

► CO₂ im Physikzimmer

Wolfgang Mann

Vorbemerkung

Seit der Überschreitung der magischen 400er-Grenze der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im April dieses Jahres ist der permanente Anstieg wieder ein aktuelles Thema, sei es im Physikzimmer, in den Ballungszentren der Grossstädte oder auch in Zusammenhang mit der globalen Klimaveränderung.

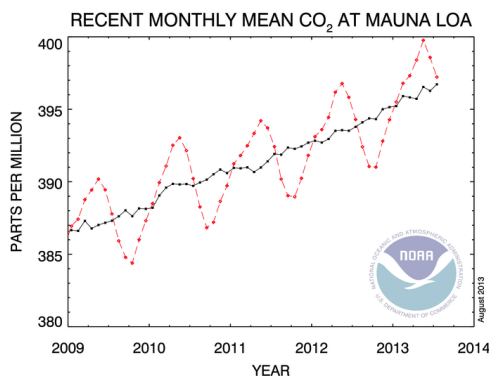


Abbildung 1: Grenzüberschreitung im April 2013 von 400 ppm CO₂ in der Atmosphäre

Das hier vorgestellte und sehr einfache Experiment zum Thema CO₂ kann sowohl im Klassenzimmer (mit grossem Spassfaktor) als auch in einem kleineren Arbeitszimmer als Einzelerperiment durchgeführt werden. Die erfassten Daten bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Auswertung. Einerseits lässt sich die elementare Tatsache nachweisen, dass wir als Lebewesen CO₂ produzieren. Andererseits können aber auch quantitative Betrachtungen bis hin zu komplexen Zusammenhängen wie Stoffwechselrate, Gasgesetze und Muskelwirkungsgrad berechnet werden.

Aufbau

Das Kernstück dieses Experiments ist der CO₂-Sensor von Vernier. Diese Anschaffung ist zwar nicht ganz billig, aber sie lohnt sich allemal. Häufig wird dieser Sensor im Biologieunterricht eingesetzt und ist allenfalls in dieser Sammlung schon vorhanden.



Abbildung 2: Der CO₂ Sensor

Um die Messdaten mit TI-Nspire (Handheld oder Software) weiter verarbeiten zu können, wird entweder ein EasyLink-Interface, ein Go!Link-Interface mit Adapter oder ein Lab Cradle benötigt.



Abbildung 3: EasyLink Interface und Lab Cradle

Persönlich bevorzuge ich den direkten (USB-)Anschluss des CO₂-Sensors an meinem Computer, da ich so die laufende Messung für die ganze Klasse gut sichtbar projizieren kann. Hilfreich hat sich der Einsatz eines Ventilators erwiesen, da die Luft so besser durchmischt wird und dadurch die Graphen der Messwerte sich besser präsentieren.

Durchführung des Experiments

Vor Beginn der Physikstunde wird das Physikzimmer gut gelüftet. Auch hier ist der Ventilator hilfreich.

Unmittelbar danach wird die Messung gestartet. Sobald die Schüler in das Physikzimmer kommen, kann der Anstieg des CO₂-Pegels schon beobachtet werden. Bei laufender Messung erkläre ich den Ablauf des bevorstehenden Experiments.

Das Experiment gliedert sich in drei Phasen:

1. Vorbereitung mit geringer Aktivität
2. Aktive Phase mit grosser Aktivität
3. Auswertung des Experiments mit normaler Aktivität

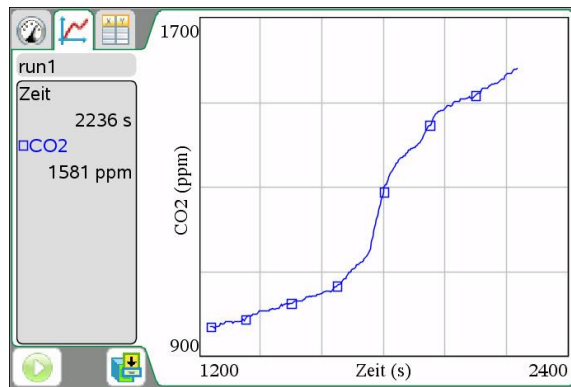


Abbildung 4: Eine typische Messreihe

In der ersten Phase wird das Experiment erklärt. Danach wird eine Ruhephase von etwa 5 Minuten (die Schüler lieben es!) eingeschaltet, in der alle Aktivitäten so gut wie möglich auf null reduziert werden (auch geistige Aktivitäten) sollen.

In der zweiten, aktiven Phase steigen die SuS 30mal auf die Tische, und zwar so schnell wie möglich. Das bringt Bewegung in die Bude und macht den SuS auch Spass. Diese zusätzliche körperliche Aktivität erfordert eine erhöhte Stoffwechselleistung. Dadurch wird vermehrt CO₂ produziert, was im Verlauf der Messung sehr gut sichtbar wird.

In der dritten Phase werden die Resultate der Messung, die Auswertung und die Interpretation besprochen. Das erfordert vermehrte geistige Aktivität, was wiederum eine grössere Stoffwechselleistung bedingt. Zusätzlich ist der Kreislauf noch von der vorangegangenen körperlichen Aktivität angeregt. Beide Effekte zeigen sich in einem stärkeren Anstieg des CO₂-Pegels.

Mögliche Auswertungsschritte

Allein schon der Verlauf der Kurve ist interessant und gibt zu Diskussionen Anlass. Der kontinuierliche Anstieg bei normaler Aktivität, der steile Anstieg bei erhöhter Aktivität und der etwas weniger steile Anstieg des CO₂-Pegels nach der Aktivität können qualitativ interpretiert werden. Das Experiment kann beispielsweise auch mit anderer Schülerzahl, verschiedenen Zimmergrössen und unterschiedlicher Anzahl Tischbesteigungen wiederholen werden.

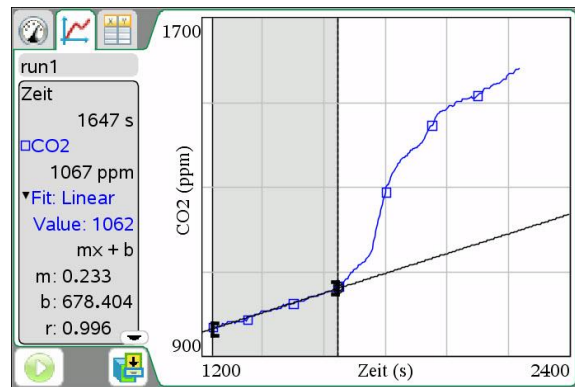


Abbildung 5: Vorbereitungsphase

Als nächste Stufe können die ppm-Werte von CO₂ in Liter, Gramm oder Mol umgerechnet werden.

Aus der Energiebilanz bei der CO₂-Produktion kann die dann die Stoffwechselleistung berechnet werden. Wird dieser Wert der Energieproduktion auf 24 Stunden hochgerechnet, so kommt man auf einen täglichen Energiebedarf von 1500 bis 2000 kcal.

Schliesslich kann noch der steile Anstieg während der aktiven Phase ausgewertet werden.

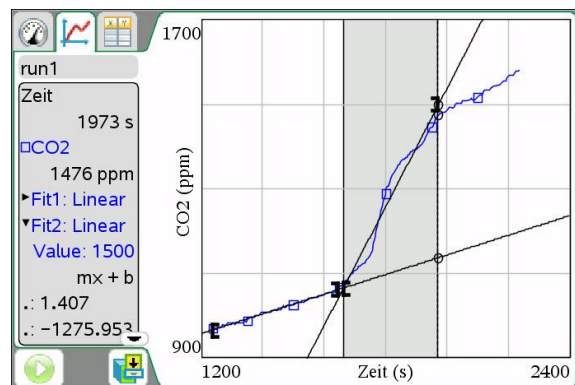


Abbildung 6: Aktive Phase

Aus der Lageenergie und dem aus dem CO₂-Anstieg berechneten Energieumsatz kann der Muskelwirkungsgrad abgeschätzt werden.

Auswertung des Experiments

Für die kommentierten Berechnungen eignet sich die Applikation Notes sehr gut.

Die hier gezeigten Messdaten wurden in meinem 250 Kubikmeter grossen Physikzimmer durchgeführt. Am Experiment nahmen 16 Personen mit einem durchschnittlichen Gewicht von 65 kg teil.

Nebst der Zimmertemperatur, die in Kelvin umgerechnet wird, muss auch noch der Luftdruck gemessen werden.

Der Anstieg in der Vorbereitungsphase mit wenig Aktivität beträgt 0.233 ppm/s Dies bedeutet gemäss Berechnung, dass pro Sekunde 58 ml CO₂ produziert werden.

Die Zustandsgleichung des idealen Gases bietet nun die Möglichkeit, zu berechnen, wie viele Mol CO₂ pro Sekunde produziert werden.

Natürlich kann hier auch mit dem Molvolumen gerechnet werden. Allerdings muss der landläufig bekannte Wert von 22.4 Litern angepasst werden, da dieser bei 0° Celsius und einem Druck von 760 mmHg = 1013.25 hPa gilt. Aus den gemessenen Werten für Temperatur und Druck resultieren 25.5 Liter pro Mol.

Das CO₂ -Experiment in Zahlen

Anzahl Personen: $ap:=16$

Durchschnittsgewicht: $mp:=65 \cdot \text{kg}$

Zimmervolumen: $vz:=250 \cdot \text{m}^3$

1ppm entspricht somit einem Volumen von:

$$vppm:=\frac{vz}{10^6} = 0.00025 \cdot \text{m}^3$$

Zimmertemperatur: $tmpc:=21.2 \cdot \text{°C}$
in °K umgerechnet:

$$tmpk:=tmpCnv(tmpc, \text{°K}) = 294.35 \cdot \text{°K}$$

Luftdruck: $p:=0.961_bar$

Vorbereitungsphase

Anstieg des CO₂ Pegels pro Sekunde:

$$m:=0.233 \cdot \frac{vppm}{_s} = 0.000058 \cdot \frac{\text{m}^3}{_s}$$
$$co2vb:=m = 0.000058 \cdot \frac{\text{m}^3}{_s}$$

Mit diesem Volumen und der Zustandsgleichung des idealen Gases lässt sich die Anzahl Mol CO₂ pro Sekunde berechnen:

$$nco2vb:=\frac{p \cdot co2vb}{_Rc \cdot tmpk} = 0.002287 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Berechnung des Molvolumens:

$$molvol:=\frac{\text{m}^3}{_mol} = \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

Aus vielen Diskussionen mit unseren Chemikern und Biologen, sowie Internetrecherchen geht hervor, dass die freigesetzte Energie mit einem durchschnittlichen Wert von 400 kJ pro Mol CO₂ angenommen werden kann.

Mit der Berechnung ist dann ersichtlich, dass der Energieumsatz pro Person somit 57 Watt beträgt.

Diese Stoffwechselleistung entspricht einem Kalorienbedarf von 1180 kcal pro Tag.

Freigesetzte Energie pro Mol:

$$\text{enmol} = 4 \cdot 10^5 \cdot \frac{\text{J}}{\text{Mol}}$$

Umgesetzte Energie aller Personen pro Sekunde (=Leistung):

$$\text{pow} = \text{enmol} \cdot \text{nco2vb} = 914.915 \cdot \text{W}$$

Stoffwechselleistung pro Person:

$$\text{powp} = \frac{\text{pow}}{\text{ap}} = 57.1822 \cdot \text{W}$$

Kalorienbedarf pro Tag dieser Stoffwechselleistung:

$$\text{powp} \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{day}} = 1180.03 \cdot \frac{\text{kcal}}{\text{day}}$$

In der aktiven Phase steigt die CO₂-Konzentration steiler an, nämlich um 1.4 ppm pro Sekunde.

Analog zur Vorbereitungsphase kann auch hier die Stoffwechselleistung berechnet werden: 5.5 kW.

Die Leistung aus der mechanischen Arbeit beträgt jedoch lediglich 765 W.

Aus diesen beiden Werten resultiert ein Muskelwirkungsgrad von etwa 14 %.

Aktive Phase

Steiler Anstieg der CO₂-Konzentration pro Sekunde:

$$\text{co2aktiv} = 1.4 \cdot \frac{\text{vppm}}{\text{s}} = 0.00035 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Umrechnung in Mol pro Sekunde:

$$\text{nco2aktiv} = \frac{\text{co2aktiv}}{\text{molvol}} = 0.013743 \cdot \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Stoffwechselleistung:

$$\text{pow_akt} = \text{enmol} \cdot \text{nco2aktiv} = 5497.34 \cdot \text{W}$$

Leistung aus der mechanischen Arbeit der Tischbesteigungen:

$$\text{h} = 75 \cdot \text{cm}; \quad \text{time} = 300 \cdot \text{s}$$

$$\text{pow_mech} = \frac{30 \cdot \text{ap} \cdot \text{mp} \cdot \text{g} \cdot \text{h}}{\text{time}}$$

$$= 764.919 \cdot \text{W}$$

Muskelwirkungsgrad:

$$\frac{\text{pow_mech}}{\text{pow_akt}} = 0.139$$

Für diese Auswertung wird Einiges an Vorwissen benötigt. Als hilfreiche Unterstützung mache ich gerne von der Möglichkeit Gebrauch, Einheiten zu verwenden. Auch lassen sich Zwischenresultate sofort in andere, besser verständliche Einheiten umrechnen.

Selbstverständlich können die Anforderung an die Schüler angepasst werden, indem einzelne Zwischenresultate zur Verfügung gestellt werden, z.B. das Molvolumen.

Schlussbemerkung

Die Idee zu diesem Experiment entstand vor ein paar Jahren als sich ein Schüler über Kopfschmerzen nach einer Prüfung beklagte. Im Gespräch sind wir u.a. auf die Konzentrationszunahme von CO₂ als mögliche Ursache gestossen. Da diese Zunahme gemessen werden kann, war die Idee zum Experiment geboren. Der CO₂-Anstieg während einer Prüfung in einem kleinen Raum mit geschlossenen Fenstern kann tatsächlich sehr gross sein. Da sind Spitzenwerte von bis zu 3000 ppm möglich. Die Kopfschmerzen während oder nach einer Prüfung können somit gut begründet werden.

Das Experiment habe ich dann zusätzlich mit einer Phase starker körperlicher Aktivität ergänzt. In dieser Form gehört das Experiment fest zu meinem Repertoire im experimentellen Physikunterricht, da sie SuS die Eigenaktivität, mit der sie die Messergebnisse beeinflussen können, sehr schätzen.

Wolfgang Mann, Aarau (CH)

w.mann@mac.com