

Name:

Datum:

Kohlenstoffdioxid - kleines Gas mit großer Wirkung auf das Klima

1. Kohlenstoffdioxidnachweis mit Kalkwasser

Geräte

2 Schnappdeckelgläser, Kunststoffpipette, Soda-Club-Maschine, Abfallgefäß für Kalkwassergemisch, wasserfester Stift

Materialien

Kalkwasser (gesättigte Lösung von Ca(OH)₂: 5 g/L, kräftig schütteln, Suspension 1 Tag stehen lassen, dann filtrieren)

Durchführung

1. Stelle zwei Schnappdeckelgläser bereit.
2. Beschrifte ein Gläschen mittels eines wasserfesten Stiftes mit „CO₂“.
3. Leite mit Hilfe des Schlauches für 2 Sekunden das Kohlenstoffdioxid (CO₂) aus der Druckgasflasche der Soda-Club-Maschine in das Schnappdeckelglas (beschriftet mit „CO₂“).
4. In das zweite Schnappdeckelglas wird kein CO₂ eingeleitet. Es dient als Vergleich.
5. Fülle nun mit Hilfe der Pipette in beide Schnappdeckelgläser jeweils 2 mL Kalkwasser.

Was beobachtest du?

Name:

Datum:

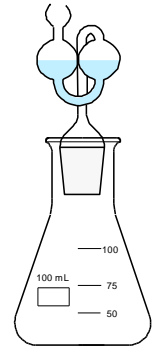
2. Untersuchung von Brausetabletten mit Kalkwasser

Geräte

Gärröhrchen mit durchbohrtem Gummistopfen,
Erlenmeyerkolben weit (50 mL), Kunststoffpipette, Soda-Club-Maschine

Materialien

Kalkwasser (gesättigte Lösung von Ca(OH)₂: 5 g/L, kräftig schütteln, Suspension 1 Tag stehen lassen, dann filtrieren), Brausetabletten, dest. Wasser



Durchführung

1. Lege eine halbe Brausetablette in den Erlenmeyerkolben.
2. Bereite ein Gärröhrchen vor, indem du vorsichtig mit einer Pipette Kalkwasser hineingibst, bis die kugeligen Erweiterungen des Glases etwa zur Hälfte gefüllt sind.
3. Gib etwas dest. Wasser auf die Brausetablette und verschließe den Erlenmeyerkolben sofort mit dem vorbereiteten Gärröhrchen. Achte darauf, dass der Gummistopfen dicht verschließt. Drücke aber nicht so fest, dass das Glas des Kolbens platzt und fasse beim Aufsetzen den Stopfen des Gärröhrchens an, nicht die Glaskugeln. (Verletzungsgefahr!)
4. Beobachte, was geschieht!

Was beobachtest du? Welches Gas entweicht aus der Brausetablette?

Name:

Datum:

3. Nachweis von Kohlenstoffdioxid in der Atemluft und in der Umgebungsluft

Geräte

3 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Kunststoffpipette, Luftballon präpariert mit Spritzfläschenaufsatz in der Öffnung, Strohhalm, Gummischlauch, abgeschnittener vorderer Teil einer Kunststoffpipette, Ballonpumpe, wasserfester Stift, Abfallgefäß für Kalkwassergemisch

Materialien

Kalkwasser (gesättigte Lösung von Ca(OH)₂: 5 g/L, kräftig schütteln, Suspension 1 Tag stehen lassen, dann filtrieren)

Durchführung

1. Fülle mit Hilfe der Kunststoffpipette 2-3 mL Kalkwasser in jedes der drei bereitgestellten Reagenzgläser.
2. Beschrifte das Reagenzglas 1 mit Hilfe des wasserfesten Stiftes mit „Atemluft“. Das Reagenzglas 2 mit „Umgebungsluft“. Das Reagenzglas 3 bleibt unbeschriftet. Es dient als Vergleich.
3. Stecke nun einen sauberen Strohhalm in die Öffnung des Luftballons und puste ihn einmal kräftig auf.
4. Verschließe den Strohhalm mit Daumen und Zeigefinger in der Nähe der Ballonöffnung. Achte darauf, dass die Atemluft dabei nicht aus dem Ballon entweicht.
5. Halte anschließend den Strohhalm in das Reagenzglas 1 (beschriftet mit „Atemluft“) Die Öffnung des Strohhalmes muss sich nicht im Kalkwasser befinden.
6. Lass die Atemluft **langsam** aus dem Ballon in das Reagenzglas strömen. Öffne dazu deine Finger vorsichtig, damit es nicht spritzt.
7. Schüttele das Reagenzglas und beobachte, was geschieht!

Was beobachtest du?

8. Entferne den Strohhalm und stecke den Gummischlauch auf die Öffnung des Luftballons.
9. Stecke an das andere freie Ende des Schlauches die Ballonpumpe und pumpe den Luftballon mittels der Pumpe kräftig auf.
10. Verschließe den Schlauch mit Daumen und Zeigefinger in der Nähe der Ballonöffnung und entferne die Ballonpumpe vom anderen Schlauchende.

11. Schiebe nun die kleine abgeschnittene Kunststoffspitze in die Schlauchöffnung. **Achte darauf, dass keine Luft aus dem Ballon entweicht.**
12. Halte so den Schlauch in das Reagenzglas 2 (beschriftet mit „Umgebungsluft“), dass die Spitze in das Kalkwasser taucht.
13. Lass die Luft **ganz langsam** aus dem Ballon in das Kalkwasser strömen. Öffne dazu vorsichtig deine Finger, so dass es nicht spritzt.
14. Schüttele das Reagenzglas. Beobachtest du keine Veränderung in der Kalkwasserlösung, puste den Ballon erneut mit der Ballonpumpe auf.
15. Wiederhole dazu Punkt 8 –13 so lange, bis eine Veränderung in der Kalkwasserlösung zu erkennen ist. Schüttele das Reagenzglas nach jedem Einleiten der Luft vorsichtig.

Was beobachtest du?

	Anzahl der Ballonfüllungen
Atemluft	
Umgebungsluft	

Wie kannst du deine Beobachtungen erklären?

Name:

Datum:

4. Nachweis von Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsgas

Geräte

2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Reagenzglasklammer, Becherglas (100 mL) mit Wasser, Kunststoffpipette, Teelicht, Streichhölzer, Stoppuhr, Abfallgefäß für Kalkwassergemisch

Material

Kalkwasser (gesättigte Lösung von Ca(OH)₂: 5 g/L, kräftig schütteln, Suspension 1 Tag stehen lassen, dann filtrieren)

Durchführung

1. Fülle mittels Kunststoffpipette 2 – 3 mL Kalkwasser in ein Reagenzglas. Dieses Reagenzglas dient als Vergleich.
2. Zünde das Teelicht mit einem Streichholz an und entsorge dieses sofort im Becherglas mit Wasser.
3. Halte mit Hilfe einer Reagenzglasklammer in 2 cm Abstand das zweite leere Reagenzglas mit der Öffnung nach unten ca. 30 Sekunden über die Teelichtflamme, um das Verbrennungsgas aufzufangen.
4. Stelle das Reagenzglas mit der Öffnung nach oben zurück in den Reagenzglasständer. ACHTUNG: Benutze die Reagenzglasklammer – das Glas ist heiß!
5. Fülle in dieses Reagenzglas mittels Kunststoffpipette 2 – 3 mL Kalkwasser.
6. Schüttele das Reagenzglas (mit Reagenzglasklammer – heiß!) kurz und beobachte was geschieht.

Was beobachtest du?

Wie kannst du dir deine Beobachtungen erklären?

Name:

Datum:

5. Nachweis von Kohlenstoffdioxid in Autoabgasen

Geräte

2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Schlauchverbindung für die Kunststoffspritze, Kunststoffspritze (100 mL), abgeschnittener vorderer Teil einer Kunststoffpipette, Abgasbeutel (präparierter Müllbeutel für Abgase mit Schlauch, Schraubklemme und Kunststoffklemme), Abfallgefäß für das Kalkwasser-Gemisch

Materialien

Kalkwasser (gesättigte Lösung von Ca(OH)₂: 5 g/L, kräftig schütteln, Suspension 1 Tag stehen lassen, dann filtrieren), Abgasbeutel mit Autoabgasen

Durchführung

1. Fülle 2–3 mL Kalkwasser mittels Kunststoffpipette in ein Reagenzglas. Es dient als Vergleich.
2. Befülle das zweite Reagenzglas ebenfalls mit 2–3 mL Kalkwasser.
3. Verbinde die große Kunststoffspritze mit dem Schlauch des Abgasbeutels.
4. Öffne die Schlauchklemme des Abgasbeutels und ziehe den Kolben der Kunststoffspritze schnell und gleichmäßig nach hinten, bis die Spritze vollständig mit Abgasen gefüllt ist.
5. Schließe die Schraubklemme, bevor du die Kunststoffspritze vom Schlauch abziehst.
6. Stecke den abgeschnittenen Teil der Kunststoffpipette in das kleine Schlauchstück und befestige dieses an der Kunststoffspritze.
7. Halte die Spritze mit dem Aufsatz in das zweite Reagenzglas, so dass das Ende des Schlauches in das Kalkwasser eintaucht.
8. Drücke die Abgase vorsichtig in die Kalkwasserlösung.
9. Wenn du keine Veränderungen des Kalkwassers beobachtest, wiederhole den Vorgang evtl. 1-2 mal.

Was beobachtest du?

Wie kannst du dir deine Beobachtungen erklären?

Information zu den Versuchen „Kohlenstoffdioxid - kleines Gas mit großer Wirkung auf das Klima“

1. Kohlenstoffdioxidnachweis mit Kalkwasser
2. Untersuchung von Brausetabletten mit Kalkwasser
3. Nachweis von Kohlenstoffdioxid in der Atemluft und in der Umgebungsluft
4. Nachweis von Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsgas
5. Nachweis von Kohlenstoffdioxid in Autoabgasen

Diese 5 Experimente dienen als Einstieg zur Versuchsreihe „Klimawandel“, in denen sich die Schülerinnen und Schüler mit den Folgen der Klimaerwärmung und den Teilaspekten Treibhauseffekt/Erderwärmung und Ozeanversauerung auseinandersetzen. Um sich diese naturwissenschaftlichen Phänomene (Zusammenspiel CO₂ in der Atmosphäre und im Wasser) experimentell erschließen zu können, lernen sie zuerst den chemischen Nachweis von CO₂ mit Hilfe von Kalkwasser kennen. Außerdem erfahren sie, welche natürlichen und anthropogenen CO₂-Quellen es gibt, die sie mit der kennengelernten Nachweismethode überprüfen.

Hintergrund

Die gegenwärtige **globale Erwärmung** oder **Erderwärmung** (umgangssprachlich auch „der“ *Klimawandel*) ist der Anstieg der Jahresmitteltemperatur der erdnahen Atmosphäre und der Weltmeere seit Beginn der Industrialisierung. Das Thema „**Klimawandel**“ ist seit Jahren hochaktuell. Die Berichte des Weltklimarats IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) belegen die Dringlichkeit, diesem entgegenzuwirken. Die Aktivitäten vieler Schülerinnen und Schüler (*Fridays for Future*) stellen eine weltweite Reaktion auf diese Entwicklungen dar.

In diesem Zusammenhang spricht man auch von „Treibhauseffekt“, bedingt durch „Treibhausgase“, die die Erwärmung auf der Erde beschleunigen, und meint damit vor allem die menschengemachte Erhöhung von klimarelevanten Gasen, vor allem des Kohlenstoffdioxids durch Verbrennung fossiler Brennstoffe.

Seit der Industrialisierung steigt die mittlere globale Temperatur der Luft in Bodennähe allmählich an. Wissenschaftliche Forschungen belegen, dass für einen bedeutenden Teil dieses Anstiegs wir Menschen verantwortlich sind. Das stellt auch der Weltklimarat fest. Deshalb sprechen wir von einer anthropogenen – vom Menschen verursachten – Klimaänderung. Menschliche Aktivitäten haben bisher etwa 1,0 °C globale Erwärmung gegenüber vorindustriellem Niveau verursacht¹. Die globale Erwärmung wird wahrscheinlich zwischen 2030 und 2052 1,5 °C erreichen, wenn sie mit der aktuellen Geschwindigkeit weiter zunimmt (s. Abb. SPM.1, S.10, IPCC-Bericht)¹. Ziel ist es, diesen Anstieg zu bremsen, so dass er letztlich maximal 2 °C bzw. möglichst sogar nur 1,5 °C über dem vorindustriellen Wert beträgt.

Durch das Verbrennen fossiler Energieträger (wie zum Beispiel Kohle, Erdöl oder Erdgas) und durch großflächige Entwaldung wird Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Atmosphäre angereichert. Land- und Viehwirtschaft verursachen Gase wie Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (Lachgas, N₂O). Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas gehören (neben ausschließlich durch den Menschen erzeugten Stoffen, wie z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe, FCKW, oder das als Isolator in Hochspannungsanlagen genutzte Schwefelhexa-

fluorid) zu den treibhauswirksamen Gasen.

Die Konzentrationen der Treibhausgase nehmen seit 1750 in der gesamten Atmosphäre zu^{2,3}. Bedingt durch seine hohe atmosphärische Konzentration (im ppm-Bereich) ist Kohlenstoffdioxid nach Wasserdampf das wichtigste Klimagas. (Bei CH₄ und N₂O liegen die Anteile der Gase in der Atmosphäre im ppb-Bereich. Ein ppm entspricht einem Molekül des Gases pro einer Million Moleküle trockener Luft, ein ppb - pro einer Billion).

Durch die Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre kommt es zu einem zusätzlichen Treibhauseffekt (neben dem **natürlichen** Treibhauseffekt, ohne den irdisches Leben nicht möglich wäre, weil ohne ihn auf der Erde statt der vorherrschenden globalen, bodennahen Mitteltemperatur von ca. 15 °C nur eine mittlere Temperatur von etwa Minus 18 °C herrschen würde und die Erde vereist wäre²) und folglich zu einem Anstieg der bodennahen Lufttemperatur (Abb. 1). Der natürliche Treibhauseffekt ist also lebensnotwendig - seine Verstärkung durch menschlichen Eingriff aber gibt Anlass zur Sorge (s. auch Versuch „Erderwärmung – Erwärmung durch Treibhausgase“).

Kohlenstoffdioxid macht dabei den Großteil (66,1 %) des vom Menschen zusätzlich verursachten Treibhauseffektes aus. Die globale Konzentration von CO₂ ist seit Beginn der Industrialisierung um gut 44 % gestiegen. Demgegenüber war die Kohlenstoffdioxid-Konzentration in den vorangegangenen 10.000 Jahren annähernd konstant.³ CO₂-Quellen sind vor allem die Strom- und Wärmeenergieerzeugung, Haushalte und Kleinverbraucher, der Verkehr und die industrielle Produktion. Zusätzlich in die Erdatmosphäre anthropogen emittiertes CO₂ wird durch die natürlichen physikalischen und biogeochemischen Prozesse im Erdsystem nur sehr langsam abgebaut. Nach 1000 Jahren sind davon noch etwa 15 bis 40 % in der Atmosphäre übrig. Der gesamte Abbau dauert jedoch mehrere hunderttausend Jahre.⁴

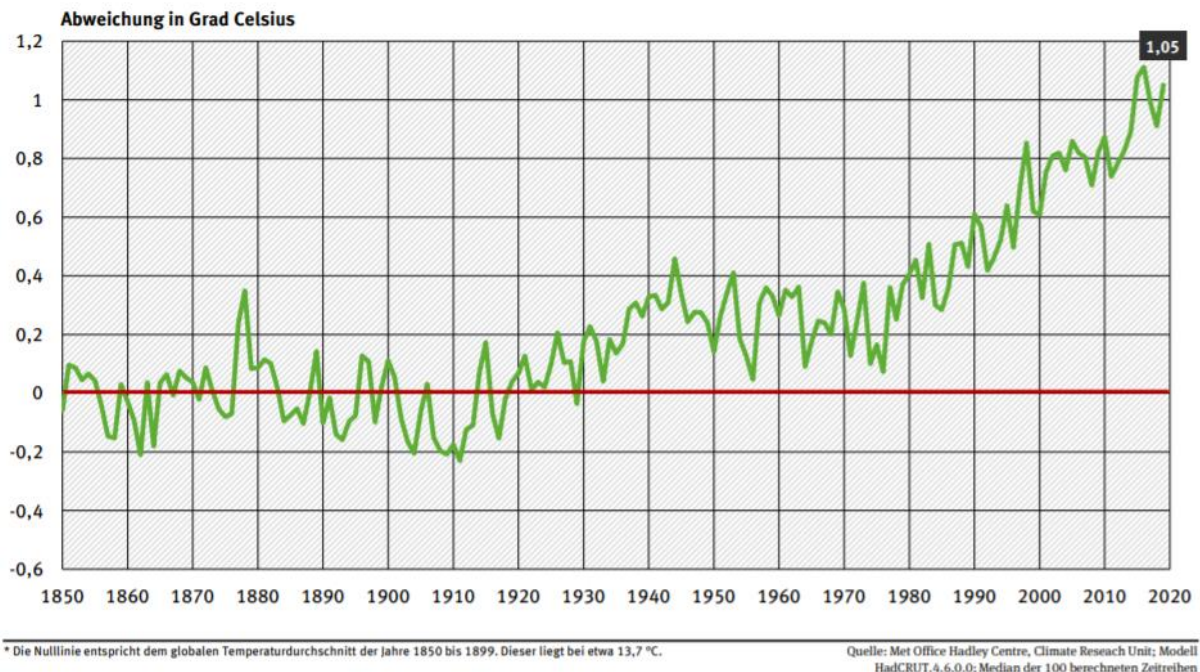
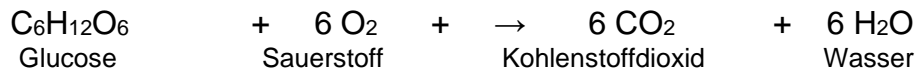


Abb. 1: Abweichung der globalen Lufttemperatur heute vom Durchschnitt für 1850 bis 1899 (Referenzperiode)⁵

Kohlenstoffdioxid (CO₂) gehört zu den treibhauswirksamen Gasen.

Über die Nahrungskette der heterotrophen Lebewesen (Konsumenten und Destruenten) gelangt der gebundene Kohlenstoff als Kohlenstoffdioxid in die Atmosphäre, wobei der Sauerstoff für die abbauenden (oxidativen) Stoffwechselprozesse verbraucht wird (Atmung).

Grundgleichung der Atmung (Dissimilation) ⁶:



Analoges gilt für die chemische Verbrennung von organischem Material.

Kohlenstoffdioxid ist unter Normalbedingungen ein farbloses und geruchsneutrales Gas, das aus sehr stabilen Molekülen besteht. Man kann es zum Sprudeln von Wasser, als Treibgas zum Backen oder zum Löschen von Feuer einsetzen. Als Trockeneis (gefrorenes CO₂, Sublimationspunkt -78 °C) wird es auch zum Kühlen oder für „Nebelschwaden“ im Theater verwendet.

Da Kohlenstoffdioxid eine höhere Dichte als Luft hat, sinkt es nach unten, was für den Einsatz im Feuerlöscher wichtig ist. Die höhere Dichte birgt aber auch Gefahren, da es sich in Grotten bzw. Gärkellern am Boden sammelt und dadurch, infolge Sauerstoffmangels, Bewusstlosigkeit und Tod verursachen kann.

In Hinblick auf das Klima ist eine andere Eigenschaft des Kohlenstoffdioxids von Bedeutung. CO₂ absorbiert wie auch Wasserdampf (H₂O) oder Methan (CH₄) elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich (Wärmestrahlung). Dadurch werden Schwingungen im Molekül angeregt. Die von einem Molekül aufgenommene Energie wird jeweils sehr schnell in Form von Stößen (→ Wärme) wieder abgegeben, aber dies in alle Raumrichtungen. Die von der Erde reflektierte Strahlung wird also durch vermehrtes CO₂ in der Atmosphäre in stärkerem Maße „umgelenkt“, so dass mehr Wärmeenergie in Erdnähe verbleibt (s. dazu Versuche „Erderwärmung – Erwärmung durch Treibhausgase“ und „Erwärmung der Erdoberfläche durch Bestrahlung schwarzer und weißer Flächen“). (Die zweiatomigen Gase Stickstoff (N₂) und Sauerstoff (O₂), Hauptbestandteile unserer Luft, können das zum Glück nicht).⁷

Erklärung zum Versuch 1: Kohlenstoffdioxidnachweis mit Kalkwasser

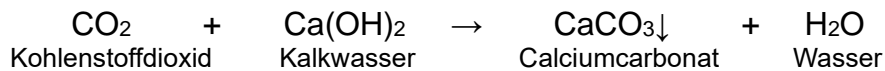
In diesem Versuch sollen die Schülerinnen und Schüler das Prinzip des CO₂-Nachweises mit Hilfe von Kalkwasser kennenlernen. Hierfür wird CO₂-Gas, welches von der Soda-Club-Maschine bereitgestellt wird, mit Kalkwasser versetzt. Als Vergleich dient eine Kalkwasserlösung ohne zusätzliches CO₂ (mit Luft).

Beobachtung

In der Kalkwasserlösung mit CO₂ entsteht eine weiße Trübung, während der Vergleich (Luft) klar bleibt.

Deutung

Das Kohlenstoffdioxid reagiert mit dem Kalkwasser (gesättigte Ca(OH)₂-Lösung) zu schwerlöslichem Calciumcarbonat (CaCO₃), welcher als weißer Niederschlag ausfällt.



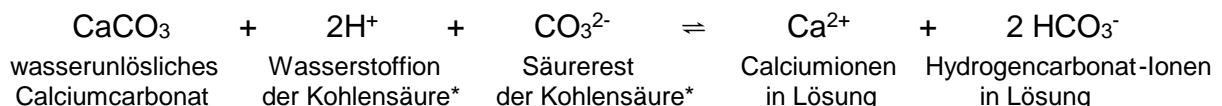
Die oben aufgestellte Reaktionsgleichung ist didaktisch verkürzt. In Wirklichkeit wird nicht sofort Carbonat gebildet, sondern das Kohlenstoffdioxid (CO₂) löst sich in Wasser unter Bildung von „Kohlensäure“*, die sofort weiter in Wasserstoffionen (H⁺) und Hydrogencarbonationen (HCO₃⁻) dissoziiert. Diese bilden zusammen mit den Calciumionen (Ca²⁺) und Hydroxidionen (OH⁻) des Kalkwassers (auch hier wird vereinfachend die Formel der ungelösten Verbindung eingesetzt) einen weißen Niederschlag aus schwerlöslichem Calciumcarbonat (CaCO₃):



Die Kalkwasserprobe ist somit ein Nachweis für das Gas Kohlenstoffdioxid (CO₂)⁸.

* Anmerkung: Aus didaktischen Gründen wird hier die vereinfachte Schreibweise H₂CO₃ benutzt, obwohl sie nur in sehr geringer Konzentration vorkommt. Bisher war man davon ausgegangen, dass Kohlensäure (H₂CO₃) als stabiles Molekül überhaupt nicht existiert, da sie sofort in Wasser und Kohlendioxid zerfällt. Doch einem österreichischen Forscherteam ist es inzwischen gelungen, gasförmige Kohlensäure zu detektieren - allerdings nur als Spurenkomponente⁹.

Achtung: Bei starker CO₂-Entwicklung kann die alkalische Kalkwasserlösung durch die Reaktion des CO₂ mit dem Wasser („Kohlensäure“*) so stark angesäuert werden, dass sich das anfangs gebildete Calciumcarbonat wieder auflöst. Es kann dann passieren, dass die vorübergehende Bildung des Niederschlags übersehen wird. Tritt dieser Fall ein, kann auch diese Beobachtung damit erklärt werden, dass sich das Carbonat im Säuren wieder löst und man Carbonate (s. Versuch: „Ozeanversauerung – Wirkung von CO₂ auf Muscheln“) durch die Freisetzung von CO₂ unter Auflösung nach Säurezusatz nachweist.



Siehe dazu auch den nächsten Versuch 2, bei dem CO₂ durch Ansäuern von Calciumcarbonat gewonnen wird.

Erklärung zum Versuch 2: Untersuchung von Brausetabletten mit Kalkwasser

Da für die folgenden Versuche zum Thema Klimawandel CO₂ bereitgestellt werden muss und eine direkte Entnahme aus der Soda-Club-Maschine nicht immer möglich ist, soll hier die Brausetablette als CO₂-Quelle eingeführt werden. Hierzu wird eine Brausetablette mit

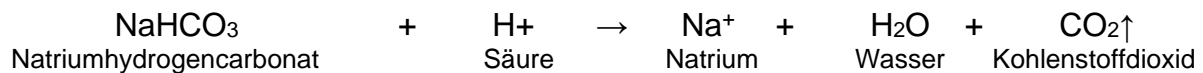
Wasser versetzt und das entstandene Gas mittels eines Gärröhrchens in Kalkwasser (gesättigte Ca(OH)₂-Lösung) eingeleitet.

Beobachtung

Die Brausetablette löst sich unter starker Gasentwicklung auf. Das entstandene Gas perlt durch das Kalkwasser (gesättigte Ca(OH)₂-Lösung) im Gärröhrchen und erzeugt dort nach kurzer Zeit eine weiße Trübung.

Deutung

Brausetabletten enthalten in der Regel Natriumhydrogencarbonat und Citronensäure in fester Form. Beim Auflösen in Wasser wird Kohlenstoffdioxid freigesetzt:



Erkennbar am deutlichen Aufsprudeln des Wassers, steigt die Kohlenstoffdioxid-Konzentration im Luftraum des Erlenmeyerkolbens an. Das entstandene CO₂-Gas wird aufgrund des erhöhten Partialdrucks durch das Glasrohr in die vorher klare Kalkwasser- (gesättigte Ca(OH)₂) Lösung im Gärröhrchen „gedrückt“ und fällt dort als weißer Niederschlag aus schwerlöslichem Calciumcarbonat (CaCO₃) aus.

Die Schülerinnen und Schüler gewinnen hier die Erkenntnis: Brausetabletten enthalten gebundenes Kohlenstoffdioxid. Diese Erkenntnis sollten sie aus Versuch 1 (CO₂-Nachweis mit Kalkwasser) ableiten können.

Erklärung zum Versuch 3: Nachweis von Kohlenstoffdioxid in der Atemluft und in der Umgebungsluft

Dieser Versuch soll den Schülerinnen und Schülern den Zusammenhang zwischen Kohlenstoffdioxid und Lebewesen demonstrieren. Ziel ist zu erkennen, wie Lebewesen (der Mensch) durch ihre Stoffwechsellleistungen („Veratmung“ von Kohlenhydraten) Kohlenstoffdioxid produzieren und freisetzen. Im Experiment wird aus diesem Grund menschliche Atemluft mit Hilfe eines Luftballons aufgefangen und in Kalkwasser (gesättigte Ca(OH)₂) eingeleitet.

Zusätzlich werden noch die Anteile von CO₂ in menschlicher Atemluft und Umgebungsluft verglichen, indem man das Experiment mit einer Ballonpumpe statt Aufblasen des Ballons wiederholt.

Beobachtung

Bei der Atemluft stellt sich eine Trübung des Kalkwassers nach einer Ballonfüllung (ca. 200 mL) ein, während bei der Umgebungsluft ca. 5 Ballonfüllungen (800-1000 mL) benötigt werden.

Deutung

Da die SchülerInnen im Experiment zuvor den Nachweis für Kohlenstoffdioxid mit Hilfe der Kalkwasserprobe kennengelernt haben, gelingt es ihnen, den Schluss zu ziehen, dass menschliche Atemluft (Ausatemluft) erwartungsgemäß mehr Kohlenstoffdioxid enthält als Umgebungsluft (Einatemluft) (s. auch Tab. 1). Aus dem Verhältnis der für einen

positiven CO₂-Nachweis erforderlichen Volumina gewinnen sie neben diesem verbreiteten qualitativen Wissen auch einen quantitativen Eindruck. Daraus können Sie folgern, dass durch die Anwesenheit vieler Menschen in einem geschlossenen Raum die CO₂-Konzentration auf Kosten des Sauerstoffs relativ schnell steigt und somit ein Durchlüften nötig ist.

Tab. 1: Zusammensetzung der Umgebungsluft (Einatemluft) und Ausatemluft¹⁰

Bestandteile	Einatemluft (Vol %)	Ausatemluft (Vol %)
Sauerstoff	21	17
Kohlenstoffdioxid	0,04	4,3
Stickstoff	78	78
Edelgase	~ 1	~ 1

Erklärung zum Versuch 4: Nachweis von Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsgas

Die Schülerinnen und Schüler sollen in diesem Versuch Kohlenstoffdioxid als Verbrennungsgas nachweisen. Dazu wird das Gas mit Hilfe eines über die Kerzenflamme gehaltenen Reagenzglases aufgefangen und mit Hilfe von Kalkwasser nachgewiesen.

Beobachtung

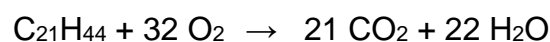
Zunächst beschlägt das Reagenzglas und nach Zugabe von Kalkwasser entsteht eine weiße Trübung.

Deutung

Bei der Verbrennung von Kerzenwachs an der Luft entsteht neben Kohlenstoffdioxid auch Wasser (Wasserdampf). Erkennbar wird dies für die Schülerinnen und Schüler durch das Beschlagen des Reagenzglases.

Als Wachs bezeichnet man die Ester langkettiger Fettsäuren und Alkohole. Diese stoffliche Definition trifft nur auf Bienenwachs zu, wurde aber auch für andere Brennmassen von Kerzen übernommen. Als solche eignen sich neben Bienenwachs auch Stearin und das preiswerte Paraffin. 90 % der Kerzenproduktion in Europa ist aus Paraffin. Hartparaffin wird aus Erdöl gewonnen und gehört zu den Kohlenwasserstoffen (C_nH_{2n+2}). Für Hartparaffine ist n ca. 20-42.

Der Kohlenstoffanteil des Wachses wird vom Luftsauerstoff zu Kohlenstoffdioxid oxidiert (Oxidation: Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff), z.B.:



Der Nachweis des CO₂ gelingt anschließend mit dem Kalkwasser zu schwerlöslichem Calciumcarbonat (CaCO₃), welches als weißer Niederschlag ausfällt. Am positiven CO₂-Nachweis erkennen die Schülerinnen und Schüler, dass bei einer Verbrennung von organischem Material CO₂ entsteht. Das Kerzenwachs ist dabei nur als Beispiel zu sehen und soll von den Schülerinnen und Schülern auch auf andere Verbrennungsvorgänge übertragen werden. Auch in Motoren werden Treibstoffe ähnlicher chemischer Struktur verbrannt (s. Versuch „Nachweis von Kohlenstoffdioxid in Autoabgasen“), die in Bewegungsenergie umgesetzt werden. Ebenso dienen Verbrennungsvorgänge auch anderen Formen der Energiegewinnung.

Der große Energieverbrauch der Industriestaaten insgesamt ist Hauptverursacher des hohen Kohlenstoffdioxid-Ausstoßes (Abb. 2). Die Förderung und Verbrennung von Kohle, Erdgas und Erdöl setzt darüber hinaus Stickstoffoxide frei, die teils aus den organischen Stickstoffverbindungen von Kohle und Schweröl, bei hohen Temperaturen (Benziner, Diesel) aus dem Stickstoff der Luft entstehen. Diese Ressourcen wachsen nicht nach und werden irgendwann aufgebraucht sein. Bei der Verbrennung werden zudem Feinstaub und Schwermetalle freigesetzt, die über Luft, Nahrung und belastetes Trinkwasser den menschlichen Körper erreichen – mit erheblichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ¹¹.

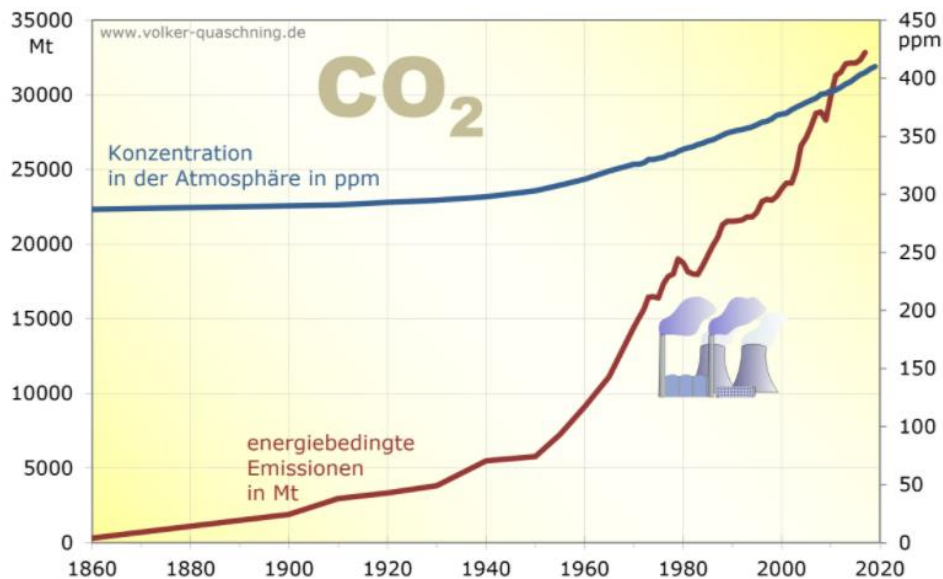


Abb. 2: Entwicklung der weltweiten energiebedingten Kohlenstoffdioxidemissionen. Mit freundlicher Erlaubnis von Prof. Dr. Volker Quaschnig, Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin, FB1 - Regenerative Energien.¹²

Die Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre führt zum anthropogen verursachten Treibhauseffekt (Näheres dazu s. Versuch „Erderwärmung – Erwärmung durch Treibhausgase“). Kraftstoffe aus Pflanzenölen bzw. Energie aus Biomassevergasung und Biomasseverbrennung besitzen gegenüber den fossilen Brennstoffen den Vorteil, dass die kurzfristige CO₂-Bilanz ausgeglichen ist. Nur das CO₂, das die Pflanzen in der vorangegangenen Vegetationsperiode für ihr Wachstum aufgenommen haben, wird wieder freigesetzt. Hinzu kommt allerdings der Energiebedarf für Anbau, Transport und Verarbeitung, der ebenfalls mit CO₂-Produktion verbunden ist. „CO₂-neutral“ gibt es nicht, betrachtet man nicht nur isolierte Kreisläufe. Fossile Brennstoffe sind zwar ebenfalls aus pflanzlichem Material entstanden, dies aber über Millionen von Jahren, so dass die Zeitachse der Entstehung und des Verbrauchs hier um Größenordnungen auseinanderklaffen. Sie sind aber im Vergleich zur frischen Biomasse chemisch reduziert und dehydratisiert und besitzen folglich einen deutlich höheren C-Gehalt (C-Gehalt in Cellulose: 44 % (w/w), C-Gehalt in hochmolekularen Alkanen: 85 % (w/w) und Brennwert.

Entsprechend liegt der Heizwert von lufttrockenem Holz und Stroh bei ca. 15 bzw. 17 MJ/kg (1 MJ/kg = 1000 kJ/kg), während er für fossile Brennstoffe wie Holzkohle mit 28-35 MJ/kg und Steinkohle mit 25-32,7 MJ/kg etwa doppelt so hoch oder im Falle von erdölbasiertem Paraffin, Diesel und Heizöl mit 42,6 MJ/kg noch höher liegt.¹³

Der effizienteste Weg, den CO₂-Ausstoß zu verringern, besteht darin, die Verbrennung organischen Materials zu reduzieren. Transformation von Energie, z.B. chemische in Bewegungsenergie, verläuft immer mit Wirkungsgraden <1.

Die weltweit größten CO₂-Emittenten sind China, die USA, die EU, Indien, Russland und Japan (Abb. 3). Im Jahr 2018 war **China** mit einem Anteil von rund 28 % an den globalen Kohlenstoffdioxid-Emissionen der **weltweit größte CO₂-Emittent** ¹⁴. Gegenüber dem Jahr 1990 erhöhte sich die Emissionsmenge um mehr als das Vierfache, woran der hohe Kohleverbrauch Chinas einen großen Anteil hatte. ¹⁵ Der Pro-Kopf-Anteil des CO₂-Ausstoßes war aber mit rund 7,2 t noch vergleichsweise gering (Abb. 4). An zweiter Stelle standen 2018 mit rund 15 % die **USA**, die von den größten CO₂-Verursachern weltweit die höchste Pro-Kopf-Emission von CO₂ mit rund 16 t im Jahr 2017 hatten. ^{14,16} Indien stand noch vor Russland an dritter Stelle was die Gesamtemission von CO₂ eines Landes angeht, hatte aber 2017 von den 6 größten CO₂-Emittenten weltweit mit 1,8 t den mit Abstand geringsten Ausstoß von CO₂ pro Einwohner. In Indien gab es jedoch mit gut 330 % Erhöhung im Jahr 2018 gegenüber 1990 den größten Zuwachs bei der CO₂-Emission, dicht gefolgt von China mit fast 316 % mehr im Jahr 2018 gegenüber 1990 sowie Iran und Saudi-Arabien mit rund 245 % und 236 % Zuwachs ¹⁵. Deutschlands Anteil an den weltweiten CO₂-Emissionen lag zuletzt bei rund 2 % ¹⁴. Allerdings war die Pro-Kopf-CO₂-Emission 2017 mit 9,6 t deutlich höher als in China mit 7,2 t ¹⁶.

Betrachtet man **nur die Pro-Kopf-Emission von CO₂** fällt auf, dass Einwohner von Katar im Jahr 2017 durchschnittlich rund 30,4 Tonnen Kohlenstoffdioxid verursachten und damit weltweit an der Spitze standen. Im Vergleich dazu war der Pro-Kopf-CO₂-Ausstoß von US-Amerikanern mit 15,7 Tonnen etwa halb so hoch. Auch andere arabische Länder standen gleich hinter Katar ganz oben, was die CO₂-Emission pro Einwohner betrifft. ¹⁷

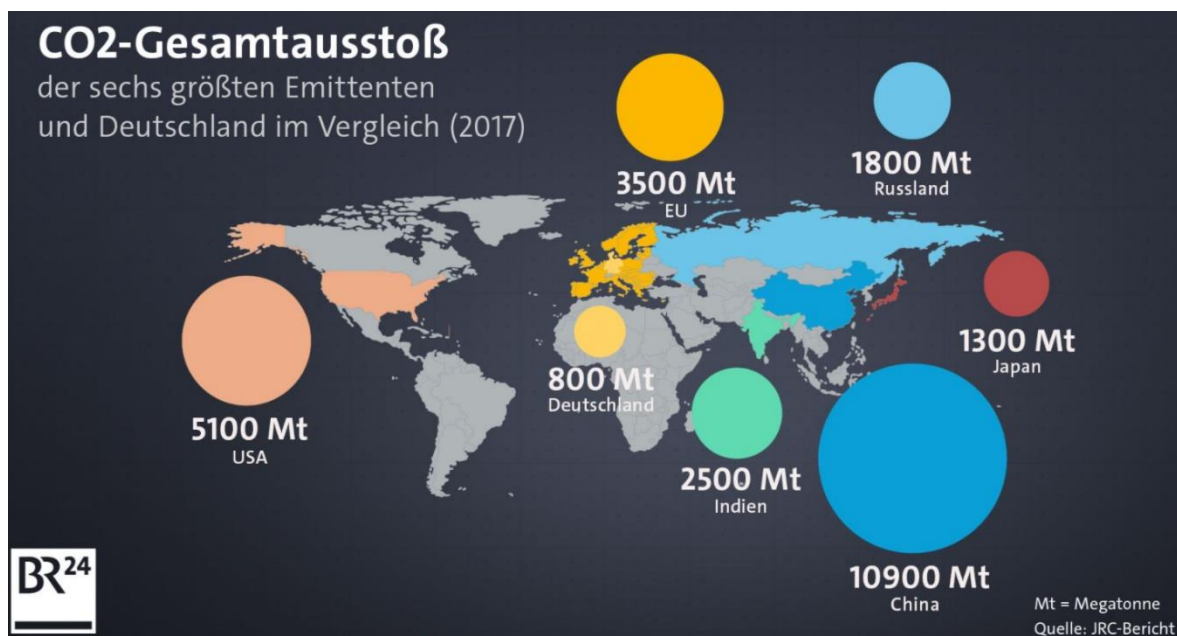


Abb. 3: CO₂-Gesamtausstoß der 6 größten CO₂-Emittenten weltweit und Deutschland im Jahr 2017. Mit freundlicher Erlaubnis von Astrid Fechter, Bayerischer Rundfunk, Redaktion BR24. ¹⁶

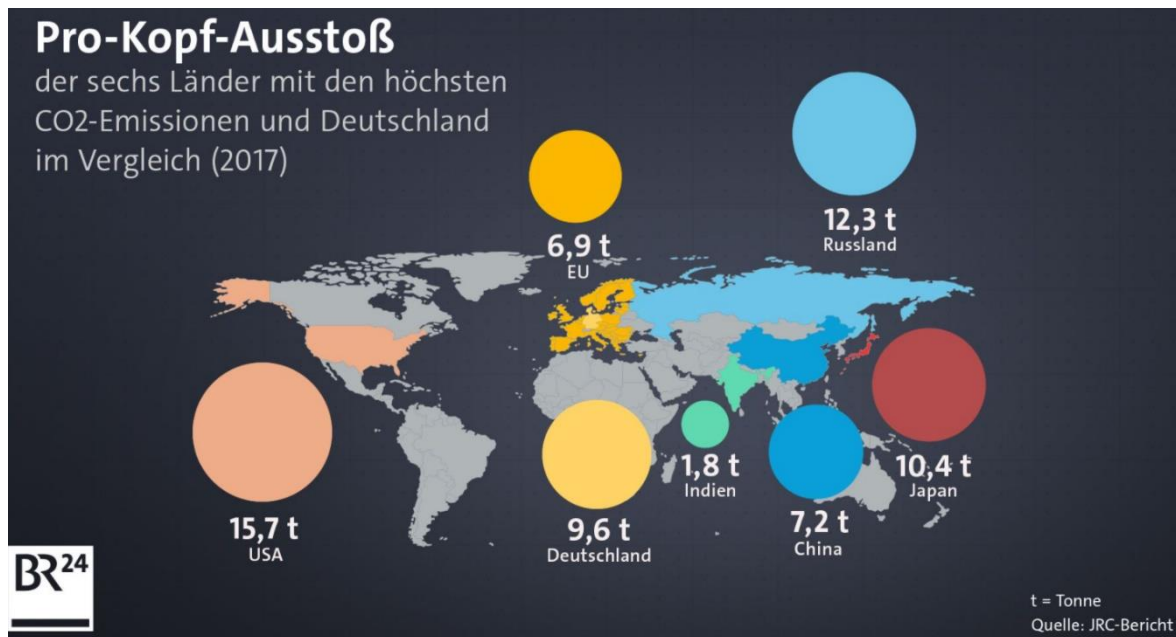


Abb. 4: CO₂-Pro-Kopf-Ausstoß der 6 größten CO₂-Emittenten weltweit und Deutschland im Jahr 2017. Mit freundlicher Erlaubnis von Astrid Fechter, Bayerischer Rundfunk, Redaktion BR24.¹⁶

Erklärung zum Versuch 5: Nachweis von Kohlenstoffdioxid in Autoabgasen

Kohlenstoffdioxid entsteht nicht nur bei der Atmung (Versuch 3) und beim Verbrennen von organischem Material (Verbrennung von Kerzenwachs, Versuch 4), sondern ist auch zu knapp 90 % in Autoabgasen enthalten¹⁸. Hier wird Benzin oder Diesel verbrannt, also in erster Linie flüssige Kohlenwasserstoffe mit niedrigen C-Zahlen.

Im letzten Versuch sollen die Schülerinnen und Schüler Kohlenstoffdioxid in Autoabgasen nachweisen. Für dieses Experiment können Autoabgase mit Hilfe eines Plastikbeutels (Abgasbeutel, möglichst luftleer), der mit den Händen möglichst dicht um den Auspuff gehalten wird, aufgefangen werden. Am besten geeignet sind die Abgase eines gerade gestarteten Autos, da dann der Katalysator wegen der geringen Temperatur noch nicht arbeitet und so die Konzentration an Schadstoffen höher ist. Der Nachweis wird dadurch erleichtert. Außerdem ist der Auspuff zu dieser Zeit noch kalt. Wenn machbar, sollten die Autoabgase mit den Schülerinnen und Schülern gemeinsam aufgefangen werden. In der Vorschrift werden sie jedoch bereitgestellt.

Zum Nachweis von Kohlenstoffdioxid in den Abgasen wird mit Hilfe einer Kunststoffspritze die Gasmenge direkt in das Kalkwasser (gesättigte Ca(OH)₂-Lösung) eingeleitet (s. Versuch 1, CO₂-Nachweis). Dabei ist es sinnvoll, eine große Spritze (100 mL) zu verwenden, da andernfalls mehrere Wiederholungen des Vorgangs nötig sind.

Beobachtung

Das Kalkwasser trübt sich nach ca. 1-2 Spritzenfüllungen. Das entspricht etwa 100 bis 200 mL Gasvolumen.

Deutung

Die Schülerinnen und Schüler haben im Experiment zuvor den Nachweis für Kohlenstoffdioxid mit Hilfe der Kalkwasserprobe kennengelernt. Daher können sie nun den Schluss ziehen, dass in Autoabgasen CO₂ enthalten ist.

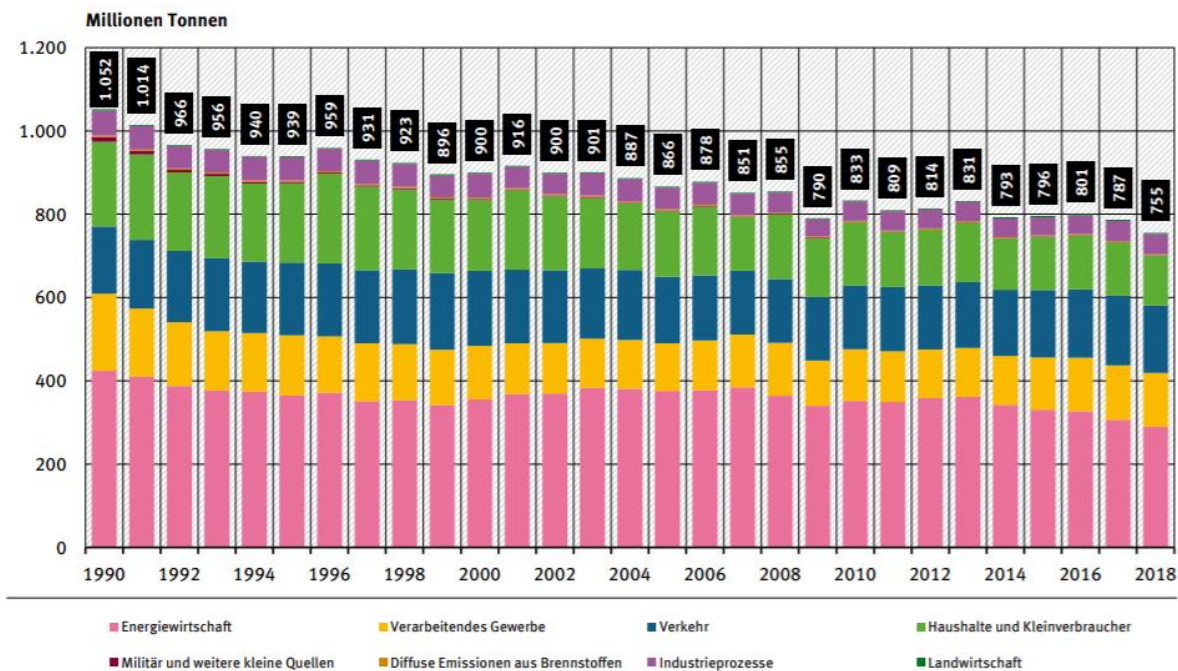
Begleitend zu dem Experiment kann im Unterricht die Verwendung von fossilen Energieträgern in Autos (Lkw, Flugzeugen, Frachtern und zur Strom- und Wärmeerzeugung) diskutiert werden, deren Hauptproblem neben den begrenzten Ressourcen die Entstehung der Luftschadstoffe (insbesondere CO₂, CO, NO_x und SO₂) sind.

Unsere Mobilität ist ein großer Verursacher von Treibhausgasen (dem Umweltbundesamt zufolge nach der Energiewirtschaft – wie auch Strom- und Wärmeerzeugung für Haushalte - der zweitgrößte CO₂-Verursacher im Alltag, Abb. 5) und somit des vom Menschen verursachten Klimawandels.

Pkw und Lkw emittieren heute aufgrund von strengeren Vorschriften bezüglich Abgaschadstoffen, Katalysatoren und verbesserten Motorwirkungsgraden im Durchschnitt weniger Treibhausgase und Luftschadstoffe als noch 1995. So sanken die kilometerbezogenen Emissionen von CO₂ im Schnitt bei Pkw um 9 %, bei Lkw um fast 33 %¹⁹. Jedoch ist durch den zunehmenden Verkehr der gesamte Schadstoffausstoß weiterhin angestiegen und die durch technische Verbesserungen der Fahrzeuge erreichten Erfolge im Klima- und Umweltschutz wurden zum Teil mehr als kompensiert. So hat allein der Pkw-Verkehr zwischen 1995 und 2018 um knapp 14 % zugenommen, so dass die gesamten CO₂-Emissionen des Pkw-Verkehrs in diesem Zeitraum um 3,7 % angestiegen sind, obwohl die kilometerbezogenen Emissionen um rund 9 % verringert wurden. Und weil auch mehr Lkw unterwegs sind, sind die absoluten CO₂-Emissionen im Straßengüterverkehr heute um 22 % höher als 1995¹⁹.

Fliegen ist dabei die klimaschädlichste Art der Mobilität. So verursacht ein Hin- und Rückflug von Deutschland auf die Malediven bei einer Entfernung von 2 x 8.000 km pro Person eine Klimawirkung von über fünf Tonnen CO₂. Mit einem Mittelklassewagen könnte man dafür mehr als 25.000 km fahren¹¹.

Emissionen von Kohlendioxid nach Kategorien



Kohlendioxid-Emissionen: ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
 Verkehr: ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr
 Haushalte und Kleinverbraucher: mit Militär und weiteren kleinen Quellen (u.a. land- und forstwirtschaftlichem Verkehr)
 Quelle: Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2018 (Stand 12/2019)

Abb. 5: Entwicklung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Deutschland nach Sektoren (1990-2018)²⁰

Quellen

1. https://www.de-ipcc.de/media/content/SR1.5-SPM_de_barrierefrei.pdf (Zugriff am 6.10.2020)
2. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/klima-treibhauseffekt#grundlagen> (Zugriff am 01.08.2020)
3. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#beitrag-langlebiger-treibhausgase-zum-treibhauseffekt>
4. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
5. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/beobachtete-kuenftig-zu-erwartende-globale#-ergebnisse-der-klimaforschung-> (Zugriff am 9.11.2020)
6. http://de.wikipedia.org/wiki/Aerobe_Atmung (Zugriff am 24.07.2020)
7. <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/so-eine-grosse-wirkung-hat-so-wenig-co2/> (Zugriff am 9.11.2020)
8. <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid> (Zugriff am 30.07.2020)
9. „Der Kohlensäure auf der Spur“. CHEMKON 2011, 18, 92
10. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/biologie-abitur/artikel/atembewegungen> (Duden) (Zugriff am 24.07.2020)
11. <https://www.oeko-planet.com/magazin/klimawandel-ursachen-folgen-und-was-wir-dagegen-tun-koennen/> (Zugriff am 01.08.2020)
12. <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2/index.php> (Zugriff am 9.11.2020)
13. <https://de.wikipedia.org/wiki/Heizwert> (Zugriff am 16.10.2020)
14. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/179260/umfrage/die-zehn-groessten-co2-emittenten-weltweit> (Zugriff am 02.08.2020)
15. <https://de.statista.com/infografik/18287/co2-emissionen-in-ausgewaehlten-laendern/>(Zugriff am 09.10.2020)
16. <https://www.br.de/nachrichten/wissen/klimawandel-die-wichtigsten-co2-fakten-visualisiert,RbqFZV0>. Bildrechte Bayerischer Rundfunk ©BR24 (Zugriff am 9.11.2020)
17. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167877/umfrage/co2-emissionen-nach-laendern-je-einwohner> (Zugriff am 16.10.2020)
18. http://www.klassenarbeiten.de/referate/chemie/autoabgase/autoabgase_69.htm (Zugriff am 30.07.2020)
19. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs> (Zugriff am 10.11.2020)
20. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/3_abb_emi-kohlendi-oxid-kat_2020.pdf (Zugriff am 9.11.2020)