



B1 Die Stalaktiten und Stalagmiten in Tropfsteinhöhlen haben sich in Millionen Jahren gebildet.



B2 Mineralwasser gibt es „ohne“, „mit wenig“ und „mit viel“ Kohlensäure, „Sprudelwasser“ aus dem Automaten. **A:** Öffnen Sie eine neue Flasche Mineralwasser mit viel „Kohlensäure“ und beobachten Sie. Verschließen Sie die Flasche wieder und beobachten Sie weiter. Erklären Sie Ihre Beobachtungen.

¹ Der Stempel muss mit Siliconöl eingeschmiert werden, damit die Spritze leichtgängig ist.

Tropfsteinhöhlen im Zeitraffer

Versuche

V1 Ziehen Sie in eine 100-mL-Spritze¹ 30 mL Kohlenstoffdioxid und 70 mL Wasser, das Sie zuvor mit einigen Tropfen Bromthymolblau-Lösung* versetzt haben. Verschließen Sie die Spritze und schütteln Sie vorsichtig, bis sich das Volumen in der Spritze nicht mehr ändert. Wiederholen Sie den Versuch mit Luft statt Kohlenstoffdioxid.

V2 Wiederholen Sie V1 mit Wasser verschiedener Temperaturen (von 0 °C bis 50 °C).

V3 Nehmen Sie die Spritze aus V1 und verringern Sie den Druck, indem Sie das Volumen in der verschlossenen Spritze durch Herausziehen des Stempels vergrößern. Erhöhen Sie danach den Druck durch Hineindrücken des Stempels.

V4 Füllen Sie in ein Rggl. 10 mL frische, gesättigte Calciumhydroxid-Lösung*. Leiten Sie nun in diese Lösung über ein zur Spitze ausgezogenes Glasrohr Kohlenstoffdioxid-Gas ein*. Leiten Sie das Gas so lange ein, bis sich die zunächst gebildete Suspension wieder auflöst.

V5 Geben Sie einige Milliliter der klaren Lösung aus V4 in ein Reagenzglas und erhitzen Sie die Lösung über dem Bunsenbrenner.

Auswertung

a) Erklären Sie, was die Verfärbung des Indikators in V1 und in V2 jeweils anzeigt.

b) Mineralwasser enthält oft „Kohlensäure“. In der molekularen Form H_2CO_3 ist „Kohlensäure“ nicht beständig, sie liegt in Wasser vor allem als physikalisch gelöstes Kohlenstoffdioxid $\text{CO}_2(\text{aq})$ und ionisiert zu Hydrogencarbonat-Ionen HCO_3^- und Oxonium-Ionen H_3O^+ vor.

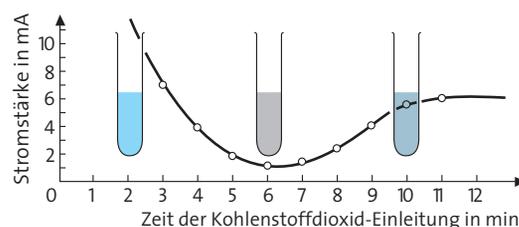


Beschreiben Sie, welche Erkenntnisse Sie durch V1 und V2 bezüglich der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser gewinnen können.

c) Erläutern Sie die Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser anhand der Beobachtungen aus V3 und der Gleichgewichtsreaktionen (1) und (2).

d) Erläutern Sie die anfängliche Trübung in V4 mit einer Reaktionsgleichung.

e) Durch das fortgesetzte Einleiten von Kohlenstoffdioxid in V4 bildet sich nach einiger Zeit lösliches Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Formulieren Sie die zugehörige Reaktionsgleichung.



B3 Misst man während der Kohlenstoffdioxid-Einleitung in V4 die Stromstärke, kann man die im Diagramm aufgeführten Messwerte beobachten. **A:** Erläutern Sie die Änderung der Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit.

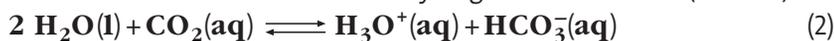


Der Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislauf in der Natur

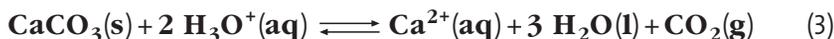
Tropfsteinhöhlen sind eindrucksvolle Beweise eines natürlichen Stoffkreislaufs, an dem vor allem **Kalkstein**, **Calciumcarbonat CaCO_3** , und Kohlenstoffdioxid **CO_2** beteiligt sind (B1). Die Prozesse dieses „natürlichen“ **Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislaufs (Kalk-Kreislaufs)** laufen in kalksteinhaltigen Gesteinsschichten über Millionen von Jahren hinweg ab. Durch die Versuche V1 bis V5 werden sie wie „im Zeitraffer“ modelliert.

Am Beginn des Kreislaufs steht Wasser, in dem sich Kohlenstoffdioxid gelöst hat und das durch das kalkhaltige Gestein sickert. Bei 20 °C lösen sich 88 mL/L bzw. 1,73 g/L Kohlenstoffdioxid in Wasser. Die Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser ist abhängig von der Temperatur und vom Druck (V2, V3), was mit dem Prinzip von LE CHATELIER zu erklären ist.

Die unterschiedlich gute Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser beobachtet man, wenn man einen „Sprudelautomaten“ nutzt und Mineralwasser trinkt (B2). Liest man auf den Mineralwasserflaschen „mit Kohlensäure versetzt“, ist das irreführend, da das in Wasser gelöste Kohlenstoffdioxid nur zu 0,2% als **Kohlensäure H_2CO_3** vorliegt. Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Oxonium-Ionen und Hydrogencarbonat-Ionen (Ausw. b):



Bei dem natürlichen Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislauf dringt nun mit Kohlenstoffdioxid angereichertes Wasser in die kalksteinhaltigen Gesteinsschichten ein und löst dort Calciumcarbonat:

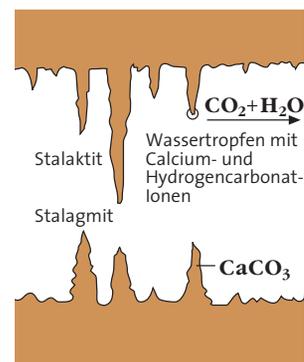


Über Millionen von Jahren führte dieser Prozess im Gestein zur Entstehung von Hohlräumen. Die Bildung von löslichem **Calciumhydrogencarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$** aus vorher ausgefälltem Calciumcarbonat demonstriert V4. Wenn man Kohlenstoffdioxid in Kalkwasser einleitet, bildet sich zunächst fein verteiltes Calciumcarbonat (Trübung). Leitet man weiter Kohlenstoffdioxid ein, klart sich die Suspension wieder auf. Es hat sich Calciumhydrogencarbonat gebildet, dessen Löslichkeit in Wasser größer ist:



Die Bildung der Tropfsteine ist auf die Umkehrung der Reaktion (4) zurückzuführen. Die Calciumhydrogencarbonat-Lösung verdunstet langsam, so dass auch Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird. Das ausgefällte Calciumcarbonat lässt die Stalagmiten und Stalaktiten wachsen (B1, B4), allerdings mit einer Geschwindigkeit von nur 8 bis 15 mm in 100 Jahren.

Die Reaktionen (1) bis (4) zeigen Gleichgewichte, die am Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislauf beteiligt sind (A1). Sie sind innerhalb des Kreislaufs miteinander **gekoppelt**. Eine erhöhte Konzentration an physikalisch gelöstem Kohlenstoffdioxid im Wasser bewirkt eine Verschiebung des Gleichgewichts (2) nach rechts. Die stärker saure Lösung beeinflusst wiederum die Lösung von Kalk nach Gleichung (3). Änderungen in den äußeren Bedingungen (Druck, Temperatur, pH-Wert) oder Konzentrationsänderungen von beteiligten Stoffen wirken sich bei solchen **gekoppelten Gleichgewichten** auf die Zusammensetzung aller Stoffe im Kreislauf aus.



B4 Modell zur Bildung der Stalaktiten und Stalagmiten in einer Tropfsteinhöhle. **A:** Schauen Sie sich die Animation zur Entstehung der Tropfsteinhöhlen in Chemie 2000+ Online an. Geben Sie an, welche Prozesse in Tropfsteinhöhlen mit den Versuchen V1 bis V5 modelliert werden.

Aufgabe

A1 Stellen Sie die Reaktionsgleichungen (1) bis (4) analog zu B6, S. 117, als natürlichen Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislauf dar.

Fachbegriffe

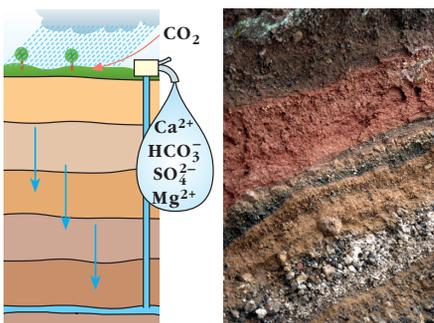
Kalkstein, Calciumcarbonat, Kohlenstoffdioxid-Carbonat-Kreislauf, natürlicher Kalk-Kreislauf, Kohlensäure, Calciumhydrogencarbonat, gekoppelte Gleichgewichte

Wasser ist nicht gleich Wasser

Versickerendes Wasser enthält Kohlenstoffdioxid.

Auf dem Weg durch den Boden löst es Kalk und andere Mineralien.

Die gelösten Mineralien gelangen in das Trinkwasser und machen es „hart“.



B1 Die verschiedenen Gesteinsschichten in der Quellregion beeinflussen die Zusammensetzung und den Gehalt an Ionen in einem Mineralwasser. **A:** Ermitteln Sie anhand der Etiketten Art und Menge der Ionen in verschiedenen Mineralwassersorten.

Mineralwasser, Wasserhärte und Entkalker

Chemisch reines Wasser wäre für unsere Ernährung ungeeignet. Die im Trinkwasser gelösten Salze sind lebenswichtige Mineralstoffe, die dem Körper zugeführt werden müssen (B1).

Natürliches Mineralwasser „mit Sprudel“ entsteht, wenn mineralstoffreiches Wasser mit Kohlenstoffdioxid aus dem Erdinneren angereichert wird. Viele Quellorte liegen in Regionen vulkanischen Ursprungs. Das im Wasser gelöste Kohlenstoffdioxid entstammt der unterirdischen vulkanischen Aktivität. Sickert das kohlenstoffhaltige Wasser durch mineralstoffreiche Gesteinsschichten, lösen sich Ionen im Wasser.

Die Ionen verursachen die sog. **Härte des Wassers**. Die Wasserhärte wird durch Calcium-, Magnesium-, Hydrogencarbonat- und Sulfat-Ionen hervorgerufen und in der Einheit Grad deutscher Härte $^{\circ}d$ angegeben. $1^{\circ}d$ entspricht 10 mg Calciumoxid in 1 L Wasser (0,1783 mmol **CaO** pro Liter Wasser).

Hartes Leitungswasser führt im Haushalt und in der Industrie zu Problemen, weil sich beim Erwärmen von hartem Wasser Calciumcarbonat absetzt (B2). Solche Ablagerungen werden als **Kesselstein** bezeichnet und führen zum Verschleiß z. B. von Heizstäben in Waschmaschinen, Geschirrspülern und Wasserkochern.

Um Wasserhähne und die Heizflächen des Wasserkochers von Kalk zu befreien, können Säuren wie Essigsäure-Lösung oder Citronensäure-Lösung verwendet werden.



B2 Im Gegensatz zu Tropfsteinen bilden sich die Kalkablagerungen an Haushaltsgeräten schnell. **A:** Erläutern Sie anhand der Gleichgewichtsreaktionen auf S. 121, warum Warm- und Kaltwasserhähne unterschiedlich schnell verkalken.

Durch die Behandlung des Wassers mit einem Ionenaustauscher können die Ionen, die die Härte verursachen, aus dem Wasser entfernt werden (vgl. *Chemie 2000+ Online*).

Versuche

V1 a) Versetzen Sie auf einem Uhrglas verschiedene Gesteinsproben, Muscheln, Marmor und Calciumcarbonat mit wenigen Tropfen Salzsäure*, $c = 2 \text{ mol/L}$.

b) Geben Sie in einem Reagenzglas zu einer kleinen Portion kalkhaltigen Gesteins bzw. Muscheln einige Tropfen Salzsäure*, $c = 2 \text{ mol/L}$, und verschließen Sie das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen mit gewinkelttem Glasrohr. Leiten Sie das entstehende Gas in Kalkwasser ein.

V2 Führen Sie V1a) mit Essigsäure-Lösung*, Citronensäure-Lösung* und Klarspüler* für die Geschirrspülmaschine durch.

Auswertung

a) Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für die Reaktion von Calciumcarbonat mit Salzsäure (V1).

b) Die Heftigkeit der Gasentwicklung in V1 kann als Maß für den Kalkgehalt gelten. Ordnen Sie die Proben aus V1 nach steigendem Kalkgehalt. Begründen Sie, warum für einen quantitativen Vergleich die Gesteinsbruchstücke gleich groß sein müssen.

c) Schauen Sie auf die Inhaltsstoffe des Klarspülers und erklären Sie die Klarspül-Wirkung.

Das Meer als CO₂-Senke



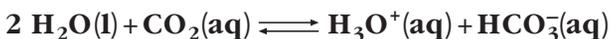
B1 Der Klimawandel hat auch Einfluss auf die Hydrosphäre, so dass das Ökosystem Meer aus dem Gleichgewicht gerät.

Der Kohlenstoffdioxid-Anteil in der Atmosphäre ist nachweisbar gestiegen und verstärkt den Treibhauseffekt (vgl. S. 105).

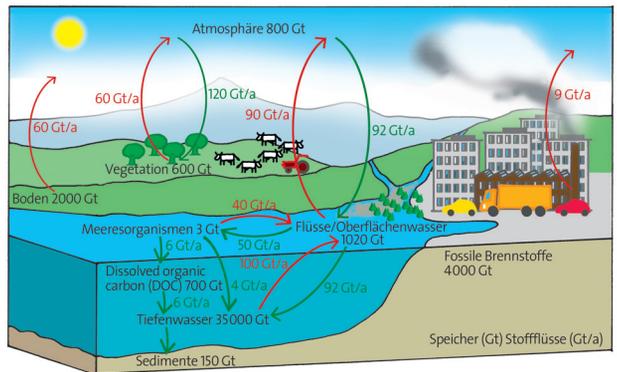
Durch die intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas) gleichen sich Vorgänge, die Kohlenstoffdioxid freisetzen (**CO₂-Quellen**) bzw. binden (**CO₂-Senken**) nicht mehr aus (B2).

Die Photosynthese und die Diffusion des Gases ins Meerwasser sind wichtige **CO₂-Senken**. Der größte Teil des Kohlenstoffdioxids wird durch die Photosynthese als organischer Kohlenstoff gebunden (vgl. S. 124f.). Die Meere sind an den Stoffkreisläufen des Kohlenstoffs beteiligt, indem sie Kohlenstoffdioxid aufnehmen: Vergleicht man die im Meerwasser und in der Atmosphäre gespeicherten Mengen an Kohlenstoffdioxid, dann ist im Meerwasser sogar 45-mal mehr Kohlenstoffdioxid gebunden als in der Atmosphäre.

Die Diffusion von Kohlenstoffdioxid ins Meerwasser bleibt nicht folgenlos, es kommt zu einer **Versauerung** des Meerwassers:



Da der pH-Wert im Meer $8,2 \pm 0,3$ beträgt, kann sich im Meerwasser mehr Kohlenstoffdioxid lösen als in einer neutralen Lösung. Seit Beginn der Industrialisierung ist der pH-Wert aber um 0,1 Einheiten gesunken, was einer Erhöhung der Oxonium-Ionenkonzentration von 30% entspricht. Diese Entwicklung beeinflusst wiederum die Gleichgewichte im Meerwasser, an denen Hydrogencarbonat-, Carbonat-Ionen und Kohlenstoffdioxid



B2 Stoffkreisläufe des Kohlenstoffs mit Angaben zu Stoffströmen und Speichern. **A:** Vergleichen Sie Vorgänge in der Atmosphäre und in der Hydrosphäre, die Kohlenstoffdioxid freisetzen (**CO₂-Quellen**) und die Kohlenstoffdioxid binden (**CO₂-Senken**). Begründen Sie, ob es zu einer Anreicherung von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre kommt.

(DIC, dissolved inorganic carbon) beteiligt sind, z. B. $\text{HCO}_3^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$. Dieses Gleichgewicht verschiebt sich durch die Versauerung auf die Seite der Edukte – mit gravierenden Folgen für die Tier- und Pflanzenwelt. Sind weniger Carbonat-Ionen im Wasser enthalten, verlangsamt sich das Wachstum der schützenden Schalen bzw. Panzer von Muscheln, Seeigeln, Korallen, Krebsen und anderen Schalentieren. Setzt sich die Entwicklung des anthropogenen Treibhauseffektes fort, muss sogar mit einem Lösen der Schalen und Panzer aus Calciumcarbonat gerechnet werden (vgl. Gleichung (3), S. 121). Dadurch wären die unter Naturschutz stehenden Korallenriffe bedroht, die nicht nur Lebensraum für unzählige Tierarten bieten, sondern auch Küstenschutz sind.

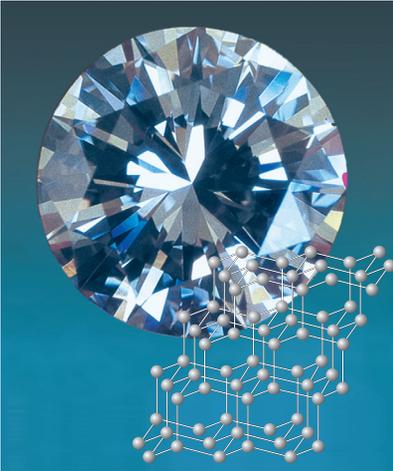
Aufgaben

A1 Erklären Sie, warum das Meerwasser am Äquator **CO₂-Quelle** und in den Polregionen **CO₂-Senke** ist. Informieren Sie sich auch über die Rolle des Golfstroms bei der Aufnahme von Kohlenstoffdioxid im Meerwasser (Stichwort: physikalische Kohlenstoffpumpe).

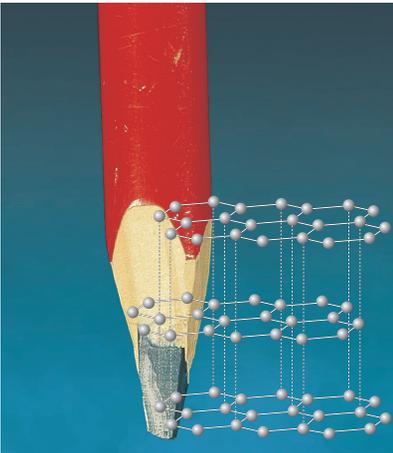
A2 Nennen Sie Faktoren, die die Löslichkeit und Aufnahme von Kohlenstoffdioxid ins Meerwasser begünstigen bzw. erschweren. Begründen Sie die Einflussnahme der genannten Faktoren.



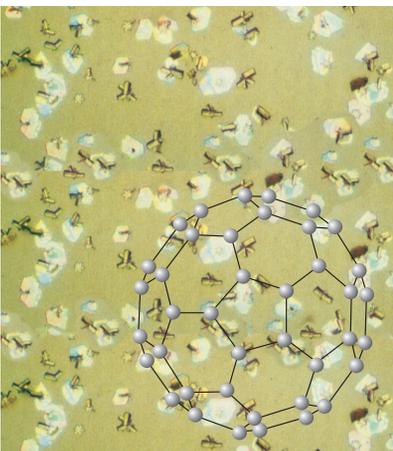
Diamant, Graphit & Co



B1 Diamant, als Brillant geschliffen, und Diamantgitter



B2 Graphit-Bleistift und Graphitgitter



B3 Fulleren-Kristalle und das einem Fussball ähnelnde Molekül des C_{60} -Fullerens

INFO

Zum Brillant geschliffen glitzert ein Diamant im Schmuckstück, während Graphit als schwarze Mine im Bleistift zum Schreiben genutzt wird.

Diamant und **Graphit** sind zwei seit langem bekannte **Modifikationen** desselben Elements, des **Kohlenstoffs**. Die unterschiedlichen Eigenschaften von Diamant und Graphit beruhen auf der Art und Weise, in der die Kohlenstoff-Atome am Aufbau dieser Modifikationen beteiligt sind.

Im **Diamantgitter** ist jedes Kohlenstoff-Atom durch vier Elektronenpaarbindungen (Einfachbindungen) an vier andere Kohlenstoff-Atome gebunden, die es tetraedrisch umgeben (B1). Daher ist Diamant sehr hart, farblos und leitet den elektrischen Strom nicht.

Im **Graphitgitter** bildet jedes Kohlenstoff-Atom formal zwei Einfachbindungen und eine Doppelbindung zu drei weiteren Kohlenstoff-Atomen aus, die alle in der gleichen Ebene liegen. Dies führt zur Bildung ebener Schichten, in denen die Kohlenstoff-Atome in Sechseringen angeordnet sind (B2). Wenn man nur die Einfachbindungen betrachtet, bleibt pro Kohlenstoff-Atom ein Valenzelektron übrig. Diese Elektronen bilden keine Elektronenpaare, die als Doppelbindungen zwischen je zwei Kohlenstoff-Atomen lokalisiert sind, sondern sind innerhalb einer Schicht zwischen allen Kohlenstoff-Atomen frei beweglich. Die einzelnen Schichten im Graphitgitter werden durch schwache VAN-DER-WAALS-Kräfte (vgl. S. 12) zusammengehalten. Dank dieser Struktur ist Graphit schwarz, weich und elektrisch leitfähig.

Erst im Jahr 1985 wurde eine weitere Modifikation des Elements Kohlenstoff entdeckt, die **Fullerene**. In Fulleren sind die Kohlenstoff-Atome nicht in so ausgedehnten Gittern wie im Diamant und Graphit angeordnet, sondern in relativ kleinen Molekülen. Das Molekül des bekanntesten Vertreters, des C_{60} -Fullerens, besteht aus 60 Kohlenstoff-Atomen, die wie in einem Fussball in aneinanderhängenden Fünfer- und Sechseringen angeordnet sind (B3). In ihnen liegen abwechselnd Einfach- und Doppelbindungen vor. C_{60} -Fulleren bildet gelbe, in unpolaren Lösemitteln lösliche Kristalle, die den elektrischen Strom nicht leiten.

Auswertung

- Mit Diamant kann man Glas schneiden, mit Graphit auf Papier schreiben. Erklären Sie mithilfe der Strukturmodelle, warum Diamant sehr hart ist, Graphit dagegen relativ weich.
- Stellen Sie Vermutungen über das Verhalten von Graphit, Diamant und Fulleren beim Erhitzen in einer Sauerstoff-Atmosphäre auf und begründen Sie ihre Vermutungen.
- Vergleichen Sie die Strukturen in den Kohlenstoff-Modifikationen Diamant, Graphit und C_{60} -Fulleren hinsichtlich der Bindungsarten in den Gittern bzw. Molekülen.
- Erklären Sie, warum Graphit den elektrischen Strom leitet, Diamant und C_{60} -Fulleren dagegen nicht.

Nanomaterialien aus Kohlenstoff

Wenn ein Feststoff, z. B. aus Kohlenstoff, immer weiter zerkleinert wird, gelangt man zu kleinen Teilchen, die in mindestens einer räumlichen Ausrichtung kleiner als 100 Nanometer ($1 \text{ Nanometer nm} = 10^{-9} \text{ m}$) sind. Materialien aus solchen Teilchen, aus **Nanopartikeln**, bezeichnet man als **Nanomaterialien (nanostrukturierte Materialien)**.

Materialien aus C_{60} -Kohlenstoff (B3) oder anderen **Fullerenen** sind Nanomaterialien aus Nanopartikeln, die in allen drei Raumdimensionen weniger als 100 nm messen.

Kohlenstoff-Nanoröhrchen sind nadelförmige Kristalle (B4). Die Durchmesser der Nanoröhrchen betragen nur ca. 1 nm, ihre Länge kann aber einige Mikrometer oder sogar einige Millimeter erreichen. Die Bindungen zwischen den Kohlenstoff-Atomen in einem Nanoröhrchen sind ähnlich wie im Graphit (*INFO*). Wenn eine Schicht solch eines honigwabentartigen Kohlenstoffgitters nahtlos zusammengerollt wird, entsteht ein einwandiges Röhrchen wie in B4. Es kann auch zur Ausbildung mehrwandiger Röhrchen kommen, wenn sich mehrere Schichten dieses Gitters entsprechend zusammenrollen.

Graphene sind Nanomaterialien aus Kohlenstoff, bei denen nur die Dicke eines Graphen-Nanopartikels im Größenbereich der Nanometer ist, die Länge und die Breite erreichen den Mikro- und Millimeterbereich (B5). Man kann sich die Graphene wie einzelne, aus Graphit herausgetrennte Atom-schichten vorstellen.

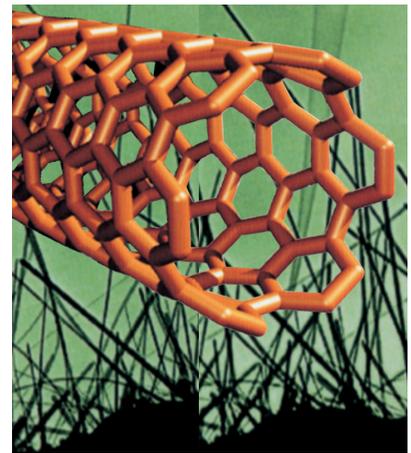
Was ist das Besondere an allen nanostrukturierten Materialien aus Kohlenstoff? Die Kohlenstoff-Atome, die ein Nanopartikel aufbauen, ganz gleich, ob es sich um ein Fulleren-Molekül, ein Nanoröhrchen oder ein Graphenplättchen handelt, liegen alle an der Oberfläche des Nanopartikels. Diese strukturelle Besonderheit bewirkt besondere optische und elektronische Eigenschaften, z. B. elektrische Leitfähigkeit und Transparenz. Materialien aus alle drei Formen von Nano-Kohlenstoff finden daher Anwendungen in modernen Technologien, z. B. beim Bau von Transistoren, Solarzellen und Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

Aufgaben

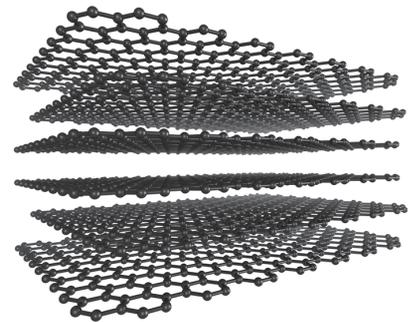
A1 Nanoröhrchen und Graphene leiten den elektrischen Strom, jedoch nur in bestimmte Richtungen. Erläutern und begründen Sie den Sachverhalt.

A2 Wird Graphit im Vakuum mit energiereichen Laserstrahlen „zerschossen“, so bilden sich Fullerene, Kohlenstoff-Nanoröhrchen und Graphene. Begründen Sie, warum man bei der Herstellung dieser Nanomaterialien aus Kohlenstoff von Graphit und nicht von Diamant ausgeht.

A3 Recherchieren Sie im Internet die Anwendung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen bei Werkstoffen für Tennisschläger und für Flugzeuge. Erläutern Sie, welche Eigenschaften der Nanoröhrchen dafür von Bedeutung sind.



B4 Kristalle aus Kohlenstoff-Nanoröhrchen und Strukturmodell



B5 Strukturmodell von Graphenplättchen



B6 Dach aus organischen Solarzellen mit Fullerenen

Fachbegriffe

Diamant, Graphit, Fullerene, Nanomaterialien (nanostrukturierte Materialien), Nanopartikel, Nanoröhrchen, Graphene



Zucker, Stärke und Verwandte



Feiner
BUTTER-KEKS
für Diabetiker

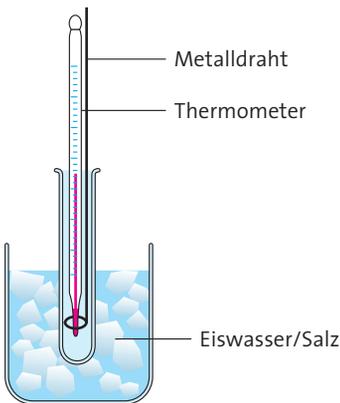
nur mit Fruchtzucker gesüßt
Zur besonderen Ernährung bei Diabetes mellitus im Rahmen eines Diätplanes geeignet.

Zutaten: Weizenmehl, Zuckeraustauschstoff Fructose, Butterfett mit Vanillin, Süßmilchpulver, Backtriebmittel (Natriumcarbonat, Ammoniumhydrogencarbonat), Salz, Aroma, Säuerungsmittel Citronensäure.

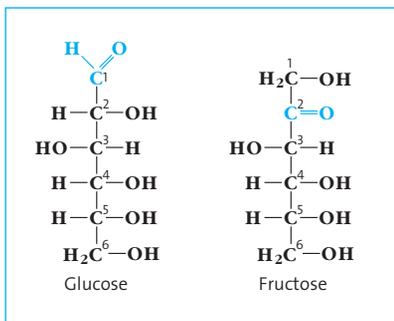
Analyse:	per 100 g	pro Stück
Energiewert	1838 kJ (436 kcal)	123 kJ (29 kcal)
Eiweiß	8 g	0,5 g
Kohlenhydrate	74 g	5,0 g
davon Zuckeraustauschstoff Fructose	18 g	1,2 g
Milchzucker	2 g	0,1 g
Stärke	54 g	3,7 g
Fett	12 g	0,8 g
100 g = 6,5 BE; 1 BE = 16 g = ca. 2,5 Stück		

B1 Nährmittellangabe für Butterkeks.

A: Nennen Sie weitere Ihnen bekannte Kohlenhydrate.



B2 Bestimmung der Gefriertemperatur



B3 Strukturformeln von Glucose und Fructose (Kettenform, FISCHER-Projektionsformel). Glucose ist eine Aldose, Fructose eine Ketose.

Versuche

V1 Testen Sie eine Glucose-Lösung und eine Fructose-Lösung mit Glucose-Teststäbchen.

V2 Geben Sie zu 3 mL Fructose-Lösung 3 mL Resorcin-Salzsäure-Lösung* (1 Spatelspitze Resorcin* in 20 mL Salzsäure*, w = 10%). Erhitzen Sie das Rggl. in einem siedenden Wasserbad. Führen Sie zum Vergleich einen entsprechenden Versuch mit Glucose-Lösung durch.

LV3 Abzug! In ein hohes Becherglas gibt man 5 Esslöffel Saccharose und fügt dann 10 mL konz. Schwefelsäure* hinzu.

V4 Versetzen Sie 10 mL Saccharose-Lösung, w = 5%, mit 2 mL verd. Salzsäure und erhitzen Sie zum Sieden. Neutralisieren Sie nach dem Abkühlen mit Natriumhydrogencarbonat (mit pH-Papier testen). Prüfen Sie die neutrale Lösung mit Glucose-Teststäbchen. Geben Sie zu 3 mL der Lösung 3 mL Resorcin-Salzsäure-Lösung* und erhitzen Sie im Wasserbad (V2).

V5 Gefriertemperaturerniedrigung („Kryoskopie“): Stellen Sie sich eine Glucose-Lösung her, indem Sie 10 g Glucose in 100 mL Wasser auflösen. Bestimmen Sie anschließend die Gefriertemperatur der Lösung, indem Sie eine kleine Probe der Lösung in einem Rggl. in eine Kältemischung aus zerkleinerten Eiswürfeln und Kochsalz stellen. Tauchen Sie in die Lösung ein Thermometer mit 1/10-Grad-Einteilung ein. Mithilfe eines auf und ab bewegten Metalldrahts kann getestet werden, wann die Lösung erstarrt ist. Lesen Sie die Gefriertemperatur am Thermometer ab (B2, Auswertung b).

V6 Wiederholen Sie V4 mit einer Stärke-Lösung anstatt einer Saccharose-Lösung. Deuten Sie die Versuchsbeobachtungen.

INFO

Bestimmung der molaren Masse durch Messung der Gefriertemperatur: Lösungen haben eine niedrigere Gefriertemperatur als reines Wasser. Hierzu formulierte der französische Chemiker F.M. RAOULT (1830–1901) folgende Gesetzmäßigkeit: Löst man ein Mol eines aus Molekülen bestehenden Stoffes in 1 kg (1000 g) Wasser, so ist die Gefriertemperatur der Lösung um 1,86 °C niedriger als die des reinen Wassers. Diese Temperaturdifferenz bezeichnet man als molare Gefriertemperaturerniedrigung $\Delta\vartheta_G$. Die molare Gefriertemperaturerniedrigung von Wasser beträgt also 1,86 °C pro mol gelöster molekularer Substanz. Mithilfe der Kryoskopie lässt sich die molare Masse einer Verbindung durch folgende Formel berechnen:

$$M(\text{gelöste Substanz}) = \frac{1,86^\circ\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}}{\Delta\vartheta_G} m_G$$

m_G : Masse der in 1 kg Wasser gelösten Substanz

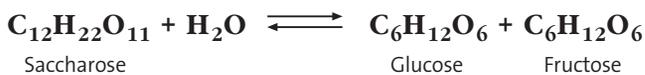
Auswertung

- Löst man 5,7 g Saccharose in 100 mL Wasser, hat die Lösung eine Gefriertemperatur von $-0,31^\circ\text{C}$. Berechnen Sie die molare Masse von Saccharose.
- Berechnen Sie aus den Ergebnissen von V5 die molare Masse von Glucose.
- Ziehen Sie aus der Berechnung (Auswertung b) und den Beobachtungen von V4 begründete Schlussfolgerungen.

Kohlenhydrate $C_m(H_2O)_n$

Glucose und Fructose gehören zu der Stoffgruppe der **Kohlenhydrate**. Kohlenhydrate haben die allgemeine Summenformel $C_mH_{2n}O_n$ oder $C_m(H_2O)_n$. Glucose und Fructose haben beide die molare Masse $M = 180 \text{ g/mol}$ und auch dieselbe Summenformel $C_6H_{12}O_6$ (V5). Beide Verbindungen sind gut in Wasser löslich, da in ihren Molekülen mehrere Hydroxy-Gruppen gebunden sind. Glucose ist eine sogenannte Aldose, da das Molekül eine Aldehyd-Gruppe enthält. Fructose ist im Unterschied dazu eine Ketose (B3). Beide Zucker sind Isomere, da sie zwar dieselbe Summenformel, aber unterschiedliche Strukturformeln aufweisen. Von Glucose- und Fructose-Molekülen kennt man jeweils eine Kettenform und eine sechs- bzw. fünfgliedrige Ringform (B3, B4 und B5). Im Gleichgewicht liegt Glucose zu 99,8% in der Ringstruktur vor. In ihr liegt die Aldehyd-Gruppe $-CHO$ des Glucose-Moleküls gebunden vor. Daher ist das Molekül widerstandsfähiger gegenüber Oxidationsmitteln. Zur Darstellung der Ringstruktur sind die *HAWORTH-Projektionsformeln* besonders geeignet, da sie die räumliche Struktur gut wiedergeben.

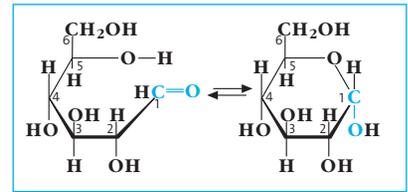
Der aus Zuckerrüben gewonnene Zucker, Saccharose, besitzt die Summenformel $C_{12}H_{22}O_{11}$ oder $C_{12}(H_2O)_{11}$. Erhitzt man Saccharose mit verdünnter Säure, so wird das Saccharose-Molekül unter Anlagerung eines Wasser-Moleküls in ein Glucose- und ein Fructose-Molekül gespalten (**Hydrolyse**, V4):



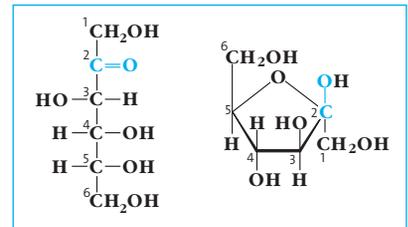
Saccharose ist demnach aus zwei Zuckerbausteinen aufgebaut, es ist ein Zweifachzucker oder **Disaccharid**. Glucose und Fructose sind dagegen Einfachzucker oder **Monosaccharide**.

Stärke ist das wichtigste Kohlenhydrat in unserer Nahrung und wird in Pflanzenzellen, z. B. in Kartoffeln oder Getreidekörnern, als Reservestoff gespeichert. Stärke ist ein **Polysaccharid**, ein Vielfachzucker. Stärke-Moleküle bilden eine spiralförmige Struktur (B6). Ein Stärke-Molekül lässt sich in viele tausend Glucose-Moleküle zerlegen. In unserem Körper wird Stärke zu Glucose hydrolysiert, die dann schrittweise oxidiert wird (vgl. S. 134, 135). Die Hydrolyse der Stärke beginnt bereits im Mund, weil Speichel stärkespaltende Enzyme enthält. In unserer Leber speichern wir Glucose in Form von tierischer Stärke, dem **Glycogen**, das ähnlich der pflanzlichen Stärke aufgebaut, aber stärker verzweigt ist.

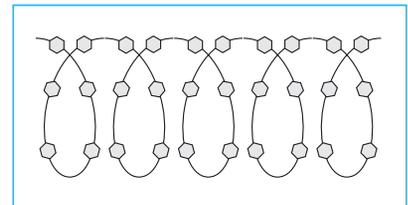
Cellulose (Zellstoff) ist die häufigste organische Verbindung der Erde, da sie bei allen grünen Pflanzen der Hauptbestandteil der Zellwände ist. Die wasserunlösliche Cellulose ist aus β -Glucose-Molekülen aufgebaut (B7), die ebenfalls bei der Ringbildung des Glucose-Moleküls entstehen können. Das Cellulose-Molekül liegt nicht wie das Stärke-Molekül spiralförmig, sondern gestreckt vor und ist in unserem Körper nicht hydrolysierbar.



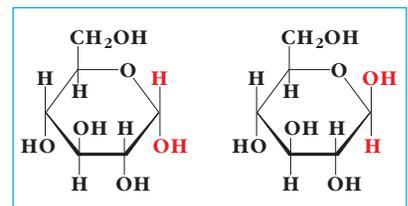
B4 Gleichgewicht zwischen der Ketten- und der Ringstruktur beim α -Glucose-Molekül (HAWORTH-Projektion)



B5 Ketten- und Ringstruktur eines α -Fructose-Moleküls (FISCHER- bzw. HAWORTH-Projektion)



B6 Vereinfachte Spiralstruktur des Stärke-Moleküls. **A:** Geben Sie an, wie viele Wasser-Moleküle man benötigt, um ein Stärke-Molekül aus 1000 Glucose-Bausteinen vollständig zu hydrolysieren.



B7 Ringstruktur-Formeln von α - (links) und β -Glucose (rechts). **A:** Vergleichen Sie den Aufbau beider Ringstrukturen. Vollziehen Sie den Ringschluss des Glucose-Moleküls mit einem Molekülbaukasten nach. Konstruieren Sie α - und β -Glucose-Moleküle.

Fachbegriffe

Kohlenhydrate, Monosaccharide, Disaccharide, Polysaccharide, Stärke, Cellulose, Glycogen

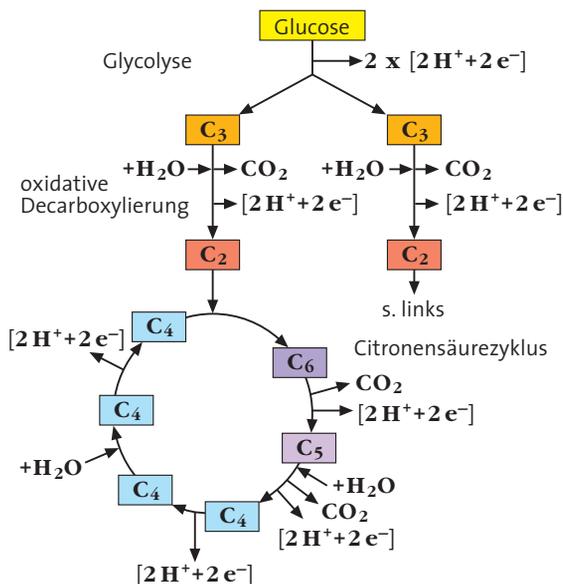
Der Citronensäurezyklus, ein Stoffkreislauf im Körper

Glucose-Abbau in Körperzellen

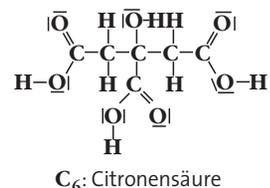
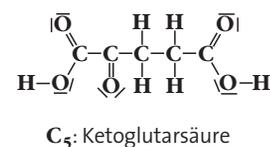
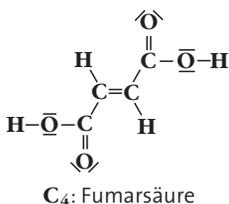
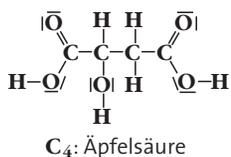
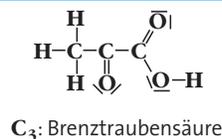
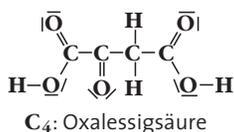
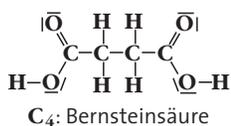
Der Vorgang des Glucose-Abbaus in lebenden Körperzellen erfolgt in zahlreichen Oxidationsschritten, bei denen die Energie in kleineren Portionen als bei B1 verfügbar wird. Man unterscheidet dabei drei Teilprozesse:

1. Die **Glycolyse**: Das Molekülgerüst der Glucose (C_6 -Körper) wird in zwei gleich große Bruchstücke, zwei Brenztraubensäure-Moleküle (C_3 -Körper), gespalten.
2. Die **Decarboxylierung**: Das Brenztraubensäure-Molekül spaltet ein Kohlenstoffdioxid-Molekül ab. Es entsteht ein Ethanal-Molekül, das anschließend zu einem Essigsäure-Molekül¹ (C_2 -Körper) oxidiert wird.
3. Der **Citronensäurezyklus**: Das Essigsäure-Molekül reagiert anschließend mit einem C_4 -Körper (Oxal-essigsäure-Molekül) und wird dann in einem Kreisprozess zu zwei Kohlenstoffdioxid-Molekülen oxidativ abgebaut (B1).

Die bei der Oxidation des Glucose-Moleküls frei werdenden Elektronen werden über einen **Elektronenvermittler**² zusammen mit den Wasserstoff-Atomen letztendlich auf Sauerstoff-Moleküle übertragen.



B1 Mehrschrittiger oxidativer Abbauweg der Glucose (stark vereinfacht). **A:** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung der oxidativen Decarboxylierung von Brenztraubensäure zu Essigsäure.



B2 Strukturformeln der Säuren, die beim oxidativen Glucose-Abbau über den Citronensäurezyklus als Zwischenprodukte gebildet werden.

A: Innerhalb des Citronensäurezyklus kommt ein Teil der hier angegebenen Verbindungen vor. Geben Sie für die Kohlenstoff-Atome in den Molekülen dieser Verbindungen die Oxidationszahlen an. Ordnen Sie diese Verbindungen den C_4 -, C_5 - und C_6 -Körpern in B4 begründet zu.

A: Formulieren und benennen Sie das Stereoisomer von Fumarsäure (vgl. S. 81).

¹ Essigsäure ist in der Zelle an ein Trägermolekül „Coenzym A“ gebunden. ² Elektronenvermittler der Zelle ist **NAD⁺** (Nicotinsäureamidnucleotid).