

doi.org/10.1002/ckon.202200042

# Die Bestimmung von Kohlenstoffdioxid bei der Cola-mentos-Fontäne

Katrin Sommer,<sup>\*[a]</sup> Dorian Thiele,<sup>\*[b]</sup> Philipp Joch,<sup>\*[c]</sup> Alexander Schäfer<sup>\*[d]</sup> und Stefan Zellmer<sup>\*[a]</sup>

**Zusammenfassung:** Die Cola-mentos<sup>®</sup>-Fontäne ist ein faszinierendes Showexperiment, bei dem durch Einwurf eines Kaubonbons in eine frisch geöffnete Cola-Flasche eine Fontäne aus Kohlenstoffdioxid und mitgerissener Flüssigkeit entweicht. Es soll untersucht werden, ob das freiwerdende Kohlenstoffdioxid mit klassischen Fachmethoden quantifiziert werden kann. Dazu wird Coca-Cola<sup>®</sup> light sowohl mittels pneumatischen Auffangens als auch durch gravimetrische Bestimmung des gefällteten Carbonats untersucht. Die Methoden erweisen sich als zuverlässig. Der Vergleich verschiedener Cola-Sorten unter Nutzung des pneumatischen Verfahrens offenbart, dass bei Coca-Cola<sup>®</sup> light mehr Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird als bei Coca-Cola<sup>®</sup> classic.

**Stichworte:** Gravimetrie · Volumetrie · Cola-mentos-Fontäne · quantitative Bestimmung · Variablenkontrollstrategie

## Determination of carbon dioxide from a coke-mentos-fountain

**Abstract:** The coke-mentos<sup>®</sup>-fountain is a fascinating show-experiment: an enormous fountain of carbon dioxide and liquid rapidly escapes out of a freshly opened bottle of coke after a mentos<sup>®</sup> was added. The aim of this study is to investigate whether it is possible to validly quantify the amount of released carbon dioxide using two different classic chemical methods. Therefore coke light is investigated using pneumatic collection and gravimetric analysis of precipitated carbonate. The methods show themselves as very reliable. The comparison of different cola varieties using the pneumatic method shows that more carbon dioxide is released in Coca-Cola<sup>®</sup> light than in Coca-Cola<sup>®</sup> classic.

**Keywords:** gravimetric determination · volumetric determination · coke-mentos-fountain · quantitative determination · control of variables strategy

## 1. Einleitung

Gibt man ein mentos<sup>®</sup>-Kaubonbon (im Folgenden genannt: mentos) in eine Coca-Cola<sup>®</sup> light-Flasche, kommt es zu einem eruptionsartigen Ausstoßen von Kohlenstoffdioxid. Das zeigt sich in einer spektakulären Fontäne (Abb. 1), da das schnell entweichende Kohlenstoffdioxid Teile der Flüssigkeit mitreißt. Der Versuch wird aus diesem Grund auch Cola-mentos-Geysir genannt. Aufgrund des spektakulären Verlaufs ist dieser Versuch sicher ein klassischer Showversuch – auch im

schulischen Kontext, z. B. bei Schulfesten oder einem Tag der offenen Tür. Allerdings erlaubt der Versuch auch, Lernende mit dem Konzept der Variablenkontrolle, einem wesentlichen Element bei der Versuchsplanung, vertraut zu machen. Soll beispielsweise untersucht werden, ob die Cola-Sorte einen Einfluss auf die Fontäne hat, so wird die unabhängige Variable (Cola-Sorte) verändert, aber alle anderen Variablen (z. B. Menge der Cola, Temperatur der Cola, Art und Anzahl der mentos) bleiben gleich. Es wird dann die abhängige Variable bestimmt. Die abhängige Variable könnte als Höhe der Fontäne in cm gemessen oder als Stoffmenge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid bestimmt werden. Allerdings existiert bislang keine zuverlässige Messmethode, um die Stoffmenge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid bei der Cola-mentos-Fontäne zu bestimmen. Der vorliegende Beitrag möchte sich dieser Herausforderung stellen.

## 2. Stand der Forschung und Zielsetzung

In der Literatur werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, die Fontäne quantitativ zu erfassen. Gängig ist die Bestimmung der Höhe der Fontäne mittels eines Zollstocks. Während bei Eichler et al. [1] die Fontänenhöhe auf dem Zollstock händisch markiert werden soll, schlagen Coffey [2], Schäfer [3] und Kuntzleman et al. [4] vor, den Versuch zu filmen und durch Betrachtung der Einzelbilder die genaue Höhe der Fontäne zu ermitteln. Eine weitere Möglichkeit, den Cola-mentos-Versuch quantitativ zu erfassen, ist die Bestimmung der Massendifferenz der Flasche vor und nach dem Versuch [vgl. 2]. Dabei muss zum einen die Masse der Kaubonbons und zum anderen das Volumen der Cola, das bei der Fontäne mit nach außen gerissen wurde, mitberücksichtigt

[a] K. Sommer, S. Zellmer  
Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Didaktik der Chemie  
Universitätsstraße 150  
44780 Bochum  
\* E-Mail: katrin.sommer@rub.de  
stefan.zellmer@rub.de

[b] D. Thiele  
Miltenyi Biotec B.V. & Co. KG  
Friedrich-Ebert-Straße 68  
51429 Bergisch Gladbach  
\* E-Mail: dorian.t@gmx.de

[c] P. Joch  
Frida-Levy-Gesamtschule, Städtische Gesamtschule  
Varnhorststr. 2  
45127 Essen  
\* E-Mail: philippjoch@web.de

[d] A. Schäfer  
Märkisches Gymnasium Schwelm  
Präsidentenstraße 1  
58332 Schwelm  
\* E-Mail: sc@mgs-mail.de

werden [3]. Diese beiden Verfahren erlauben Hinweise auf den Anteil an freigesetztem Kohlenstoffdioxid, aber keine exakten Aussagen.

Huber & Massari [5] schlagen einen Versuchsaufbau (controlled soda geyser apparatus) vor, mit dem das Volumen an Kohlenstoffdioxid in der Fontäne erstmals quantifiziert werden kann. Das Prinzip sieht vor, dass das freigesetzte Gasvolumen der Fontäne das Wasser aus einer Gaswaschflasche verdrängt und dieses Wasservolumen gemessen wird. Dieses



*Katrin Sommer, geb. 1971, hat seit 2004 den Lehrstuhl für Didaktik der Chemie an der Ruhr-Universität Bochum inne. Zugleich obliegt ihr die Leitung des MINT-Bereichs des Alfred Krupp-Schülerlabors der Wissenschaften. Ihre Forschungsschwerpunkte umfassen Lehren und Lernen mit Modellexperimenten, Konzepte für informelles Lernen sowie Validierung von Schulexperimenten.*



*Doriano Thiele, geb. 1995, absolvierte nach seinem Abitur im Jahr 2014 eine Ausbildung zum Chemielaboranten (2016-2019) an der Ruhr-Universität Bochum, welche er im Juni 2019 vorzeitig beendete. Von 2019 bis 2023 war er technischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum und Ausbildungsleiter der Chemielaborant:innen-Ausbildung (2020-2023). Seit Juli 2023 ist er für Miltenyi Biotec tätig.*



*Philipp Joch, geb. 1990, studierte an der Ruhr-Universität Bochum zunächst Biochemie (2010-2014) und wechselte dann in den Studiengang „Master of Education“ mit den Fächern Biologie und Chemie (Abschluss 2019). Aktuell ist er Studienrat an der Frida-Levy-Gesamtschule in Essen.*



*Alexander Schäfer, geb. 1987, studierte an der Ruhr-Universität Bochum Biologie, Chemie und Geographie mit dem Abschluss „Master of Education“ (2012). 2012-2014 absolvierte er das Referendariat am Märkischen Gymnasium in Schwelm und ist seitdem dort als Lehrperson tätig. Er ist darüber hinaus Fortbildungs- und MINT-Beauftragter an seiner Schule.*



*Stefan Zellmer, geb. 1995, studierte von 2013 bis 2018 Chemie und Mathematik für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen an der Ruhr-Universität Bochum und schloss es 2018 mit dem Master of Education ab. Seit 2018 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Didaktik der Chemie der Ruhr-Universität Bochum und beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation mit dem Einfluss eines außerschulischen, experimentellen Lernsettings auf die Einstellung zu den Naturwissenschaften.*



**Abb. 1:** Klassische Cola-mentos-Fontäne.

entspricht der Menge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid. Es bleibt jedoch unberücksichtigt, dass durch die Fontäne auch ein erheblicher Anteil an Flüssigkeit aus der Getränkeflasche transportiert wird. Insofern wird von den Autoren zu Recht darauf hingewiesen, dass es sich eher um einen halbquantitativen Zugang zur Quantifizierung des Geysirs handelt. Daraus lassen sich zwei Schlussfolgerungen ableiten - zum einen muss für die Quantifizierung sichergestellt sein, dass die Fontäne in einem geschlossenen System ablaufen und das freiwerdende Kohlenstoffdioxid aufgefangen werden kann. Dafür bedarf es einer entsprechenden Apparatur. Zum anderen sind Fachmethoden zur Bestimmung von Kohlenstoffdioxid gefragt. In der quantitativen Analyse ist die Fällung von Kohlenstoffdioxid als Carbonat und dessen gravimetrische Bestimmung etabliert [6]. Blickt man in die experimentelle Schulchemie, so steht mit dem pneumatischen Auffangen zur Bestimmung von Gasvolumina ebenfalls eine gängige Methode zur Verfügung [7]. Daher lautet die Frage: *Lässt sich das bei der Cola-mentos-Fontäne freigesetzte Kohlenstoffdioxid a) durch die gravimetrische Bestimmung als gefälltes Carbonat bzw. b) durch das pneumatische Auffangen zuverlässig bestimmen?*

### 3. Experimentelles Vorgehen

#### 3.1 Teil I: Auffangen des freigesetzten Kohlenstoffdioxids in einer geschlossenen Apparatur

Ziel ist es, das Kohlenstoffdioxid der Cola-mentos-Fontäne reproduzierbar aufzufangen. Dazu wird die Cola-mentos-Fontäne in einer geschlossenen Apparatur durchgeführt (Abb. 2). Die sogenannte Einwurf-Apparatur ist über einen Silikon-schlauch luftdicht mit einem Gas-Auffangbeutel (= Urinbeutel aus der Apotheke, ca. 4 €/Stk.) verbunden, in dem das freiwerdende Gas aufgefangen wird.

Herzstück des Versuchsaufbaus ist die Einwurf-Apparatur (Abb. 3; Hinweis: detaillierter Bauplan mit Beschriftung im Anhang) mit folgenden Bauteilen:

- Der mentos-Halter ermöglicht, das mentos bis zum Start der Reaktion oberhalb der Flüssigkeit zu halten. [8]
- Das Rückschlagventil stellt sicher, dass während der Reaktion kein Gas aus dem Gas-Auffangbeutel zurück in die Flasche entweicht.



Abb. 2: Versuchsaufbau – bestehend aus Einwurf-Apparatur, Silikon-schlauch und Gas-Auffangbeutel.



Abb. 3: Einwurf-Apparatur – mit mentos präpariert.

- Nach der festgelegten Untersuchungsdauer von einer Minute wird der Absperrhahn geschlossen und so vergleichbare Versuchsbedingungen geschaffen. Dann gelangt kein weiteres Gas aus der Flasche in den Gas-Auffangbeutel.

*Durchführung:*

- Unmittelbar vor Versuchsbeginn wird die Temperatur des Getränks gemessen. Würde die Temperatur durch z.B. das Eintauchen eines Digitalthermometers in dem geöffneten Getränk gemessen, kann es zum Ausperlen von Kohlenstoffdioxid und damit zu einer Verzerrung der Messergebnisse kommen. Daher wird die Messung mit einem Infrarotthermometer (ca. 50 €, Elektronikfachhandel) empfohlen, bei der die Getränke-Flasche noch geschlossen bleibt.
- Der Versuch wird entsprechend Abbildung 2 aufgebaut.
- Das mentos wird in die Einwurf-Apparatur gelegt und überprüft, ob es fest genug sitzt. Die präparierte Einwurf-Apparatur wird auf die Getränke-Flasche gedreht, sodass eine dichte Verbindung geschaffen wird.
- Die Reaktion wird zum gewünschten Zeitpunkt durch leichtes Schlagen der Flasche auf die Arbeitsplatte ausgelöst.
- Die Reaktionsdauer beträgt 1 Minute. Vorversuche haben gezeigt, dass so gewährleistet ist, dass der Druckstoß vorbei und der durch die Fontäne gebildete Schaum sich wieder zurückgebildet hat.
- Der Absperrhahn der Einwurf-Apparatur wird geschlossen, sodass kein Gas mehr in den Gas-Auffangbeutel strömen kann.
- Nach der Reaktion wird das Ventil des Gas-Auffangbeutels geschlossen und der Gas-Auffangbeutel vom Silikon-schlauch getrennt. Aufgrund der Diffusionsfähigkeit von Kohlenstoffdioxid durch den Kunststoff des Beutels sollte das Gas zügig verarbeitet werden. Innerhalb weniger Minuten ist allerdings kein Gasverlust zu erwarten.
- Beim Auffangen des Gases gelangt auch von der Fontäne mitgerissene Flüssigkeit in den Gas-Auffangbeutel. Das Gas gilt es von der Flüssigkeit abzutrennen. Dazu wird der gefüllte Gas-Auffangbeutel mit einer möglichst kurzen Schlauchverbindung mit einem zweiten, leeren Gas-Auffangbeutel verbunden und das Gas ausgedrückt (Abb. 4). Das Gas entweicht in den zweiten Gas-Auffangbeutel. Das Ausquetschen wird so lange fortgesetzt, bis die Flüssigkeit die Schlauchverbindung zwischen den beiden Gas-Auffangbeuteln blasenfrei erreicht. Da während dieses Schritts kein Druck entsteht, ist nicht davon auszugehen, dass sich das Kohlenstoffdioxid wieder in der Cola löst.
- Der zweite Gas-Auffangbeutel, der nun nur noch Gas enthält, wird mithilfe des Ventils verschlossen. Durch manuelle Drucktests wurde beobachtet, dass dieser dicht genug ist, sodass auch bei äußerem Druck keine nennenswerten Gasmengen aus dem Beutel entweichen.

#### 3.2 Teil II: Bestimmung des freigesetzten Kohlenstoffdioxids

Es werden zwei Fachmethoden zur Bestimmung des freigesetzten Kohlenstoffdioxids genutzt (Abb. 5) – die Fällung des Kohlenstoffdioxids als Carbonat (Methode 1) und das pneu-



Abb. 4: Trennen von Gas und Flüssigkeit.

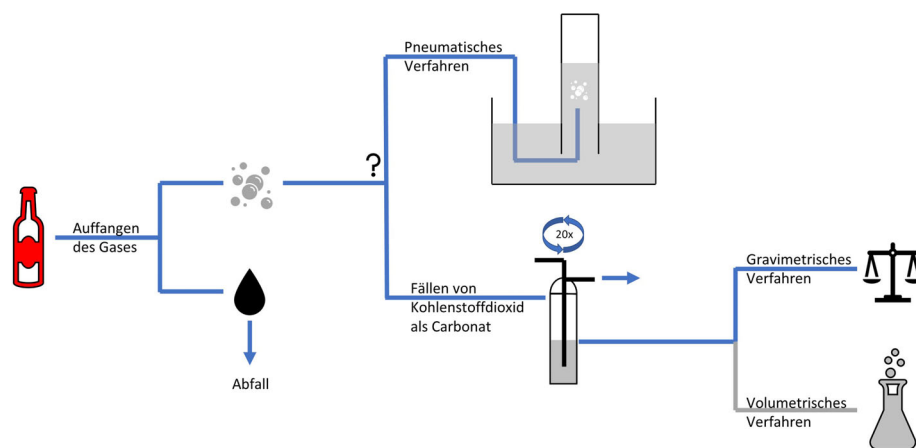
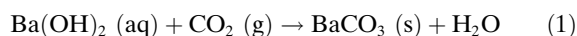


Abb. 5: Verlaufsschema der Quantifizierung.

matische Verfahren (Methode 2). Beide Methoden werden mit der Cola-Sorte Coca-Cola® light (identische Charge) mehrfach wiederholt [9].

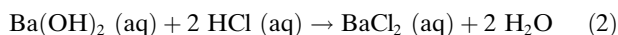
### 3.2.1 Methode 1: Gravimetrische Bestimmung

**Prinzip:** Dieses Verfahren nutzt das Ausfällen von Kohlenstoffdioxid als schwerlösliches Carbonat (1) [10]. Das entstandene Carbonat wird gravimetrisch bestimmt.



**Ergebnisse von Vorstudien:**

- Verwendung von Bariumhydroxid-Lösung als Fällungsmittel: Vorstudien führten zu der Entscheidung, mit Bariumhydroxid-Lösung anstelle von Calciumhydroxid-Lösung als Fällungsmittel zu arbeiten [8]. Zum einen erlaubt die höhere Löslichkeit des Bariumhydroxid Octahydrats ( $72 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  – im Vergleich: Calciumhydroxid:  $1,7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) in Wasser, dass sich in der Lösung eine größere Stoffmenge an Kohlenstoffdioxid binden kann. Zum anderen lässt sich der Filterkuchen leichter von überschüssigem Bariumhydroxid befreien.
- Prüfung der Validität des gravimetrischen Verfahrens: Zu diesem Zweck wurde das in Lösung verbliebene Fällungsmittel Bariumhydroxid mit Salzsäure ( $c=0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) unter Verwendung von ethanolischer Phenolphthalein-Lösung ( $\omega=0,1\%$ ) rücktitriert (2) (Rechenbeispiel 1 – siehe Anhang). Es zeigte sich, dass die gravimetrisch bestimmten Stoffmengen durch die Rücktitration bestätigt wurden.



**Geräte:** Einwurf-Apparatur, Siliconschläuche (passend zum Durchmesser des Anschlüsse der Gaswaschflasche), zwei Dreiwegehähne (passend zum Durchmesser der Schläuche), zwei präparierte Urinbeutel als Gas auffangbeutel (2 L), Gaswaschflasche (500 mL), Messzylinder (250 mL, 500 mL, 1000 mL), Becherglas (600 mL, 2000 mL), Messkolben (2 L), Spatel, Stoppuhr, Büchnertrichter mit passendem Rundfilterpapier (MN 640 d), Guko-Ring, Saugflasche, Vakuumschlauch, Vakuumpumpe, Trockenschrank, Waage, Glasrichter mit passendem Faltenfilter (MN  $615\frac{1}{4}$ ), Kunststoffflasche (1 L), Kristallisierschale (passend zum Faltenfilter), Uhrgläser (passend zu Rundfiltern), Vollpipette (10 mL), Glasflasche ( $\geq 1 \text{ L}$ )

**Chemikalien:** Coca-Cola® light (0,5 L Flasche), mentos® mint, Bariumhydroxid Octahydrat, dest. Wasser

**Vorbereitende Tätigkeiten:** Herstellung der Bariumhydroxid-Lösung: In einem Becherglas werden 96 g Bariumhydroxid Octahydrat in ca. 1800 mL dest. Wasser für fünf Minuten bei leichter Erwärmung gerührt. Anschließend wird die Suspension über einen gewogenen Faltenfilter in einen 2 L-Messkolben filtriert und mit dest. Wasser aufgefüllt. Der Faltenfilter wird auf einem Uhrglas an der Luft getrocknet und anschließend erneut gewogen. Es sollte sich eine Konzentration von ca.  $c(\text{Ba}(\text{OH})_2)=0,3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  ergeben.

**Durchführung:** 500 mL Bariumhydroxid-Lösung und ein Rührfisch werden in die Waschflasche gegeben und die Fällungsapparatur entsprechend der Abbildung 6 zusammgebaut (Abb. 6). Der gefüllte Gas-Auffangbeutel (vgl. Teil I) wird links an die Apparatur angeschlossen.

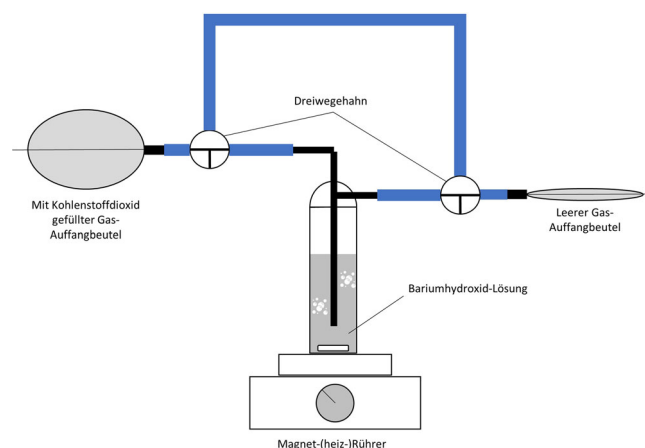


Abb. 6: Schematische Darstellung der Fällungsapparatur.

Nun wird das Gas über das Steigrohr der Gaswaschflasche durch die Lösung gedrückt – die Dreiwegehähne stehen hier in 'T'-Position. Anschließend werden die Dreiwegehähne in eine umgekehrte 'T'-Position gedreht, und das Gas kann innerhalb der geschlossenen Apparatur von rechts zurück nach links in den ursprünglichen Gas-Auffangbeutel gedrückt werden. Diese Schritte werden 20 Mal (empirisch ermittelter Wert) wiederholt.

Jetzt wird der Niederschlag schnellstmöglich über den Büchnertrichter und ein zuvor gewogenes Filterpapier abgesaugt. Der Filterkuchen wird zweimal mit je 20 mL dest. Wasser gespült. Abschließend wird das Filterpapier für ca. 2 Stunden bei  $100^\circ\text{C}$  getrocknet.

**Tab. 1:** Messdaten des gravimetrischen Verfahrens – Coca-Cola® light, MHD 30.09.2021, Charge: LH611180018.

Messung Nr.	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	$\sigma$
Masse Bariumcarbonat in g	8,00	7,69	7,51	7,54	7,33	7,61	0,22
Stoffmenge CO <sub>2</sub> in mol	0,0405	0,0390	0,0381	0,0382	0,0371	0,0386	0,0011
Temperatur in °C	22,6	22,8	22,0	22,1	22,2	22,34	0,31
Temperatur in K	295,8	296	295,15	295,25	295,35	295,49	0,31
Errechnetes Volumen CO <sub>2</sub> in L	0,984	0,947	0,922	0,926	0,900	0,936	0,03

**Beobachtung:**

Aus den Ergebnissen der gravimetrischen Bestimmung (Tab. 1) lässt sich die Stoffmenge des Kohlenstoffdioxids berechnen:

$$n(\text{CO}_2) = n(\text{BaCO}_3) \quad (3)$$

$$n(\text{CO}_2) = \frac{m(\text{BaCO}_3)}{M(\text{BaCO}_3)} = \frac{7,61 \text{ g}}{197,35 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}} = 0,0386 \text{ mol} \quad (4)$$

**Auswertung:** Mit der gravimetrischen Bestimmung wird eine Stoffmenge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid von 0,0386 mol ermittelt. Das daraus errechnete Volumen an freigesetztem Kohlenstoffdioxid beträgt 936 mL. Die Methode verfügt über eine gute *Reproduzierbarkeit*, wie die geringe Standardabweichung ( $\sigma = 0,0011 \text{ mol}$ ) belegt.

Beurteilt man die Fachmethode aus schulexperimenteller Sicht, so besteht ein hoher *Materialaufwand* an Standard-Laborgeräten. Es werden hohe *experimentelle Anforderungen* an die Durchführenden gestellt, da sie verschiedene Arbeitstechniken gewissenhaft durchführen müssen. Der *Zeitaufwand* ist relativ hoch: 20 Durchläufe des Gases zur Fällung als Carbonat und das Absaugen des gefällten Carbonats (durch seine Feinheit) nehmen einige Zeit in Anspruch.

Eine besondere Möglichkeit zur Differenzierung stellt die volumetrische Rücktitration des Fällungsmittels Bariumhydroxid-Lösung dar. Die Schülerinnen und Schüler arbeiten mit der identischen Probe und können mit diesen Messdaten die Ergebnisse der gravimetrischen Bestimmung replizieren.

**3.2.2 Methode 2: Bestimmung durch Pneumatisches Auffangen**

**Prinzip:** Beim pneumatischen Auffangen wird das Gas durch Wasserverdrängung aufgefangen und als Volumen quantifiziert.

**Ergebnisse der Vorstudien:**

- Das pneumatische Auffangen sollte mit carbonatisiertem Wasser (im Verhältnis Leitungswasser:Mineralwasser = 5:1; empirisch ermitteltes Verhältnis) durchgeführt werden [11]. So wird sichergestellt, dass sich das Kohlenstoffdioxid nicht im Wasser löst und dadurch der pneumatischen Bestimmung entzieht.
- Neben Wasser wurde auch Glycerin als Sperrflüssigkeit geprüft. Es zeigt sich, dass die erzielten Gasvolumina vergleichbar sind. Deshalb wird die Arbeit mit Wasser als Sperrflüssigkeit vorgeschlagen, da der Einsatz von Glycerin einen erhöhten Reinigungsaufwand mit sich bringt.
- Die Temperaturen von Cola und Wasser, sowie die Umgebungstemperatur sollten annähernd gleich sein, damit der Fehler beim Rechnen mit dem idealen Gasgesetz gering bleibt.
- Darüber hinaus sollten Proben der identischen Charge verwendet werden. Vorversuche haben gezeigt, dass sich signifikante Unterschiede der bestimmbar Menge an Kohlenstoffdioxid bei Betrachtung unterschiedlicher Chargen ergeben.

**Geräte:** Einwurf-Apparatur, Silikonschläuche, Stativmaterial, pneumatische Wanne, Messzylinder (2 L) (alternativ: Messbecher (2 L) aus dem Haushaltsbedarf), Rückschlagventil,

Stoppuhr, Gas-Auffangbeutel (2 L) einseitig versiegelt (Urinbeutel aus der Apotheke, Plastikstopfen), Vakuumpumpe und passender Schlauch

**Chemikalien:** Coca-Cola® light (0,5 L Flasche), mentos® mint, Leitungswasser, Mineralwasser (medium)

**Durchführung:** Die pneumatische Wanne wird mit 3,5 L Leitungswasser und 0,7 L Mineralwasser gefüllt, anschließend wird der Messzylinder mithilfe der Vakuumpumpe vollständig mit Wasser gefüllt. Der Versuch wird entsprechend Abbildung 7 aufgebaut. Der verschlossene, mit Gas gefüllte Gas-Auffangbeutel wird mit einem Rückschlagventil versehen und mit einem Schlauch verbunden. Das Schlauchende wird so weit in den Messzylinder eingeführt, dass es sich möglichst einer Höhe mit dem Gas-Auffangbeutel befindet (Abb. 7).

Nun wird das Ventil des Gas-Auffangbeutels geöffnet und ggf.

**Abb. 7:** Pneumatisches Verfahren – Versuchsaufbau.

leichter Druck auf den Beutel ausgeübt, um das Gas in den Messzylinder zu drücken. Nachdem der Gas-Auffangbeutel vollständig entleert ist, wird das Ventil verschlossen und der Schlauch schnellstmöglich aus dem Zylinder entfernt. Dadurch wird verhindert, dass sich das Totvolumen des Schlauchs auf das Messergebnis auswirkt, indem ggf. Gas nachströmt.

**Beobachtung:**

Aus den Messdaten (Tab. 2) wird die Stoffmenge des Kohlenstoffdioxids mithilfe der idealen Gasgleichung unter Berücksichtigung der Temperatur und des Luftdrucks (wird mit 1,013 bar als konstant angesehen) wie folgt berechnet:

$$n(\text{CO}_2) = \frac{p^*V}{R^*T} \quad (5)$$

So ergibt sich aus z.B. aus einem Volumen von 1200 mL Kohlenstoffdioxid, dass bei 21,0°C aufgefangen wurde (exemplarische Werte aus Tabelle 2), eine Stoffmenge von 0,0497 mol.

**Tab. 2:** Messdaten des pneumatischen Verfahrens – Coca-Cola® light (MHD 30.09.2021, Chargennr. LH611180018).

Messung Nr.	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	$\sigma$
Volumen CO <sub>2</sub> in mL	1250	1160	1180	1200	1160	1190	33
Temperatur in °C	21,0	20,7	21,0	21,0	21,1	20,96	0,14
Temperatur in K	294,2	293,9	294,2	294,2	294,3	0,104	0,14
Errechnete Stoffmenge CO <sub>2</sub> in mol	0,0518	0,0481	0,0489	0,0497	0,0480	0,0493	0,0013

$$n(\text{CO}_2) = \frac{1,013 \text{ bar} \cdot 1,200 \text{ L}}{0,08314 \frac{\text{bar} \cdot \text{L}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 294,15 \text{ K}} = 0,0497 \text{ mol.} \quad (6)$$

**Auswertung:** Mit dem pneumatischen Auffangen wird für Coca-Cola® light ein Volumen an freigesetztem Kohlenstoffdioxid von 1190 mL (Tab. 2) bestimmt. Daraus lässt sich eine Stoffmenge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid von 0,0493 mol ermitteln. Die Methode verfügt über eine gute *Reproduzierbarkeit*, wie die geringe Standardabweichung ( $s = 0,0013 \text{ mol}$ ) belegt.

Beurteilt man die Fachmethode aus schulexperimenteller Sicht, so ist der *Materialaufwand* gering. Es ist sogar möglich, den Messzylinder – unter Inkaufnahme einer geringeren Genauigkeit – durch einen handelsüblichen Messbecher zu ersetzen. Die *experimentellen Anforderungen* an die Durchführenden sind recht gering und ein gefahrloses Arbeiten ist gegeben. Für die Durchführung ist ein geringer *Zeitaufwand* nötig, der Versuch kann in ca. 10–15 Minuten aufgebaut und durchgeführt werden. So ist der Versuch bei Nichtgelingen (z. B. mentos fällt zu früh in die Flüssigkeit) rasch wiederholbar.

### 3.2.3 Vergleich von Methode 1 und Methode 2 am Beispiel der Cola-Sorte Coca-Cola® light

Es kann zunächst festgehalten werden, dass jede Methode für sich betrachtet reproduzierbare und zuverlässige Messdaten erzielt. Insofern eignet sich jede der beiden Fachmethoden für die quantitative Bestimmung des freigesetzten Kohlenstoffdioxids. Das unter Kapitel 2 formulierte Ziel der Studie ist damit erreicht.

Vergleicht man aber die absoluten Werte der beiden Fachmethoden (gravimetrische Bestimmung: 0,0386 mol – pneumatisches Verfahren: 0,0493 mol; vgl. Tabelle 1 und 2), so fällt auf, dass nicht wie erwartet die identische Stoffmenge bzw. das identische Volumen an Kohlenstoffdioxid erzielt werden. Das überrascht und fordert Erklärungsansätze:

- Es wird diskutiert, ob der Gasraum in der Cola-Flasche mit einem Gemisch aus den Gasen Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Argon gefüllt ist. Die letztgenannten Gase werden häufig zur Verdrängung von Sauerstoff in Getränken eingesetzt, um eine Oxidation des Getränkes zu verhindern. Mit der Fontäne tritt das gesamte Gas aus. Während beim pneumatischen Auffangen auch das gesamte Volumen des Gasgemisches bestimmt wird, ermittelt man bei der gravimetrischen Methode nur den tatsächlichen Anteil an Kohlendioxid. Das könnte diesen Unterschied erklären. Allerdings haben Recherchen ergeben, dass die Atmosphäre über der Flüssigkeit nicht mit Schutzgasen, wie z. B. Argon, angereichert wird, sondern nur aus Kohlenstoffdioxid, das aus der Cola entweicht, besteht. Insofern dürfte unserem Kenntnisstand nach dieser Aspekt nicht als Ursache in Frage kommen.
- Es wird diskutiert, ob das Entweichen von Kohlenstoffdioxid beim Öffnen der Flasche eine Rolle spielen könnte. Das ist grundsätzlich möglich, müsste sich aber auf beide Methoden gleichermaßen auswirken. Außerdem wurden beide Methoden von der identischen Person durchgeführt,

so dass interpersonelle Fehler ausgeschlossen werden. Insofern wird dieser mögliche Fehler als unbedeutend angesehen.

- Es wird diskutiert, ob die Carbonatisierung des Wassers in der pneumatischen Wanne für das höhere Volumen beim pneumatischen Verfahren verantwortlich ist. Dazu wurde eine Vergleichsmessung mit 800 mL Kohlenstoffdioxid ( $n = 0,033 \text{ mol}$ ) bei dreifacher Messwiederholung durchgeführt. Es wurde ein Volumen von 810 mL gemessen. Der gemessene Wert fällt also etwas höher aus als das tatsächliche Volumen. In Abhängigkeit vom eingesetzten Messzylinder muss eine Messungenauigkeit von  $\pm 20 \text{ mL}$  (trifft für 2 L Messzylinder zu) berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang kommt der Fehlerbetrachtung und insbesondere der Betrachtung des systematischen Fehlers eine besondere Bedeutung zu. Sofern der Umgebungsdruck beim pneumatischen Auffangen als konstant angenommen wird, sind die Messwerte für die Temperatur der Cola und das Gasvolumen mit Fehlern behaftet. Insbesondere der Messfehler des 2 L Messzylinders hat einen Einfluss auf den systematischen Fehler. Bei der gravimetrischen Untersuchung hängt der systematische Fehler nur vom Wiegefehler ab, der sich besser kontrollieren lässt. Folglich ist der systematische Fehler des pneumatischen Auffangens etwa 20-fach höher, als der der Gravimetrie.

Summa summarum ist die Ursache für die Differenz der beiden Daten nach wie vor offen und regt zu weiterführenden Betrachtungen an.

## 4. Weiterführung: Eine Fachmethode und zwei Cola-Sorten

Mit einer zuverlässigen Messmethodik lässt sich nun der Einfluss der Cola-Sorte auf die Menge an freigesetztem Kohlenstoffdioxid untersuchen. Es wird oft empfohlen, die Colamentos-Fontäne mit Coca-Cola® light durchzuführen [vgl. 2–5]. Durch verschiedene Studien liegt die Vermutung nahe, dass bei Coca-Cola® light mehr Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird als bei Verwendung von Coca-Cola® classic [vgl. 1–4]. Das wäre eine mögliche Ursache für die höhere Fontäne. Die Frage lautet: *Wird bei Coca-Cola® light mehr Kohlenstoffdioxid freigesetzt als bei Coca-Cola® classic?*

Mit Blick auf die schulische Umsetzbarkeit wird das pneumatische Verfahren für die Untersuchung ausgewählt. Es handelt sich um ein zuverlässiges Verfahren mit geringen apparativen, zeitlichen und manuellen Ansprüchen. Die Durchführung erfolgt gemäß den Teilen I und II (Methode 2) mit Coca-Cola® classic und Coca-Cola® light.

Die erzielten Ergebnisse (Tabelle 2 und 3) belegen, dass aus Coca-Cola® light 0,0493 mol ( $\pm 0,0014 \text{ mol}$ ) und aus Coca-Cola® classic 0,0419 mol ( $\pm 0,0018 \text{ mol}$ ) Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden. Das entspricht einer Differenz von 0,0074 mol, oder anders ausgedrückt: aus Coca-Cola® Classic wurde 15% weniger Kohlenstoffdioxid freigesetzt als aus Coca-Cola® light. Dieser experimentell ermittelte Wert stimmt mit Literaturangaben überein. Bei zuckerhaltigen Getränken wird 15% weniger Kohlenstoffdioxid gelöst als bei

**Tab. 3:** Messdaten des pneumatischen Verfahrens - Coca-Cola® classic (MHD 30.09.2021, Chargenr. LH611132015).

Messung Nr.	1	2	3	4	5	$\bar{x}$	$\Sigma$
Volumen CO <sub>2</sub> in mL	980	1080	1040	960	1000	1012	43
Temperatur in °C	21,0	21,0	20,9	21,1	21,2	21,04	0,10
Temperatur in K	294,2	294,2	294,1	294,3	294,4	294,2	0,10
Errechnete Stoffmenge CO <sub>2</sub> in mol	0,0406	0,0447	0,0431	0,0398	0,0414	0,0419	0,0018

identischen, aber z. B. mit Aspartam gesüßten Getränken, um trotzdem einen identischen Sättigungsdruck zu erzielen [12]. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, dass bei der Cola-mentos-Fontäne mit Coca-Cola® light mehr Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird als bei der classic-Sorte.

### Dank

Wir danken den Gutachter:innen für die konstruktiven und wertvollen Anregungen. Sie haben durch ihre Impulse rund um mögliche Erklärungsansätze den Beitrag maßgeblich gestärkt.

### Literatur

- [1] Eichler, J. F. et al. (2007). Mentos and the Scientific Method: A Sweet Combination. *Journal of Chemical Education* 84 (7), 1120–1123.
- [2] Coffey, T. S. (2008). Diet Coke and Mentos: What is really behind this physical reaction? *American Journal of Physics* 76 (6), 551–557.
- [3] Schäfer, A. (2012). Dem Cola-mentos-Versuch wissenschaftlich auf der Spur – Experimentelle Untersuchungen und deren didaktisch-methodische Nutzbarkeit für Lehr-Lern-Arrangements. Unveröffentlichte Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum.
- [4] Kuntzleman, Th.S. et al. (2017). New Demonstrations and New Insights on the Mechanism of the Candy-Cola Soda Geyser. *Journal of Chemical Education* 94 (5), 569–576.
- [5] Huber, Chr. J., Massari, A. M. (2014). Quantifying the Soda Geyser. *Journal of Chemical Education* 91 (3), 428–431.
- [6] Jander, G., Jahr, K.-F. (2017). *Maßanalyse*. Walter de Gruyter, Berlin.
- [7] Stäudel, L. (2007). Gasentwicklung von Brausetabletten. Versuchsergebnisse deuten und eine Lösungshypothese entwickeln. In: R. Duit u.a. (Hrsg.): *Naturwissenschaftliches Arbeiten*. Seelze, 2. Auflage, 90–96.
- [8] Joch, P. (2018). Quantitative Bestimmung des freiwerdenden Kohlenstoffdioxids beim Cola-mentos-Versuch. Unveröffentlichte Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum.
- [9] Kromidas, S. (2016). *Methodenvalidierung in der Analytik*. Hg. V. NOVIA GmbH, Frankfurt am Main.
- [10] Han, S.-J. et al. (2011). Carbon Dioxide Capture Using Calcium Hydroxide Aqueous Solution as the Absorbent. *Energy & fuels* 25, 3825–3834.
- [11] Zellmer, S., Sommer, K., Tsianakas, T. (2021). Spritzentechnik contra Laborgeräte – Messgenauigkeit im Vergleich. *Unterricht Chemie* 32 (185), 44–48.
- [12] Kalinowski, R. (2002). Kribbeln auf der Zunge – Welcher technische Aufwand ist beim Carbonatisieren wirtschaftlich? *Getränke-industrie* 10, 8–11.

Eingegangen am 21. März 2022

Angenommen am 12. Mai 2023

Online veröffentlicht am ■■. ■■ 0000