

Qualitative Versuche zur Physik des Treibhauseffekts

Tim Ruhe*, Marcel Stachowiak*, Lena von Kolken*

*Experimentelle Physik 5, Technische Universität Dortmund
tim.ruhe@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Der anthropogene Klimawandel und seine Folgen sind nicht zuletzt deswegen eine Herausforderung für Politik und Gesellschaft, weil die zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten der resonanten Absorption von Strahlung nicht trivial sind. Zwar existieren einige Versuche, die sich der Thematik annehmen, indem zum Beispiel die Temperaturänderung in Gasen mit und ohne erhöhten CO₂-Anteil unter Sonneneinstrahlung untersucht wird, jedoch funktionieren diese Versuche in der Praxis oft nur unzureichend. Der vorliegende Beitrag beschreibt eine etwas größer dimensionierte Variante dieser Versuche, die für eine bessere Sichtbarkeit der physikalischen Effekte mit computergesteuerter Messwerterfassung kombiniert werden und an der TU Dortmund in der Ausbildung von Lehrkräften eingesetzt werden soll. Darüber hinaus wird gezeigt, wie im Rahmen der entwickelten Versuche Anknüpfungspunkte an andere naturwissenschaftliche Fächer entstehen, wodurch z.B. die Rolle von Ozeanen oder Wäldern als CO₂-Senken qualitativ erfahrbar wird.

1. Einleitung

Der anthropogene Klimawandel und dessen mittlerweile auch im Alltag beobachtbare Auswirkungen sind eine zunehmende Herausforderung für Wissenschaft, Politik und Gesellschaft [1]. Der herausfordernde Charakter des Problems wird durch die hochgradig nicht-triviale Physik der resonanten Absorption und Emission von Strahlung verstärkt. So ist zum Beispiel nicht auf den ersten Blick einsichtig, weshalb Spurengase wie CO₂ oder Methan, deren Anteil in der Erdatmosphäre etwa 0,04% (CO₂), bzw. etwa 1800 ppb (Methan) beträgt, als Treibhausgase wirken, wohingegen Gase wie Sauerstoff oder Stickstoff, welche in der Erdatmosphäre in viel stärkerem Maße vorhanden sind, dies nicht tun.

Naturphänomene und deren Zusammenhänge sind ebenso im Perspektivrahmen Sachunterricht verankert, wie das Verhältnis von Mensch und Natur und die Frage, wie dieses Verhältnis auf nachhaltige Weise gestaltet werden kann. Darüber hinaus sollen die SuS bereits in der Primarstufe die Naturwissenschaften als Grundlage für einen verantwortungsvollen Umgang mit der Natur erkennen [2].

Da dem anthropogenen Treibhauseffekt in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle zukommt, müssen LehramtskandidatInnen nicht nur für die Sekundarstufen I und II, sondern auch für den Sachunterricht in den physikalischen Grundlagen des Klimawandels geschult werden, um die Inhalte sowohl

physikalisch korrekt als auch altersgerecht vermitteln zu können. Die zugrunde liegenden Prinzipien können jedoch ohne Kenntnisse der Quantenmechanik nicht im Detail verstanden werden. Quantenmechanik allerdings ist nicht Teil der Ausbildung von Lehrerinnen und Lehrern im Sachunterricht. Aus diesem Grund müssen andere Ansätze gewählt werden, um die Physik des Treibhauseffekts zu vermitteln.

Qualitative Versuche, in Kombination mit Erklärungen auf Basis des Bohrschen Atommodells, bieten an dieser Stelle einen niedrigschwelligen Zugang zur Thematik, da auf diese Weise das physikalische Wissen konkretisiert werden kann. Ebenso kann das Phänomen der globalen Erwärmung im Rahmen eines Versuches klar und überzeugend dargestellt und physikalische Gesetzmäßigkeiten direkt erfahrbar gemacht werden. Darüber hinaus können im Rahmen eines Versuches Vorstellungen – insbesondere auch Fehlvorstellungen – überprüft und nachhaltige Eindrücke vermittelt werden [3].

Obwohl einige Versuche zum Treibhauseffekt und zur Auswirkung einer erhöhten CO₂-Konzentration auf die Umgebungstemperatur existieren, mussten die Autoren feststellen, dass diese in der Praxis oft nur unzureichend funktionieren.

Die zuvor genannten Versuche bestehen in der Regel aus zwei Behältern, z.B. Marmeladengläsern. Der Inhalt eines dieser Behälter weist eine erhöhte CO₂-Konzentration auf. Nachdem die Behälter

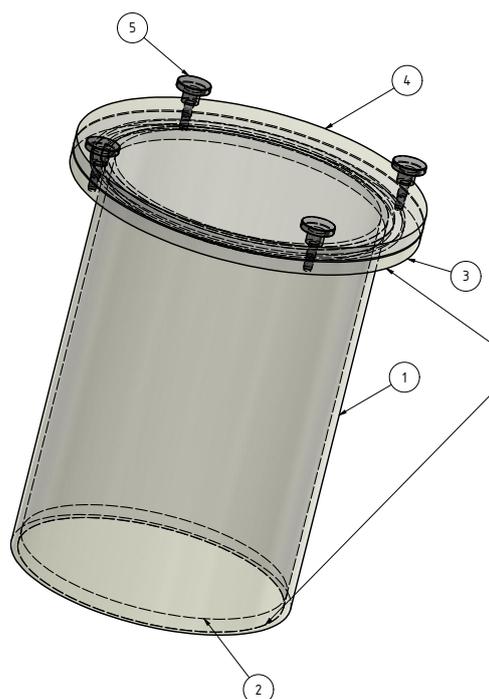


Abb.1: Skizze des verwendeten Behälters.

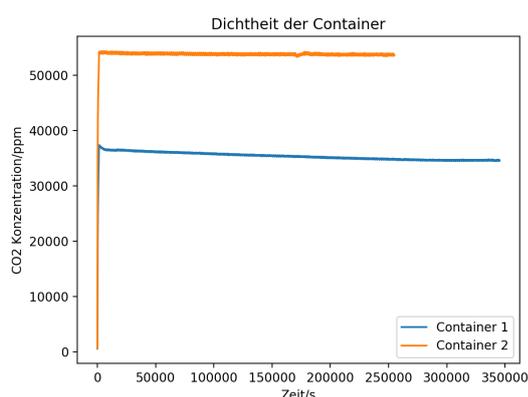


Abb.2: Messungen mit erhöhter CO₂-Konzentration, aber ohne zusätzliche Einflussfaktoren zur Überprüfung der Dichtheit der verwendeten Behälter.

Sonnenlicht oder Wärmestrahlung ausgesetzt wurden, soll eine Temperaturdifferenz zwischen beiden Behältern beobachtet werden, welche die Treibhauswirkung von CO₂ illustrieren soll. Leider war bei diesen eher kleinen Aufbauten die erreichte Temperaturdifferenz nicht oder nur bedingt aussagekräftig.

Durch die einfache Natur der Versuche konnten die einzelnen experimentellen Parameter, insbesondere die CO₂-Konzentration, nicht bestimmt werden, wodurch sich eine dezidierte Fehlersuche schwierig gestaltet. Da das Abdichten der Behälter häufig mit Knetmasse oder vergleichbaren Materialien durchgeführt werden soll, kommen mögliche undichte Stellen als weitere mögliche und – zumindest im Rahmen

dieser einfachen Aufbauten – nicht zu kontrollierende Fehlerquelle hinzu.

Dieses Papier stellt Versuche vor, die an den oben genannten Versuchsaufbau angelehnt Behälter mit größeren Volumina verwenden. Darüber hinaus werden moderne Methoden der elektronischen Messwertfassung verwendet, um die experimentellen Parameter in Echtzeit zu überwachen. Die Versuche wurde an der TU Dortmund für den Einsatz in der Lehramtsausbildung entwickelt, konnten jedoch aufgrund der COVID-19 Pandemie noch nicht in Seminaren eingesetzt und erprobt werden.

Das vorliegende Papier ist folgendermaßen gegliedert: Abschnitt 2 beschreibt den Aufbau der Versuche inklusive der verwendeten Messinstrumente. In Abschnitt 3 werden ausgewählte Messreihen vorgestellt und diskutiert. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick beschließen das Papier in Abschnitt 4.

2. Versuchsaufbau und verwendete Geräte

Abbildung 1 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau. Das verwendete Plexiglasrohr hat eine Höhe von 30 cm und einen Durchmesser von 20 cm (außen) bzw. 19 cm (innen). Zwischen Deckel (4) und Ring (3) befindet sich eine zusätzliche Gummidichtung (nicht Teil der Skizze). Zur Befestigung der Messgeräte, insbesondere von Temperatur- und CO₂-Sensor, wurde der Deckel mit drei Bohrungen versehen. Der Durchmesser der Bohrungen wurde an die verwendeten CO₂-Sensoren angepasst.

Als CO₂-Sensor wurde der *Wireless CO₂-Sensor PS3208*¹ der Firma pasco verwendet, wohingegen für Temperaturmessungen der *Wireless Temperature Sensor PS3201*² (ebenfalls von der Firma pasco) benutzt wurde.

Die Messergebnisse wurden mit den Softwarepaketen Capstone [4] und SparVue [5] automatisch erhoben und im Anschluss separat ausgewertet. Allerdings kann der gewünschte Lerneffekt selbstverständlich auch mit anderen passenden Messgeräten und/oder anderer Software erzielt werden.

Das benötigte Kohlendioxid wurde über die Reaktion von Zitronensäure (C₆H₈O₇) mit Natriumhydrogencarbonat (NaHCO₃, Natron) in einem separaten Erlenmeyerkolben erzeugt und über einen Schlauch in den Container geleitet. Zwischen Erlenmeyerkolben und Container wurde zur besseren Unterbrechung der CO₂-Zufuhr ein Hahn installiert. Nach Erreichen einer bestimmten CO₂-Konzentration, respektive nach Ablauf einer bestimmten Zeit (typischerweise 5 bis 10 Minuten) wurde die CO₂-Zufuhr durch Schließen des Hahnes gestoppt und der Schlauch vom Erlenmeyerkolben getrennt. Das offene Schlauchende

¹ <https://www.pasco.com/products/sensors/wireless/ps-3208>

² <https://www.pasco.com/products/sensors/wireless/ps-3201>

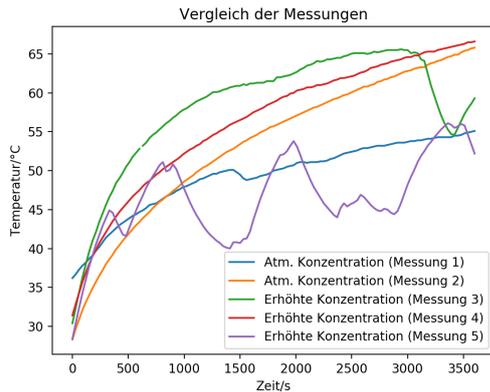


Abb.3: Vergleich von Messungen mit atmosphärischer (Messungen 1 und 2) und erhöhter CO_2 -Konzentration (Messungen 3 bis 5).

wurde zusätzlich mit einem passenden Stopfen verschlossen.

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der CO_2 -Konzentration ohne weitere Einflussfaktoren als Funktion der Zeit. Der analysierte Zeitraum beträgt dabei etwa 97 h (Container 1) bzw. etwa 69 h (Container 2). Man erkennt deutlich, dass die CO_2 -Konzentration, zwar mit der Zeit abnimmt, die Abnahme über den Zeitraum einer typischen Messung zur Temperaturerhöhung bei erhöhtem CO_2 -Gehalt (etwa 1 bis maximal 2 h), aber klein ist, und der CO_2 -Gehalt über diesen Zeitraum somit in guter Näherung als konstant angenommen werden kann. Bei längeren Messintervallen können die Werte aus Abb. 2 als Referenzwerte benutzt werden.

3. Ausgewählte Ergebnisse

Im Rahmen des vorliegenden Papiers sollen die Ergebnisse dreier separat durchgeführter Analysen vorgestellt und diskutiert werden. Die erste Messung befasst sich mit der tatsächlichen Messbarkeit der zu veranschaulichenden Effekte (Temperaturerhöhung bei erhöhter CO_2 -Konzentration) [6], während die zweite Analyse die Möglichkeit der Nutzung des Versuchsaufbaus zur Illustration der Rolle von Ozeanen als globalen CO_2 -Senken verdeutlicht.

Eine dritte Analyse beschäftigt sich mit dem fächerübergreifenden Einsatz des Versuchsaufbaus und untersucht den Einfluss von Grünpflanzen auf den CO_2 -Gehalt sowie die Sichtbarmachung der Tag-Nacht-Schwankungen des CO_2 -Gehalts, welche durch die Pflanzenatmung hervorgerufen werden [7].

3.1. Messung der Temperaturerhöhung bei erhöhter CO_2 -Konzentration

Abbildung 3 zeigt den Vergleich zweier Messungen mit atmosphärischer- mit drei Messungen mit erhöhter CO_2 -Konzentration. Um eine möglichst gute Absorption der Sonnenstrahlung und deren Umwandlung in Infrarot-Strahlung zu gewährleisten, wurden die Innenseiten des Containers zu etwa einem Drittel

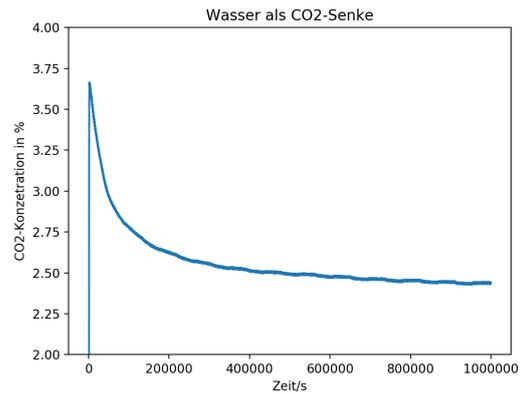


Abb.4: CO_2 -Konzentration als Funktion der Zeit mit Wasser im Behälter.

mit einer schwarzen Gummimatte abgedeckt. Während der Messungen wurde der Container seitlich gelagert um eine möglichst große Fläche der Sonneneinstrahlung auszusetzen.

Die Messungen bei atmosphärischer CO_2 -Konzentration (Messungen 1 und 2) sind in blau und in orange dargestellt. Messwerte die bei einem erhöhten CO_2 -Gehalt aufgenommen wurden (Messungen 3, 4 und 5) sind in grün, rot und violett dargestellt. In allen Fällen wurden die Daten über einen Zeitraum von etwa einer Stunde aufgenommen. Man erkennt deutlich, dass bei Messungen mit einem erhöhten CO_2 -Gehalt höhere Endtemperaturen erreicht werden. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die Temperatur bei erhöhten CO_2 -Konzentrationen zu Beginn der Messungen stärker ansteigt. Der kurzfristige Abfall der Temperatur in Messung 3 kann durch eine externe Störung erklärt werden, durch die das Messgerät kurzzeitig aus der Halterung gerissen wurde. Im Gegensatz zu den Messungen 1 bis 4 wurde Messung 5 bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen aufgenommen. Der Einfluss vorbeiziehender Wolken auf die Messdaten ist als kurzfristiger Temperaturabfall im anschließendem Anstieg deutlich erkennbar. Die Messunsicherheit des Temperatursensors beträgt $\pm 0,5^\circ\text{C}$ [8] und ist damit deutlich kleiner als die beobachteten Temperaturunterschiede.

3.2. Ozeane als CO_2 -Senken

Für die in Abb. 4 gezeigte Messreihe wurde vor der CO_2 -Zufuhr Wasser in den Plexiglas Container gegeben, um die Aufnahme von CO_2 durch die Ozeane und deren Rolle als globale Kohlenstoffsenken zu verdeutlichen. Die Messung wurde über einen Zeitraum von etwa 10 Tagen durchgeführt.

Man erkennt, dass nach einem steilen, durch die Zufuhr von CO_2 verursachten Anstieg die CO_2 -Konzentration bis zur Zeit $t = 10^5$ s zunächst stark abfällt. Für größere Zeiten ist der Abfall der Konzentration zwar geringer aber ebenfalls deutlich zu erkennen. Daraus lässt sich schließen, dass die Rolle von Ozeanen als Kohlenstoffsenke durch diesen Versuch

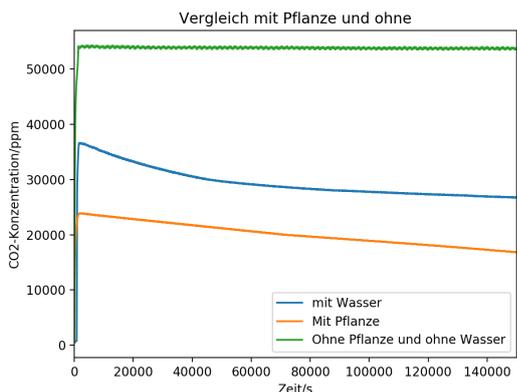


Abb.5: Vergleich der Messungen mit Grünpflanzen (orange) zu den Messungen mit Wasser (blau) und ohne äußere Einflüsse (grün).

qualitativ gezeigt werden kann. Ebenso lässt sich folgern, dass eine Messzeit von 48 bis 72 Stunden ausreichend ist, um den gewünschten Effekt sichtbar zu machen.

3.3 Pflanzenatmung und Rolle von Grünpflanzen als CO₂-Senke

Neben Ozeanen sind auch Grünpflanzen wichtige Kohlenstoffsenken. Um die Rolle von Grünpflanzen beim Abbau von CO₂ in der Erdatmosphäre zu verdeutlichen, wurden zwei Pflanzen der Art *Chlorophytum Comosum* (Grünlilie) in die Container eingebracht. Für die Dauer des Versuches wurden die Pflanzen ohne Unterbrechung mit Speziallampen beleuchtet, um einen stetigen Abbau von CO₂ durch Photosynthese zu gewährleisten. Um weitere äußere Einflüsse, insbesondere Tageslicht, weitgehend abzuschirmen, wurde der gesamte Aufbau in einem fensterlosen und für die Dauer des Versuches bis auf die Speziallampen abgedunkelten Raum untergebracht.

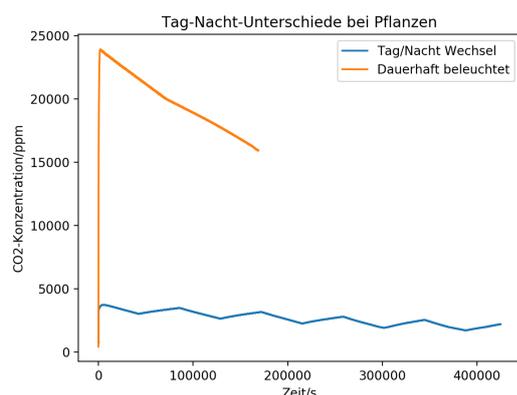


Abb.6: Vergleich des CO₂-Gehalts als Funktion der Zeit mit Grünpflanzen im Behälter bei kontinuierlicher Beleuchtung (orange) und bei künstlichem Tag-Nacht-Rhythmus (blau).

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentration im Behälter als Funktion der Zeit. Die Messung ohne zusätzliche Komponenten (leerer Behälter) ist grün dargestellt, wohingegen die

Messungen mit Wasser, bzw. einer Pflanze, blau respektive orange dargestellt sind. Man erkennt, dass bei der Anwesenheit einer Pflanze im Behälter die CO₂-Konzentration gegenüber einem Behälter ohne Pflanze abnimmt. Dieses Verhalten kann auf die Atmungsaktivität der Pflanze und die dadurch verursachte Aufnahme von CO₂ zurückgeführt werden. In der Praxis sollte bei der Durchführung der Versuche darauf geachtet werden, dass die CO₂-Konzentration Werte von etwa 2 bis 3% nicht übersteigt, da Pflanzen bei zu hohen CO₂-Konzentrationen unter Umständen ihren Optimalitätsbereich verlassen und die CO₂-Aufnahme einstellen.

Im Vergleich der Graphen für Wasser und Pflanzen wird deutlich, dass bei Anwesenheit einer Pflanze der Abfall der CO₂-Konzentration deutlich linearer verläuft.

Neben den Versuchen zur Rolle von Pflanzen als Kohlenstoffsenken können mit dem Aufbau in einem fächerübergreifenden Ansatz auch Versuche zum Tag-Nacht-Rhythmus der Pflanzenatmung durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden die Pflanzen einem Wechsel von Beleuchtung und Dunkelheit im 12 Stunden Rhythmus ausgesetzt.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abb. 6 gezeigt. Ergebnisse, die bei einer dauerhaften Beleuchtung erzielt wurden, sind orange dargestellt, wohingegen Ergebnisse, die mit einem künstlichen Tag-Nacht-Rhythmus gewonnen wurden blau dargestellt sind. Die periodischen Schwankungen des blauen Graphen sind deutlich erkennbar. Man erkennt darüber hinaus die stetige, jedoch im Vergleich zur dauerhaften Beleuchtung deutlich langsamere, Abnahme der CO₂-Konzentration. Die unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen sind eine Folge der während der Versuche gewonnenen Erkenntnisse. Um möglichst deutliche Effekte zu erzielen wurden in einer ersten Messreihe zunächst relativ hohe CO₂-Konzentrationen gewählt. Es zeigte sich allerdings, die Pflanzen bei zu hohen CO₂-Konzentrationen den Optimalitätsbereich verlassen und Zellatmung und CO₂-Aufnahme einstellen. Aus diesem Grund wurde in folgenden Messungen eine geringere Anfangskonzentration gewählt.

Neben der Veranschaulichung der Zellatmung, können die Ergebnisse dieses Versuchs auch verwendet werden, um die saisonal schwankende CO₂-Konzentration in der Erdatmosphäre (Keeling Kurve) zu besprechen. Die periodischen Schwankungen des atmosphärischen CO₂-Gehaltes werden zum großen Teil auf das verstärkte Pflanzenwachstum auf der Nordhalbkugel im Nordsummer zurückgeführt [9]. Da Messungen über einen Zeitraum von mehreren Monaten in Hochschulseminaren und im Schulunterricht nicht praktikabel sind, können die grundlegenden Zusammenhänge auf diese Weise in zeitlich komprimierter Form erfahrbar gemacht werden.

Die Messunsicherheit des CO₂-Sensors wird vom Hersteller mit ±5% (1000 bis 10.000 ppm) bzw.

$\pm 10\%$ (10.000 bis 50.000 ppm) angegeben [10]. Aufgrund der in der Regel starken Abweichungen der Anfangs- und Endkonzentration, lassen sich lediglich die periodischen Schwankungen der CO₂-Konzentration im Tag-Nacht-Rhythmus potentiell als Folge der Messunsicherheiten erklären. Da mit den vorgestellten Versuchen lediglich qualitative Zusammenhänge veranschaulicht werden sollen, wird auf einer tiefergehenden Diskussion der Unsicherheiten verzichtet. Im Falle einer *quantitativen* Untersuchung dieses Zusammenhangs, sollte ein möglicher Einfluss der Messunsicherheit allerdings berücksichtigt werden.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der anthropogene Klimawandel ist aufgrund der komplexen physikalischen Zusammenhänge nicht nur eine Herausforderung für die Gesellschaft, sondern auch für die Physikdidaktik. In diesem Papier wurden Ansätze vorgestellt, wie die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der resonanten Absorption und Emission von Strahlung auch ohne Kenntnisse der quantenmechanischen Zusammenhänge in qualitativen Versuchen vermittelt werden können. Die Versuche wurden für den Einsatz in der Lehrerbildung (Sachunterricht Primarstufe) konzipiert, können aber aufgrund ihrer qualitativen Natur auch im Schulunterricht eingesetzt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass durch die angestrebten Zusammenhänge der Temperaturerhöhung bei erhöhter CO₂-Konzentration sowie die Rolle von Ozeanen und Pflanzen als globale Kohlenstoffsinken verdeutlicht werden können. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass auch die Tag-Nacht-Schwankungen der Pflanzenatmung mit Hilfe des diskutierten Versuchsaufbaus untersucht werden kann. Aufgrund ihres interdisziplinären Charakters eignen sich die Versuche auch für den Einsatz in fächerübergreifenden Seminaren, z.B. mit der Biologie oder der Geographie.

Aufgrund der COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Einschränkungen konnten die Versuche noch nicht bzw. nur in sehr begrenztem Ausmaß in den Seminaren eingesetzt werden. Dies soll nach Möglichkeit im Wintersemester 2021/22 nachgeholt werden.

Darüber hinaus sollen weitere, auf dem gleichen Aufbau basierende, Versuche, z.B. zur Rolle der Albedo oder zur Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von CO₂ in Wasser, entwickelt werden. Mit einem geeigneten Messgerät, z.B. einem pH-Meter kann darüber hinaus gezeigt werden, dass die Ozeane durch die bei der Aufnahme von CO₂ entstehende Kohlensäure versauern. Die Eignung solcher Messungen für die Lehrerbildung soll in weiterführenden Arbeiten ebenfalls untersucht werden.

5. Literatur

- [1] Latif, Mojib (2010): Die Herausforderung globaler Klimawandel. In: Perspektiven der Wirtschaftspolitik 11 (2010), S. 4-12.
- [2] Homepage der Gesellschaft für die Didaktik des Sachunterrichts (GDSU): http://www.gdsu.de/wb/media/upload/pr_160212a.pdf (Stand 05/2021)
- [3] Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Fischer, Hans E.: Physikdidaktik. 4. Auflage, Berlin: Springer Spektrum, 2020, S. 264-270.
- [4] Homepage der Firma pasco: <https://www.pasco.com/products/software/caps-tone> (Stand 05/2021)
- [5] Homepage der Firma pasco: <https://www.pasco.com/products/software/sparkvue> (Stand 05/2021)
- [6] Stachowiak, Marcel (2019): Kalibrationsmessungen an Plexiglascontainern zur Vorbereitung von Versuchen zum Treibhauseffekt. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Didaktik der Physik, Bachelorarbeit (unveröffentlicht), 2019.
- [7] Von Kolken, Lena (2021): Pflanzen als CO₂-Senken. Dortmund: Technische Universität Dortmund, Didaktik der Physik, Masterarbeit (unveröffentlicht), 2021.
- [8] Wireless Temperature Reference Guide: https://d2n0lz049icia2.cloudfront.net/product_document/Wireless-Temperature-Sensor-Manual-PS-3201.pdf (Stand 05/21)
- [9] Keeling, Charles D. et al. (1976): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. In: Tellus 28 (6) (1976), S. 538-551.
- [10] Wireless CO₂ Sensor Reference Guide: https://d2n0lz049icia2.cloudfront.net/product_document/Wireless-CO2-Sensor-Manual-PS-3208.pdf (Stand 05/21)