um seinen Energiebedarf zu decken?

Grund- und Leistungsumsatz: Energieverbrauch eines Menschen

Nach Wikipedia erfordert unser **Grundumsatz** nach einer einfachen Abschätzung eine Energiezufuhr von etwa 25 kcal (rund 105 kJ) pro Kilogramm und Tag (1 kcal = 4,18684 kJ). D.h. ein ruhender, 70 kg schwerer Mensch setzt in 24 Stunden 7327 kJ um.

Das entspricht dem Energieinhalt von etwa 12 - 13 Brötchen (594 kJ/Brötchen).

Der Grundumsatz auch darüber hinaus größen- und altersabhängig: Genauere Berechnung erfolgen über Näherungsformeln (Harris-Benedict-Formel, Broca-Index Anpassung, Mifflin-St.Jeor-Formel). Darauf wird hier nicht eingegangen.

Der Leistungsumsatz ist dem Grundumsatz aufgesattelt: Er wird berechnet, indem man dem Grundumsatz mit einem von der jeweiligen Tätigkeit abhängigen PAL-Faktor multipliziert. Zur Ermittlung des täglichen Gesamtumsatzes werden noch die entsprechenden Zeitspannen hineingerechnet:

Der **Leistungsumsatz** bei körperlicher Aktivität ist abhängig von der ausgeübten Tätigkeit. Er wird ermittelt, in dem man den Grundumsatz mit so genannten PAL-Faktoren (Physical Activity Level) multipliziert und das Ergebnis nach Zeit gewichtet.

PAL-Faktor		
0,95	schlafen	-
1,2	nur sitzend oder liegend	alte, gebrechliche Menschen
1,4–1,5	fast ausschließlich sitzend, wenig Freizeitaktivitäten	Schreibtischtätigkeit
1,6–1,7	überwiegend sitzend, mit zusätzlichen stehenden/gehenden Tätigkeiten	Krautfahrer, Studenten, Laboranten
1,8–1,9	überwiegend stehende/gehende Tätigkeit	Verkäufer/innen, Kellner, Handwerker, Hausfrauen
2,0–2,4	körperlich anstrengende berufliche Tätigkeit	Bergleute, Landwirte, Waldarbeiter, Hochleistungssportler

Beispiel der Berechnung des täglichen Leistungsumsatzes

Tätigkeit	PAL-Faktor x Zeit (Stunden h)
9 Stunden berufliche Tätigkeit:	$1,9 \times 9 = 17,1$
8 Stunden Freizeitaktivität:	$1,4 \times 8 = 11,2$
7 Stunden Schlaf:	$0,95 \times 7 = 6,65$
Σ 24 h	34,95
\emptyset h	1,46
Leistungsumsatz = Grundumsatz 7327 kJ x 1,46 =	10697kJ

Das entspricht 18 Brötchen (594 kJ/Brötchen)

Quelle: WIKIPEDIA Leistungsumsatz

Den Grundumsatz decken – würden wir uns so einseitig ernähren müssen - rund 145 Zuckerwürfel oder 436 g Saccharose (Haushaltszucker). Addieren wir den Leistungsumsatz hinzu sind es 212 Würfel oder 637g Saccharose.

Mit einem Pfund Zucker kämen wir demnach wohl über den Tag.

Täglich etwa 500 g Zucker verbrauchen etwa 500 Liter O₂ bzw. erzeugen 500 Liter CO₂...

436 g bzw. 637 g sind 1,26 bzw. 1,86 Mol Saccharose. Der Sauerstoffverbrauch des Grund- bzw. Leistungsumsatz liegt also zwischen $12 \times 1,26 = 15,1$ Mol = 362 Liter und $12 \times 1,86 = 22,3$ Mol = 536 Liter. Dabei entstehen die gleichen Volumina CO_2 . Als Faustwert kann man sich 500 Liter merken.

Übrigens kostet das Pfund aus Zuckerrüben hergestellte Zucker weniger als 50 Cent (z.B. bei ALDI). Für einen Mindestlohn von 8,50€ müsste man dafür gerade einmal dreieinhalb Minuten arbeiten...

Und wie viel Ackerfläche braucht man für ein Pfund Zucker? Bei einem Hektarertrag von 70 t, einem Zuckergehalt von 18% (Niedersachsen 2011, Quelle: www.agrarheute.com) und einem Zuckerertrag von 12,5 t/ha benötigt man für die Tagesration von 500 g Zucker eine Fläche von etwas weniger als einem halben Quadratmeter. ($12500 \text{ kg}/10000 \text{ m}^2 = 1,25 \text{ kg/m}^2$).

Die einfachste Lösung: Müsli-Riegel (Lecker, raumsparend bei hohem Energiegehalt)



Ein 50g-Riegel enthält 929 kJ Energie und deckt etwa 12,7 % des Grundumsatzes (7326,97 kJ). Ohne etwas tun zu müssen – müsste man, nur um den Energiebedarf zu decken, etwa 8 Riegel essen. Oder: Pro Jahr etwa 2879 Riegel oder etwa 240 Packungen à 12 Stück.

Brötchen: Mitnehmen oder selbst erzeugen?



Foto: WIKIPEDIA

Ein normales Brötchen mit einem Gewicht von 50 g enthält etwas weniger als 600 kJ Energie. (Energiegehalt 100g (Weizen-) Brötchen 1188 kJ, ein 50 g-Brötchen enthält also 594 kJ)

Zum Brötchenpreispreis von 30 Cent kann man seinen täglichen Grundumsatz mit 3,60 € decken und das normale tägliche Leben mit gut 6 €. Ausgehend von 8,50€ Stundenlohn könnte man sich 28 Brötchen pro Arbeitsstunde kaufen. Oder: Für ein Brötchen muss man heute unter Mindestlohnbedingungen etwa zwei Minuten lang arbeiten.

Man könnte aber auch versuchen, die Brötchen „von der Pike auf“ selbst herzustellen. Dazu braucht man keimfähige Weizenkörner, Erde, Wasser, Sonnenlicht und Zeit. Nur: Wie viel Platz braucht man für den „Brötchenacker“?

Dazu ein paar Zahlen für den Taschenrechner:

- Der durchschnittliche Weizenertrag pro Hektar (1 ha = 10000 m²) betrug in Niedersachsen (2004 - 2011) etwa 80dt (1 Dezitonne = 1/10 Tonne).
- Aus 1000 g Weizen werden etwa 770 g Mehl.
- Ein Brötchen wiegt etwa 50 g, davon sind rund 37 g Mehl und 13 g Wasser.
- Für ein Brötchen braucht man etwa 48 g Weizen (37g x 1000/770)
- Ein Hektar liefert 8 Tonnen oder 8000 kg Weizen. Daraus werden (8000 x 0,77) etwa 6160 kg Mehl.
- Ein Quadratmeter Ackerfläche bringt 800 g Weizen oder 616 g Mehl.
- Auf einem Quadratmeter "wachsen" also (616 / 37) etwas mehr als 16 Brötchen (16,65).
- Wenn man wissen möchte, wie viel "Platz" ein Brötchen gebraucht hat muss man nur einen Quadratmeter durch die Zahl der darauf wachsenden Brötchen teilen: 1 m² / 16,65 = 0,06 m²
- Ein Brötchen braucht also etwa 0,06 m² Fläche oder ein Quadrat mit der Kantenlänge von 24,5 cm.
- Eine A4-Seite mit 21 x 29,7 cm Seitenlänge hat eine Fläche von rund 0,062 m²!
- Oder: Auf einem ha (10000 m², 100 x 100 m) „wachsen“ etwa (10000 / 0,06) 166666 Brötchen!

Zur Herstellung eines Brötchens braucht es also eine Fläche von etwa einer A4-Seite. Für den täglichen Bedarf etwas mehr als einen Quadratmeter.

Man könnte sich auch fragen: Wie viele Ähren und Körner braucht man für ein Brötchen?



Noch grüne Weizenähren
Foto: Ingo Mennerich

Auf einem Quadratmeter niedersächsischer Ackerfläche stehen durchschnittlich etwa 500 Weizenähren mit je etwa 40 Körnern (Winterweizen).

Das sind zusammen genommen etwa 20000 Körner pro Quadratmeter.

Tausend Körner (Tausendkorngewicht TKM) wiegen im norddeutschen Durchschnitt etwa 45 g.

Eine Ähre liefert also etwa 45 g / 1000 x 40 = 1,8 g Weizenkörner und 1,8 x 0,77 = 1,4 g Mehl

Ein 50 g-Brötchen mit 37 g Mehlinhalt "verbraucht" also (37 / 1,4 = 26,43) etwa 26 Ähren oder (26 x 40 = 1057) mehr als Tausend Weizenkörner!

Zahlengrundlagen:

Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2011,
Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2012)

Der „Brötchenacker“ im Schulbiologiezentrum



Foto: Ingo Mennerich

Dieses kleine Weizenfeld im Schulbiologiezentrum Hannover hat eine Größe von etwa 2 Quadratmetern.

- Wie viele Brötchen kann man mit der Ernte backen?
- Wie viele Kekse?
- Wie viele Pizzas?
- Wie viele Eier kann ein Huhn damit legen?
- Wie viel Hühnerfleisch kann daraus entstehen?
- Wie lange reicht das zum Leben?
- Wie viel Acker braucht der Mensch?

Wie viele Weizenkörner muss man für eine gute Ernte in die Erde bringen?

Die Saatkichte beim Weizen hängt von der Sorte vom Zeitpunkt der Aussaat ab.

Es gibt Sorten die sich gut und solche die sich schlecht bestocken. Mit Bestocken ist gemeint, dass nach der Keimung eines Samens seitlich mehrere zusätzliche Seitensprosse entstehen die später Halme bilden. Es entstehen also mehr Ähren als Samen in die Erde gebracht wurden. Das Bestocken braucht Zeit, früh ausgesäeter Weizen ist hier im Vorteil. Daher braucht man bei Frühaussaat weniger Körner pro Fläche. Bei sehr spätem Saattermin braucht man entsprechend mehr.

In der Regel sät man etwa 350 – 400 Körner auf 1 Quadratmeter.

Bezogen auf die für ein Brötchen ermittelte Fläche von 0,06 m² sind das 21 - 24 Körner.

Weizen ist ein Dunkelkeimer, daher ist es notwendig die Samen zu bedecken.

Die optimale Saattiefe liegt bei 4 cm.

Die Aussaat des **Winterweizens** erfolgt im Herbst, die jungen Pflanzen überwintern und bestocken sich dabei.

Der Kältereiz und die kurzen Tage (Vernalisation) sind notwendig damit der Weizen im Frühjahr in die Höhe schießen kann. Erst dann werden Halme, Ähren und Fruchtstände gebildet.



Weizen im Dezember, Foto: Ingo Mennerich

Sommerweizen wird im Frühjahr ausgesät, die Vernalisation ist nicht nötig. Dafür ist die Zeit um sich zu bestocken kürzer was durch ein mehr an Saatgut ausgeglichen werden muss (etwa 450 Körner/m² oder 27 Körner pro Brötchen)

Weizen ist ein einjähriges Gras und muss jährlich neu ausgesät werden.

Um Bodenmüdigkeit und Schädlinge zu vermeiden, darf Weizen nicht auf Weizen angebaut werden.

"Hühner oder Eier": Was nehme ich mit?



Fotos: Ingo Mennerich

Ein Hühnerei enthält durchschnittlich 677 kJ Energie.

Ohne etwas zu tun bräuchte man, nur von Eiern lebend, täglich etwa 12 davon.

Wie viele Eier passen in das "Raumschiff"?

Oder sollte man besser ein Huhn mitnehmen?

Bei LIDL kostet ein Hühnerei etwa 11 Cent. Mit 8,50 € Mindestlohn kann man 77 Eier pro Arbeitsstunde kaufen. Ein Ei ist in weniger als einer Minute „verdient“. Empfänger höherer Löhne arbeiten entsprechend weniger!



Eine 10er Eierschachtel aus Pappe hat die Maße 250 x 111,5 x 70 mm und damit ein Volumen von $0,25 \times 0,1115 \times 0,07 = 0,00195 \text{ m}^3$.

Für eine Jahresration (12 x 365 Tage) von 4380 Eiern bräuchte man 438 Schachteln.

Sie nehmen ein Volumen von $0,00195 \text{ m}^3 \times 438 = 0,855 \text{ m}^3$ ein.

Auch das Huhn hat ein Volumen, nimmt also allein mit seinem Körper Raum ein..

Und ein lebendes Huhn braucht Platz und einen auch zum Eier legen geeigneten Lebensraum.

Darüber hinaus braucht das Huhn Sauerstoff. Sein Atemzugvolumen liegt bei 0,03 Liter, die Atemfrequenz bei 27/min. Daraus errechnet sich ein Atemminutenvolumen (AMV) von 0,81 Liter. Unter der Annahme, dass das Huhn Luft mit einem O₂-Gehalt von 21% ein- und mit einem Gehalt von 16% ausatmet würde der Umgebungsluft pro Minute 0,04 Liter O₂ verloren gehen.

Quelle: Rainer Müller, Lehrstuhl für Didaktik der Physik, Universität München

(<https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/.../atmungstoffwechsel.pdf>) und eigene Berechnung

Wie viel Futter, wie viel Platz braucht ein Hühnerei?

Eine Legehenne braucht etwa 130 g Futter pro Tag. Sie beginnen im Alter von etwa 5 Monaten mit der Eiablage und produzieren im Laufe eines Jahres etwa 280 Eier.

Bei 800 g Weizenertag/m² braucht die Legehenne täglich etwa 0,1625 m² Ackerfläche

Das ist ein Quadrat mit der Seitenlänge $\sqrt{0,1625} = 0,403 \text{ m}$.

Der Futtereinsatz vom Schlüpfen bis zum Ende der ersten Legeperiode liegt größenordnungsmäßig bei etwa 67 kg.

Der Weizenanteil ist unterschiedlich. Standard-Legehennenfutter als Alleinfutter enthält etwa 7%, "Hofmischungen" 71% Weizen (Deutscher Verband Tiernahrung). Die folgende Rechnung basiert auf einer solchen "Hofmischung" vergleichbar mit dem was auch im Schulbiologiezentrum verwendet wird. Der Jahresbedarf beträgt dann 47,57 kg Weizen.

Pro Hühnerei sind etwa 47570g Weizen / 280 Eier = 169,9 g Weizen nötig. Etwa das 3 1/2fache dessen, was in einem Brötchen steckt.

Bezogen auf den oben genannten Weizenertrag (800 g/m^2) benötigt eine Legehennen pro Jahr eine Fläche von etwa $59,5 \text{ m}^2$ ($7,7 \times 7,7 \text{ m}$). Umgerechnet auf ein Ei etwa $0,21 \text{ m}^2$ ($0,46 \times 0,46 \text{ m}$).

Ein Hühnerei enthält mit 677 kJ nur geringfügig mehr Energie als ein Brötchen (594 kJ) verbraucht aber mit $0,21 \text{ m}^2$ statt $0,06 \text{ m}^2$ mehr etwa dreieinhalb mal so viel an Ackerfläche. Um den Tagesbedarf (Grundumsatz $7326,97 \text{ kJ}$) mit etwa 11 Eiern zu decken ist mit etwa $2,3 \text{ m}^2$ Weizenfläche zu rechnen, bei 12 - 13 Brötchen nur mit $0,75 \text{ m}^2$.

Ein Ei enthält etwa $2/3$ Wasser. Der Flüssigkeitsbedarf einer Henne beträgt etwa $1/3$ Liter pro Tag.

Quelle: Rund ums Ei, <http://www.rund-ums-ei.at/index.php?id=fuetterung>

Wie viel Futter brauchen die Hühner im Schulbiologiezentrum?

Im Schulbiologiezentrum Hannover gibt es Hühner. Neben den „Urhühnern“, den Bankivas, die nur so viele Eier legen wie sich Küken erbrüten können halten wir Zuchttrassen wie z.B. die großen schwarzen Australorps. Auch sie legen Eier, ihre „Leistung“ kommt allerdings längst nicht an die in Legebatterien, Käfig- oder in Bodenhaltung gehaltenen Hühnern heran.

Unsere Hennen legen im Schnitt alle drei Tage ein Ei. Sie haben eine Voliere und tagsüber viel Auslauf im Freiland so dass sie neben ihrer täglichen Futterration aus Getreide sich ihren Speiseplan scharrend und pickend selbst zusammensuchen können.



Foto: Ingo Mennerich

Unsere Hühner erhalten pro Tier täglich etwa 100 g „Golddot Zentrakorn“. Golddot Zentrakorn" wird vom Hersteller als "Ergänzungsfutter für Geflügel" bezeichnet. Da sie tagsüber Auslauf haben, eifrig picken nach Samen und kleinen Tieren suchen können und zusätzlich zerkleinertes Gemüse und Obst erhalten versuchen wir - mit Erfolg - ohne Zusatzfutter auszukommen.

Oft keimt das von den Hühnern übersehene Getreide. Sie fressen die Keimlinge - schon aufgrund ihres hohen Proteingehalts - ausgesprochen gerne. Das vom Hersteller empfohlene (sojahaltige) Legemehl zur Erhöhung der Legeleistung nehmen sie nicht an.

Die o.g. Futtermenge wurde von Andreas Hansen, Eierproduzent in Morsum/Sylt in etwa bestätigt: Seine etwa 2200 Rohländer erhalten pro Tier zwischen 120 und 135 g Futter pro Tag.

Wie groß ist die zur Erzeugung eines Hühnereies nötige Futterfläche?

Ausgehend von Erträgen von (aus von dt/ha umgerechneten) 800 g/m^2 für Weizen, 1000 g/m^2 für Mais und 500 g/m^2 für Gerste ergibt sich eine Fläche pro 100 g Futter:

Weizen	$1 \text{ m}^2 / 800 \text{ g} \times 47 \text{ g}$	$= 0,059 \text{ m}^2$
Mais	$1 \text{ m}^2 / 1000 \text{ g} \times 34,5 \text{ g}$	$= 0,035 \text{ m}^2$
Gerste	$1 \text{ m}^2 / 500 \text{ g} \times 16,5 \text{ g}$	$= 0,033 \text{ m}^2$

Zusammen macht das $0,1125 \text{ m}^2$ (oder ein Quadrat mit der Seitenlänge $0,335 \text{ m}$)

Das sind fast zwei A 4 Seiten. 300 g Futter wächst also auf der Fläche von etwa sechs A 4 Seiten (0,3375 m², ein Quadrat mit der Seitenlänge 0,581 m). Bei erhöhter Futtergabe ist diese Fläche natürlich größer.

In der Schule kann man 100 g Futter abwiegen, die Körner auszählen, sie getrennt abwiegen und ihren Anteil an der Mischung in Prozent angeben.

Das Trennen von Hand gelingt leicht: Nachdem Weizen, Gerste und Bruchmais erkannt sind finden sie schnell heraus, dass die Mischung in erster Linie aus Weizen und gebrochenem Mais besteht und dass Gerste eher in der "Minderheit" ist. Wenn die "selteneren" Gerste herausgelesen ist bleibt der gelbe, auffällige Mais und der rötlich braune, etwas glänzende, Brötchenförmige und mit einem "Schlitz" versehene Weizen übrig. Wenn beispielsweise 100 g Körnerfutter tischweise aufgeteilt wird ist das Trennen in relativ kurzer Zeit zu schaffen. Die Schüler prägen sich dabei die drei Getreidesorten durch ständige Wiederholung gut ein. Dabei hilft der Hinweis, dass aus Weizen Brot, aus Gerste Bier und aus Mais Tierfutter und "Benzin" ("Bioethanol") gemacht wird.

Ein manueller Trennversuch mit 23,8 g Futter ergab diese Werte

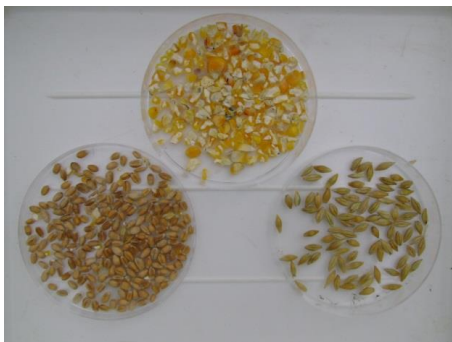


Foto: Ingo Mennerich

Weizen	9,75 g	41,7%
Mais gebrochen	8,80 g	37,7%
Gerste	4,81 g	20,6%
Muschelschalen	0,44 g	0,13%

Die Probe mit den aus der Fachliteratur entnommenen Tausenkorn- (TK)Gewichten stimmt mit dem Ergebnis der Zählung oft gut überein:

In 100 g Körnerfutter sind danach idealerweise enthalten:

940 Körner Weizen	47 g Weizen	(TK-Gewicht 50 g) :
106 Körner Mais	34,5 g Körnermais	(TK-Gewicht 325 g):
393 Körner Gerste	16,5 g Gerste	(TK-Gewicht 42 g)

Danach braucht man für Hühnererei etwa die sechsfache Ackerfläche eines Brötchens. Und das bei nahezu gleichem Energiegehalt!

Hühnerfleisch braucht noch mehr Platz: Das Beispiel Chicken-Nuggets



Wie viel Futter und wie viel Ackerfläche braucht ein Masthähnchen?

Masthähnchen werden, genauso wie Legehennen nicht nur mit Weizenkörnern gefüttert. Dafür ist der Eiweißgehalt zu gering. Der Weizenanteil kann, als Ergänzungsfutter, aber 50% betragen.

Die folgenden Zahlen sind mehreren Versuchsberichten der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Haus Düsse, www.duesse.de) aus den Jahren 2007 bis 2009 entnommen. Bei 50%iger Weizenfütterung erreichen Masthähnchen (im Versuch) nach 40 Tagen ein durchschnittliches Lebendgewicht von 2,6 kg und ein Schlachtgewicht von 1,9 kg. Die so genannte Ausschachtung, d.h. der nutzbare Fleischanteil betrug etwa 70% entsprechend etwa 1,33 kg. Der durchschnittliche Futtereinsatz lag bei etwa 4,5 kg also etwa 2,25 kg Weizen. Die Erzeugung von 100 g Hähnchenfleisch erfordert etwa 335 g Futter, davon rund 167 g Weizen.

Wie viel Weizen und welche Fläche stecken in einer Packung Chicken McNuggets?

In einer 500 g Packung Chicken Nuggets sind etwa 350 g Hähnchenfleisch enthalten. Das bedeutet: In einer Packung stecken etwa $(3,5 \times 167)$ 585 g Weizen. Für 585 g Weizen werden etwa $0,74 \text{ m}^2$ Ackerfläche benötigt. Das ist ein Quadrat mit der Seitenlänge 86 cm. Ein DIN A 4 Blatt hat die Maße $210 \text{ mm} \times 297 \text{ mm} = 0,06 \text{ m}^2$

Das heißt:

Die Fläche die zur Erzeugung von 350 g Hühnerfleisch notwendig ist entspricht etwa 12 DIN A 4 Seiten ($0,74 : 0,06 = 12,3$) oder der Fläche die zur Erzeugung von 12 Brötchen notwendig wäre.

Der Energiegehalt von (rohem) Hähnchenfleisch liegt bei etwa $600 \text{ kJ}/100\text{g}$:

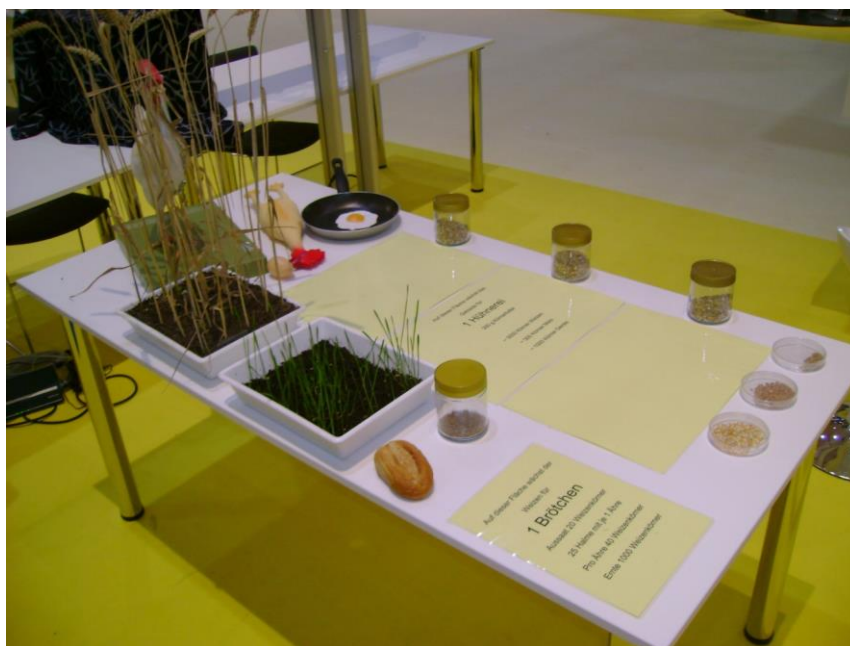
Berechnet aus:

100g Hähnchenbrust (roh) 165kcal $\rightarrow 165\text{kcal} \times 4,1868 = 690,8 \text{ kJ}$

100 g Hähnchenkeule (roh) 120kcal $\rightarrow 120\text{kcal} \times 4,1868 = 502,4 \text{ kJ}$

Und was wäre, wenn wir im „Raumschiff“ statt Hühnerfleisch lieber Schweine- oder Rindfleisch essen möchten?

Nach einer WWF-Studie (Fleisch frisst Land“) bedarf es zur Produktion von 1 kg Schweinefleisch $0,9 - 1,2 \text{ m}^2$. Rindfleisch „frisst“ mit $2,7 - 4,9 \text{ m}^2$ noch mehr Fläche.



Einfache Visualisierung der zur Produktion von Eiern und Hühnerfleisch notwendigen Futterflächen auf der IdeenExpo 2013.

Foto: Ingo Mennerich

Ressource „Abfall“

Dünger für das „Raumschiff“? Die Recycle“-Toilette

Auf der IdeenExpo haben wir als „Hingucker“ einen Skelett in die Gummisphäre gesetzt. Dieser (woran?) gescheiterte „Raumfahrer“ saß – umgeben von Süßigkeiten, Brötchen, Kuschtieren und anderen „nützlichen“ Dingen auf einem Stuhl. Unter ihm ein Blecheimer, daneben eine Rolle Toilettenpapier. Man sollte eben nicht nur an den „Input“ denken sondern auch an das, was am Ende dabei herauskommt...



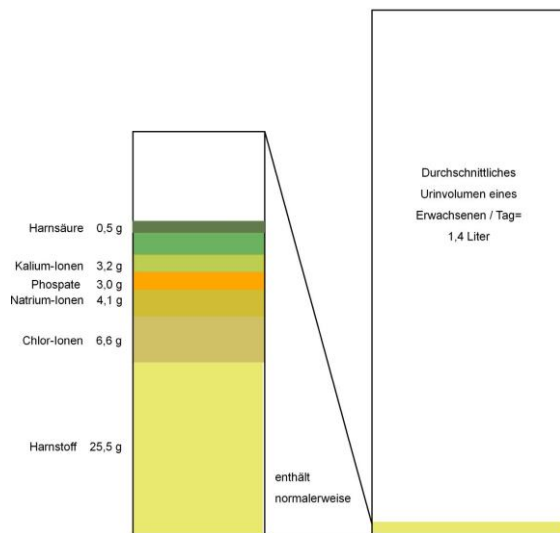
Foto: Ingo Mennerich

Wer Eiweiß isst muss „Wasser lassen“...

Das „kleine Geschäft“ besteht zu rund 95% aus Wasser. Viele Schüler (und nicht nur Schüler!) hängen der naiven Ansicht an, dass wir nur ein „Durchlauf-erhitzer“ nach dem Motto „oben rein, unten raus“ sind, eine Sichtweise, die vordergründig betrachtet auf der Erfahrung ruht, dass wir nach starkem Genuss bestimmter Getränke ganz schnell „müssen“.

Wir geben täglich etwa 1 – 1,5 Liter Urin ab. Ist das nicht eine Verschwendung angesichts der Tatsache, dass wir eher verdursten als verhungern? Könnte man das unangenehme Thema „Wasser lassen“ umgehen, wenn man weniger oder nichts trinkt?

Definitiv nein: Urin ist das Endprodukt eines in Leber und Niere stattfindenden Entgiftungsprozesses von Stoffwechselprodukten, in erster Linie des Ab- und Umbaus von Stickstoffverbindungen. Äße man, wie im obigen Beispiel, bräuchten wir vielleicht nicht „müssen“. Stickstoffhaltige Einweißverbindungen (Proteine) sind aber ein wesentlicher Bestandteil lebender Systeme, dazu gehören Gerüstsubstanzen, Enzyme und die DNA. Und wer Eiweiß isst (pflanzliches Eiweiß, Eier, Fleisch) muss „müssen“!



Grafik: Ingo Mennerich

Die vom Wasser mit ausgeschwemmten Stoffe setzen sich aus Harnstoff, Harnsäure, Kreatinin, verschiedenen Salzen (z.B. Kochsalz), Phosphaten und organische Säuren (z.,B. Oxal- und Zitronensäure) zusammen.

Harnstoff, von dem wir täglich etwa 25 g abgeben ist das ungiftige Endprodukt des Protein- und Aminosäureabbaus bei dem zunächst Ammoniak entsteht. Nur Tiere die in engem Kontakt mit Wasser stehen (Fische) können es sich leisten, Ammoniak auszuscheiden. Säuger (und damit wir Menschen verwandeln diese Stickstoffverbindungen in Harnstoff.

Stickstoffhaltige Purine (z.B. aus der DNA- oder dem ADP/ATP Stoffwechsel) werden in Harnsäure verwandelt (täglich etwa 1 g)

Eine Tagesmenge Urin enthält etwa 10 g Salze und 3 g Phosphate und Säuren.

Urin enthält – wie NPK-Dünger - Stickstoff (N), Phosphor (P), und Kalium (K). Unverdünnt „verbrennt“ er die Pflanzen, Im Mischungsverhältnis 1:5 (mit Wasser verdünnt) ist Urin ein hervorragender Pflanzendünger. Die Menge Urin, die ein Mensch pro Jahr abgibt reicht theoretisch aus, um einen Acker von 300m² zu düngen. Leider spaltet Urin, wenn es länger der Luft ausgesetzt ist das stechend riechende Ammoniak ab. Im „Raumschiff“ wohl eher keine Lösung! Und obwohl frisches Urin keimfrei und ungiftig ist, führt die Vorstellung, dass das so gedüngte Getreide „Pipi“ enthält doch eher zur Abwertung.

Man kann Urin – als geruchsfreie Alternative und zur Erhöhung der Akzeptanz - durch Zugabe von Magnesiumoxid in Mineraldünger verwandeln. Dabei entsteht Struvit (NH₄)Mg[PO₄]·6H₂O, auch Magnesiumammoniumphosphat (MAP) genannt. Magnesiumoxid kann 98% des im Urin enthaltenen Phosphors ausfällen.

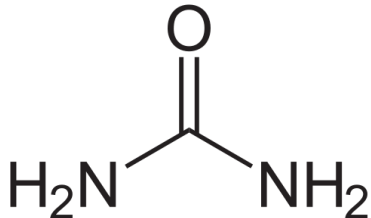
Struvit ist in Nieren- und Harnsteinen enthalten. Des Weiteren kann sich Struvit auch bei der Abwasserreinigung und bei der Gülleaufbereitung bilden. Stellenweise treten dabei so hohe Konzentrationen von Ammonium, Magnesium und Phosphat auf, dass die Sättigungskonzentration von Struvit überschritten wird. Dann bilden sich Beläge aus Struvit, die den Betrieb von Klär- oder Gülleaufbereitungsanlagen beeinträchtigen können.

Pee-Poo: Das "Große Geschäft" wird zu Dünger...

Das „Raumschiff“ ist kein Platz für ein WC. Woher sollte das knappe Wasser herkommen und wohin sollte es unsere Hinterlassenschaften tragen? Es ist auch kein Ort für einen, Exkremete zu Dünger kompostierenden Misthaufen. Wäre eine Komposttoilette als trockenes „Plumpsklo“ mit Stroh und Rindenmulch denkbar? Wie lange dauert der Umwandlungsprozess? Wie stark ist die Geruchsbelästigung im „Raumschiff“? Was ist mit der Trenn-Toilette? Das „Kleine Geschäft“ macht 85% unserer Ausscheidungen aus und enthält 95% evtl. zu Trinkwasser recyclebares Wasser. Kot und Urin im normalen „Plumpsklo“ gemeinsam kompostiert führt zu starken Gerüchen denn Kot enthält das Enzym Urease das den im Urin enthaltenen Harnstoff in Ammoniak und CO₂ aufspaltet. Ein Zweikammer-System vermeidet das.

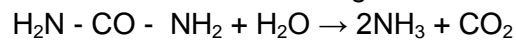
Wir sind es gewohnt unsere Ausscheidungen mit einem großen Schwung Trinkwasser durch lange Rohrleitungen zu schicken und machen uns normalerweise kaum Gedanken darüber, wo das alles so bleibt.

In den Slums der armen Länder dieser Welt gibt es „fliegende Toiletten“: Das heißt: Tüte als Toilette nutzen, zuknoten, weit wegwerfen. So wird bei uns manchmal mit Kotbeuteln für Hunde verfahren, umschauen ob jemand da ist, ausholen und Beutel ins Gebüsch werfen. In Slums gibt es meistens keine Gebüsche. Die sind schon zu Brennholz geworden.



Grafik: Wikipedia

Der schwedische Architekt Anders Wilhelmson, der sich sonst eher mit Großprojekten wie der Umsiedlung der Stadt Kiruna beschäftigt erfand den „PeePoo-Bag“, die Toilette für die Hosentasche. „Pee“ heißt „Pipi“, „Poo“ steht für das „große Geschäft“ (das vom Volumenanteil eher das „kleine“ ist...). Ein Plastikbeutel, 6 g schwer innen mit 4 g Harnstoff beschichtet. Der Harnstoff wird durch die in Exkrementen enthaltene Urease zu Ammoniak und CO₂ abgebaut.



Ammoniak desinfiziert und macht den Kot geruchsfrei. Die Kanten des Beutels sind (kleberfrei) mit Ultraschall –verschweißt. Der Beutel besteht aus dem von BASF entwickelten Polymer Ecoflex und löst sich nach einigen Wochen auf. Bis dahin ist der Inhalt zu Dünger geworden. Schon nach einer Woche stellt der Inhalt kein Infektionsrisiko mehr dar.

PeePoo-Beutel werden zur Zeit (2013) nur in Entwicklungsländern vertrieben. Beim Erdbeben in Christchurch (Neuseeland) kamen sie zum Einsatz. Langfristig werden sie in Europa wohl auch für den Freizeitmarkt (Segelsport und andere „Outdoor“-Aktivitäten).

Schulprojekte können Kontakt mit „Project Director Camilla Wirseen, camilla.wirseen@peepoople.com, Telefon +46 70 416 36 22. aufnehmen.

Wie viel „Müll“ erzeugt der „Raumfahrer“?

Wie stark belastet der unweigerlich anfallende Müll unser „Raumschiff“?

Nicht jeder findet sofort die Antwort auf die Frage: Nimmt das Gesamtgewicht des Raumschiffs im Laufe der Zeit eigentlich zu, nimmt es ab oder bleibt es gleich?

Natürlich bleibt die Gesamtmasse aller Stoffe in diesem geschlossenen System enthalten. Daher kann sich das Gewicht nur unter veränderten Schwerkraftbedingungen ändern.

Die Masse der nutzlosen, also nicht wieder verwendbaren Stoffe kann im „Raumschiff“ allerdings zum Problem werden. Daher sollte man sich schon vor dem Einsteigen Gedanken zum Thema „Müll“ machen...

Sauerstoffverbrauch und CO₂-Entwicklung durch Abbauprozesse

Der beim aeroben Abbau von „Müll“ in einer Zeiteinheit verbrauchte Sauerstoff lässt sich in einem Respirometer messen. Dabei liegt das verrottende Material auf einem engmaschigen Sieb oder aufgehängt in einem Säckchen über dem Boden eines Gefäßes das ein U-förmiges und mit einer Messflüssigkeit versehenes Manometer trägt. Auf den Boden des Gefäßes wird etwas Wasser und Natriumhydroxid gegeben das das entstehende CO₂ absorbiert. Durch den Sauerstoffverbrauch entsteht ein durch das absorbierte CO₂ nicht kompensierter Unterdruck der im Manometer angezeigt wird.

Dieses Experiment ist im Doppelversuch gut geeignet, abbaubare und nicht abbaubare Stoffe zu erkennen.

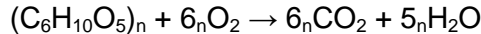
Abbaubare und nicht abbaubare Stoffe

„Biomüll“

Biomüll lässt sich kompostieren, d.h. biologisch (durch Organismen) abgebaut. Die Masse des verbrauchten Sauerstoffs und das entstehende CO₂-Volumen richten sich nach der Masse und der Oxidierbarkeit des Stoffgemisches.

Papier

Papier entsteht weitestgehend aus Holz und zwar aus dessen 50 – 60%ige Anteil von Zellstoff (Cellulose) der durch Kochen in Natron-, Sulfat- oder Sulfidlauge herausgelöst wird. Cellulose ist ein Polymer des Doppelzuckers Cellubiose (C₁₂H₂₀O₁₀) die wiederum aus zwei Glucose-Molekülen besteht. Zerkleinertes und eingeweichtes Papier ist mit einem Zuschlag von bakterien- und pilzhaltiger Erde bedingt kompostierbar. Entscheidend ist das Vorhandensein von Cellulasen die die Bindungen zwischen den Cellubiose-Dimeren bzw. Glucose-Monomeren lösen. Cellulasen werden von Holz- und Zellstoff abbauenden Bakterien (z.B. Streptomyzeten) und Pilzen (Braunfäule-Erreger) gebildet. Druckfarben stellen u.U. erhebliche Probleme dar. Verbundstoffe, z.B. plastinierte Pappe lässt sich nur teilweise abbauen. Bei der Zersetzung wird Sauerstoff verbraucht und es entsteht CO₂. Die Summenformel der Cellulose ist (C₅H₁₀O₅)_n. Die Molmasse jeder Einheit ist 5x12+10x1+5x16 = 150g/mol bzw ein n-Vielfaches davon.. Die Reaktionsgleichung lautet



Um ein Mol C₆H₁₀O₅ vollständig abzubauen werden 6 Mol Sauerstoff (6 x 24 = 144 Liter) verbraucht und 6 Mol CO₂ (144 Liter) erzeugt.

Auf 100 g Cellulose umgerechnet sind das 96 Liter O₂ bzw. CO₂.

Kunststoffe

Zu den **biologisch nicht abbaubaren**, aus **fossilen Rohstoffen** hergestellten synthetischen Polymeren gehören:

- **PE: Polyethylen**, ein aus Ethylen-Gas unter hohem Druck hergestelltes thermoplastisches Polymer aus Ethen-Molekülen (- CH₂ – CH₂ -)_n, d.h. ein hochmolekulares Alkan mit Molmassen um 300000g/mol also mehr als 20000 Ethen-(C₂H₄)Einheiten PE sehr langlebig, ist beständig gegen Säure, Laugen und Chemikalien (z.B. Lösungsmittel) und nicht natürlich abbaubar. PE versprödet unter Sonneneinstrahlung und zerfällt in kleinere, aber durch Organismen nicht abbau- und integrierbare Teilchen.
- **PP: Polypropylen**, ein aus Propen-(C₃H₆)Einheiten bestehendes thermoplastisches Polymer. Abbauverhalten ähnlich wie PE
- **PS: Polystyrol**, ein Polymer aus Styrol (C₈H₈)Einheiten. Styropor besteht aus PS. PS verrottet praktisch nicht, ist unempfindlich gegen viele Chemikalien versprödet aber durch Sonnenstrahlung. Dabei werden aber nur kleinere, von Organismen nicht verwertbare und

dort angereicherte Partikel gebildet. UV Licht (Wellenlänge 253,7 nm) zersetzt es in einfachere chemische Verbindungen.

- PVC: **Polyvinylchlorid** ist ein thermoplastisches Polymer aus Vinylchlorid(C_2H_3Cl)-Einheiten. Extrem langlebig, widersteht nahezu allen Chemikalien, versprödet unter Sonnenlicht nicht.
- PVC ist von Natur aus hart und wird erst durch Weichmacher elastisch. Die dabei eingesetzten Phalate greifen in den Hormonhaushalt des Menschen ein und führen zu Fortpflanzungsstörungen.
- PUR: **Polyurethan** wird aus Dialkoholen bzw. Polyalkoholen und Polyisocyanaten hergestellt. Kennzeichnend ist die Urethan-Gruppe (-NH-CO-O-). Es gibt harte, spröde und weiche elastische Polyurethane. Zu den letzten gehören Schäume, z.B. weiche in Sportschuhen oder Haushaltsschwämme oder aushärtenden Montage- oder Isolierschaum (Wärmeisolation). Herstellung aufgrund hochtoxischer Zwischenschritte (Benzol, Phosgen) sehr problematisch. Bei Verbrennung werden Isocyanate und Blausäure frei.
- PET: **Polyethylenterephthalat** ist ein Polykondensat aus Ethylenglycol und Terephthalsäure. Es wird für Verpackungen (z.B. PET-Flaschen) und Folien benutzt. Bestimmte, aus Strahlenpilzen gewonnene Enzyme (Hydrolasen) bauen PET ab.

Biologisch abbaubare Kunststoffe sind solche, die sich z.B. durch Organismen, Licht, Wärme in kleinere, natürlich vorkommende und ungiftige Abbauprodukte verwandeln.

Zu den biobasierten Stoffen gehören

- **Cellulose** (Zellglas), ein im Holz enthaltenes Polykondensat aus Zuckerbausteinen.
- Cellusoderivate, z.B. Celluloseacetat, Viscose, Cellophan, Zelluloid
- aus Stärke hergestellte **thermoplastische Stärke** (z.B. Folien) die in Zuckerbausteine zerfallen
- **Poly lactide** (PLA), zu Ketten (Polymeren) synthetisierte Milchsäure-Monomeren. Die Milchsäure wird aus Maisstärke gewonnen. Sie kann auch mit Hilfe von Bakterien aus Glucose hergestellt werden.
- durch Bakterien auf Zucker- und Stärkebasis hergestellte **Polyhydroxyfettsäuren** (PHF), z.B. Polyhydroxybutyrat (PHB) und Polyhydroxyvalerat (PHV)..

Aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden biologisch abbaubare Polyester, z.B. „Ecoflex“ von BASF (s.o. „PeePoo-Beutel“). Darüber hinaus die aus fossilen Ausgangsstoffen entstandenen Stoffe

- Polyvinylalkohol
- Polybutylenadipat-terephthalat (PBAT)
- Polybutylensuccinat (PBS)
- Polycaprolactone (PCL)
- Polyglycolid (PGA)

Kompostierbare Kunststoffe verbrauchen in wässrigem Milieu Sauerstoff und es entsteht CO_2 . Bei vollständig biobasierten Stoffen ist die O_2/CO_2 -Bilanz natürlich neutral.

Biopolymere sind z.Z. noch teurer als herkömmliche Kunststoffe was ihre massenhafte Verwendung einschränkt bzw. auf bestimmte Nachfrager reduziert.

Sehr problematisch sind angeblich „biologisch abbaubare“ Materialien die aus einem Verbund von abbaubaren und nicht abbaubaren Stoffen bestehen. Hier verrotten nur die Gerüstelemente zwischen den herkömmlichen Kunststoffen. Dadurch zerfällt z.B. eine Plastiktüte in viele einzelne (unsichtbare) Teilchen und ist damit „optisch entsorgt“. Die von Organismen aber nicht weiter abbaubaren Teilchen bleiben der Natur lange erhalten.

Wie lang braucht es, bis der Müll verschwunden ist?

In der Schule kann ein **Zersetzungsexperiment** durchgeführt werden:

Gleiche Massen herkömmlicher und biologisch abbaubarer, möglichst farblich unterscheidbarer Kunststoffe (z.B. Styropor- und auf Maisstärke basierende Füllstoffe) werden abgewogen, mit Kompostmaterial zu einem Haufen aufgesetzt und nach mehreren Wochen ausgelesen, erneut gewogen und verglichen. Ein zweiter gleicher Haufen aus dem gleichen Kompostmaterial erhält keinen Zusatz. So kann ermittelt werden, welche Wirkung die zugesetzten Materialien auf die Entwicklung des Komposts haben. Idealerweise sollten beide Komposte im gleichen Umfang auf zwei Testfelder ausgebracht werden um die evtl. Ökotoxizität zu prüfen, Dieser Versuch bildet einige Aspekte des Prüfverfahrens zur Europäischen Norm EN 13432 ab.

„Entsorgung“ durch Verbrennung?

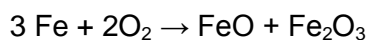
Die Müllverbrennung durch Pyrolyse kann erhebliche Probleme verursachen:

Bei der Verbrennung von Polyurethanschäumen entsteht z.B. hochgiftige Blausäure. PVC verbrennt unvollständig, rußend und setzt dabei Chlor in Form von Salzsäure frei, bei hohen Temperaturen entstehen Dioxine. Der Ruß enthält hochgiftige und krebserregende Aromaten.

Metalle

Beim Rosten verwandeln sich Metalle in Metalloxide. Rostendes Metall entzieht der Atmosphäre also Sauerstoff und wird dadurch schwerer.

Wenn Eisen (Fe) rostet wandelt es sich in FeO und Fe₂O₃ um. Eisen hat eine Molmasse von 55,845 g/mol



Unter der Annahme dass beide Oxide zu gleichen Anteilen entstehen folgt daraus:

167,5 g Eisen (etwa 3 Mol Fe) verbraucht beim Rosten 2 Mol Sauerstoff (=48 Liter)

Ein kurzes Nachwort:

Diese Arbeitshilfe ist kein Rezeptbuch zur Einrichtung einer „Biosphäre“. Sie schneidet nur eine Auswahl der Probleme des Über(Lebens) in geschlossenen Räumen (und Systemen?). Die hier aufgeführten Aspekte - Luft, Wasser, Wärme, Licht, Stoffkreisläufe, Ernährung, Abfall - sind nur ein Teil der in Wirklichkeit viel komplexeren Verhältnisse.

Dennoch hegen wir die Hoffnung, Sie damit anzuregen, das Thema selbst einmal in die Schule zu bringen und mit Ihren Schülerinnen und Schülern weitere Perspektiven und noch mehr (und bessere) Lösungsansätze zu finden.

Lassen Sie sich bitte von den vielen Zahlen und Berechnungen nicht erschlagen. Verstehen Sie sie bitte nur als Anregungen und als Leitfaden, mit Ihren Schülerinnen und Schülern ähnliche Betrachtungen anzustellen.

Schaffen Sie Anlässe die Ihre Schülerinnen und Schüler motivieren, den Dingen fragend, experimentierend und messend selbst auf den Grund zu gehen!

Und schließlich: Bei der Vielzahl von Fakten und Berechnungen können sich trotz sorgfältiger Prüfung Fehler eingeschlichen haben. Dafür möchten wir uns ggf. entschuldigen und würden uns über kritische Rückmeldungen freuen.

Ingo Mennerich, Dezember 2013

Nachtrag:

Wer ist schuld?

Die Agrarwirtschaft? Die Fleischindustrie? Das gesellschaftliche System? Die Verbraucher?

REWE-Sonderangebot am 6. Januar 2014...



Scan: Ingo Mennerich