

# Wegweiser Chemie 2000+

Jeder Facettenball steht für eines der empfohlenen **Inhaltsfelder**.

Die Inhalte lassen sich **fachsystematisch** aufbauend und **kontextorientiert** entsprechend der Ziffernreihenfolge auf dem Facettenball erschließen. Dadurch werden kumulativ und nachhaltig die wichtigsten **Kompetenzen** erworben.



**1** Aromastoffe – Organische Stoffklassen und chemisches Gleichgewicht



**2** Vom Erdöl zu Anwendungsprodukten – Grundchemikalien und technische Prozesse



**3** Stoffkreisläufe – Kreisprozesse in Natur und Technik

## Lernzyklen

## EVA

**38** Aromastoffe

**Vanille, Vanillezucker und Vanillinzucker**

**Voraussetzungen**

V1 Führen Sie Geruchsproben an einer längs aufgeschnittenen Vanilleschote, einer Portion Vanillezucker und einer Portion Vanillinzucker durch.

V2 Suspendieren Sie 1 g Vanillezucker und 1 g Vanillinzucker in je 5 ml Ethanol<sup>1)</sup>. Kratzen Sie das Mark aus einem 3 cm langen Stück einer Vanilleschote heraus und suspendieren Sie es in Ethanol<sup>2)</sup>. Schüttern Sie die Suspensionen 5 min., lassen Sie dann die unlöslichen Stoffe sedimentieren. Dekantieren Sie die Lösungen vom Bodensatz ab und gießen Sie einige Tropfen der Lösungen auf ein Filterpapier. Führen Sie Geruchsproben durch, nachdem das Ethanol<sup>2)</sup> verdunstet ist. Die Reste der Extrakte werden in V3 verwendet.

V3 Stellen Sie analog zu V2 Suspensionen von Vanillezucker, Vanillinzucker und dem Mark aus einem Stück Vanilleschote in Wasser her. Vergleichen Sie die Löslichkeiten in Wasser mit denen in Ethanol<sup>2)</sup> (V2).

V4 Füllen Sie unter dem Abzug eine Chromatographiekammer 0,5 cm hoch mit einem Lösemittelgemisch aus Toluol<sup>3)</sup> und Ethansäureethyl ester<sup>4)</sup> (Volumenverhältnis 9 : 1) und verschließen Sie die Kammer. Tragen Sie mit Kapillarröhrchen die drei ethanolanischen Extrakte aus V2 auf eine mit Kieselgel beschichtete Dünnschichtchromatographie-Folie mit Fluoreszenzindikator auf. Wiederholen Sie das Auftragen jeweils fünfmal. Stellen Sie die DC-Folie zur Entwicklung in die Kammer. Entnehmen Sie die DC-Folie, wenn das Laufmittel 2/3 der DC-Folie durchlaufen hat. Lassen Sie das Laufmittel unter dem Abzug verdunsten, bevor Sie die DC-Folie unter dem Licht einer UV-Handlampe betrachten. Markieren Sie die Banden mit einem Bleistift.

**Auswertung**

a) Beschreiben Sie die Gerüche der Proben aus V1 und V2. Ordnen Sie die Gerüche der Proben nach steigender Intensität.

b) Stellen Sie begründete Vermutungen an, welche Bestandteile der Proben sich in Ethanol bzw. in Wasser nicht lösen.

c) Die Auftrennung von Stoffgemischen mit Dünnschichtchromatographie beruht auf der Löslichkeit der Stoffe im Laufmittel und den zwischenmolekularen Wechselwirkungen zur stationären Phase. Das Laufmittel ist hydrophob, die stationäre Phase (aus Kieselgel) ist hydrophil und weist viele Hydroxy-Gruppen auf. Geben Sie an, bei welchem der Hauptbestandteile aus B2 die stärksten zwischenmolekularen Kräfte zum Kieselgel wirken und welcher Art diese Kräfte sind (vgl. S. 25).

d) Vergleichen Sie die Banden im Dünnschichtchromatogramm und identifizieren Sie die Bande für Vanillin auf der DC-Folie.

e) Erklären Sie anhand der Ergebnisse der Dünnschichtchromatographie, wodurch sich Vanillinzucker von Vanillezucker und dem Mark aus der Vanilleschote unterscheiden. Ziehen Sie Schlussfolgerungen aus den Beobachtungen. Beziehen Sie bei Ihren Schlussfolgerungen auch die Informationen aus B9 ein.

**B2** Hauptbestandteile im ethanolanischen Extrakt von Vanilleschoten. A: Geben Sie die Strukturformel für 4-Hydroxybenzaldehyd und 4-Hydroxy-3-methoxybenzoesäure an.

Name	Massekonz. in 100 ml Extrakt
Vanillin (4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyd)	135–175 mg
4-Hydroxybenzaldehyd	10–12 mg
Vanillinsäure (4-Hydroxy-3-methoxybenzoesäure)	7–8,5 mg
4-Hydroxybenzoesäure	15–3,3 mg

**39** Aromastoffe

**Funktionelle Gruppen in Aromastoffen**

Unser Geruchssinn ist ein sehr feiner Sinn, der selbst Nuancen in Gerüchen registrieren kann. So unterscheiden sich die Gerüche der Proben aus V1 und V2 deutlich: Das Mark der Vanilleschote und der Vanillezucker riechen anders als der Vanillinzucker. Aus dem **Dünnschichtchromatogramm** kann abgelesen werden, dass die Extrakte des Vanillezuckers und der Vanilleschote Stoffgemische sind, während das Extrakt des Vanillinzuckers ein Reinstoff ist (V3).

Als **Vanillstoff** bezeichnet man einen Geruchseindruck, der durch mehr als 120 Geruchsstoffe bestimmt wird, die Hauptbestandteile des Vanilleextraktes sind in B3 aufgeführt. Ihre Molekülstrukturen unterscheiden sich nur durch das Fehlen der Methoxy-Gruppe und/oder durch das Austauschen der Aldehyd-Gruppe gegen eine Carboxy-Gruppe. Das Stoffgemisch aus diesen sehr ähnlichen Derivaten und den weiteren Stoffen ruft den Geruchseindruck des natürlichen Vanillearomas hervor. Vanillinzucker ist hingegen nur Vanillin mit Saccharose (Haushaltszucker) gemischt. Für Vanillinzucker wird Vanillin verwendet, das nicht aus Vanilleschoten extrahiert, sondern in einer Reihe von chemischen Reaktionen aus Eugenol (B5) hergestellt wird. Da die Molekülstrukturen des synthetischen Vanillins und des Vanillins aus der Vanilleschote identisch sind, spricht man hier von einem **natürlichen Aromastoff**. Durch die Entdeckung von Syntheswegen für Vanillin lässt sich der Bedarf der Aromaindustrie, der pharmazeutischen Industrie und der Parfümindustrie an Vanillin decken.

Der Vergleich der Molekülstruktur von Vanillin mit den Molekülstrukturen seiner **Strukturverwandten** (B5) zeigt, dass die funktionellen Gruppen und ihre Position im Molekül den Geruch eines Stoffes stark beeinflussen können: Geringfügige Unterschiede in der Molekülstruktur z. B. bei Vanillin und Eugenol bewirken gänzlich verschiedene Gerüche. Der Tausch der Positionen von Hydroxy- und Methoxy-Gruppe führt zu einem Stoff, der nahezu keinen Geruch aufweist (Isovanillin). Ethylvanillin mit nahezu identischer Molekülstruktur wie Vanillin wird als **künstlicher Aromastoff** genutzt, da es die zwei- bis vierfache Aromastärke von Vanillin hat. An den Strukturverwandten des Vanillins aus B5 lässt sich die Leistungsstärke unseres Geruchssinns zur Unterscheidung von Aromastoffen verdeutlichen. Weiterhin zeigen diese Beispiele ein allgemeines Prinzip bei organischen Verbindungen:

Das Molekülgerüst und die funktionellen Gruppen bestimmen die Eigenschaften des Stoffes wie Löslichkeit, Siedetemperatur und Geruch, aber auch seine physiologische Wirkung (Aufnahme, Abbau und Giftigkeit) in unserem Körper. Viele dieser Wirkungen basieren wie der Geruch auf dem Schlüssel-Schloss-Prinzip (vgl. S. 36, 37).

**Aufgabe**

A1 Suchen Sie in B1, S. 32, nach Strukturverwandten und geben Sie die Unterschiede in den Molekülstrukturen an.

**B4** Kolloten-Modell von Vanillin. A: Identifizieren Sie die funktionellen Gruppen im Vanillin-Molekül.

**B5** Strukturformeln von Vanillin und einigen Strukturverwandten. A: Beschreiben Sie, wodurch sich die Moleküle jeweils vom Vanillin-Molekül unterscheiden.

**Fachbegriffe**

Dünnschichtchromatogramm, Derivate, Strukturverwandte, natürlicher Aromastoff, künstlicher Aromastoff

von dttwaw (Ü1) – abtklein

**B4** Kolloten-Modell von Vanillin. A: Identifizieren Sie die funktionellen Gruppen im Vanillin-Molekül.

**B5** Strukturformeln von Vanillin und einigen Strukturverwandten. A: Beschreiben Sie, wodurch sich die Moleküle jeweils vom Vanillin-Molekül unterscheiden.

**Fachbegriffe**

Dünnschichtchromatogramm, Derivate, Strukturverwandte, natürlicher Aromastoff, künstlicher Aromastoff

von dttwaw (Ü1) – abtklein

**39** Aromastoffe

**Vanille, Vanillezucker und Vanillinzucker**

**Voraussetzungen**

V1 Führen Sie Geruchsproben an einer längs aufgeschnittenen Vanilleschote, einer Portion Vanillezucker und einer Portion Vanillinzucker durch.

V2 Suspendieren Sie 1 g Vanillezucker und 1 g Vanillinzucker in je 5 ml Ethanol<sup>1)</sup>. Kratzen Sie das Mark aus einem 3 cm langen Stück einer Vanilleschote heraus und suspendieren Sie es in Ethanol<sup>2)</sup>. Schüttern Sie die Suspensionen 5 min., lassen Sie dann die unlöslichen Stoffe sedimentieren. Dekantieren Sie die Lösungen vom Bodensatz ab und gießen Sie einige Tropfen der Lösungen auf ein Filterpapier. Führen Sie Geruchsproben durch, nachdem das Ethanol<sup>2)</sup> verdunstet ist. Die Reste der Extrakte werden in V3 verwendet.

V3 Stellen Sie analog zu V2 Suspensionen von Vanillezucker, Vanillinzucker und dem Mark aus einem Stück Vanilleschote in Wasser her. Vergleichen Sie die Löslichkeiten in Wasser mit denen in Ethanol<sup>2)</sup> (V2).

V4 Füllen Sie unter dem Abzug eine Chromatographiekammer 0,5 cm hoch mit einem Lösemittelgemisch aus Toluol<sup>3)</sup> und Ethansäureethyl ester<sup>4)</sup> (Volumenverhältnis 9 : 1) und verschließen Sie die Kammer. Tragen Sie mit Kapillarröhrchen die drei ethanolanischen Extrakte aus V2 auf eine mit Kieselgel beschichtete Dünnschichtchromatographie-Folie mit Fluoreszenzindikator auf. Wiederholen Sie das Auftragen jeweils fünfmal. Stellen Sie die DC-Folie zur Entwicklung in die Kammer. Entnehmen Sie die DC-Folie, wenn das Laufmittel 2/3 der DC-Folie durchlaufen hat. Lassen Sie das Laufmittel unter dem Abzug verdunsten, bevor Sie die DC-Folie unter dem Licht einer UV-Handlampe betrachten. Markieren Sie die Banden mit einem Bleistift.

**Auswertung**

a) Beschreiben Sie die Gerüche der Proben aus V1 und V2. Ordnen Sie die Gerüche der Proben nach steigender Intensität.

b) Stellen Sie begründete Vermutungen an, welche Bestandteile der Proben sich in Ethanol bzw. in Wasser nicht lösen.

c) Die Auftrennung von Stoffgemischen mit Dünnschichtchromatographie beruht auf der Löslichkeit der Stoffe im Laufmittel und den zwischenmolekularen Wechselwirkungen zur stationären Phase. Das Laufmittel ist hydrophob, die stationäre Phase (aus Kieselgel) ist hydrophil und weist viele Hydroxy-Gruppen auf. Geben Sie an, bei welchem der Hauptbestandteile aus B2 die stärksten zwischenmolekularen Kräfte zum Kieselgel wirken und welcher Art diese Kräfte sind (vgl. S. 25).

d) Vergleichen Sie die Banden im Dünnschichtchromatogramm und identifizieren Sie die Bande für Vanillin auf der DC-Folie.

e) Erklären Sie anhand der Ergebnisse der Dünnschichtchromatographie, wodurch sich Vanillinzucker von Vanillezucker und dem Mark aus der Vanilleschote unterscheiden. Ziehen Sie Schlussfolgerungen aus den Beobachtungen. Beziehen Sie bei Ihren Schlussfolgerungen auch die Informationen aus B9 ein.

**B2** Hauptbestandteile im ethanolanischen Extrakt von Vanilleschoten. A: Geben Sie die Strukturformel für 4-Hydroxybenzaldehyd und 4-Hydroxy-3-methoxybenzoesäure an.

Name	Massekonz. in 100 ml Extrakt
Vanillin (4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyd)	135–175 mg
4-Hydroxybenzaldehyd	10–12 mg
Vanillinsäure (4-Hydroxy-3-methoxybenzoesäure)	7–8,5 mg
4-Hydroxybenzoesäure	15–3,3 mg

**EVA 104** Vom Erdöl zu Anwendungsprodukten

**Erweiterung, Vertiefung, Anwendung**

**Verbrennungsprodukte schlucken Wärme**

**Voraussetzungen**

V1 Wärmespeicherung: Bauen Sie eine Messvorrichtung gemäß B1. Das Rohr besteht aus zwei gereinigten Teedosen, bei denen die Böden entfernt wurden. Die Spitze des Temperaturfühlers wird hinter einer schwarzen Pappe mit Tesafilm befestigt und auf der Rückseite mit einer glatten Aluminiumfolie verklebt. Der Bunsenbrenner (oder Kartuschenbrenner) wird bei allen Messungen in der gleichen Entfernung von 10 cm bis 15 cm vor der Dosenöffnung positioniert. Bei jeder Messreihe wird die Temperatur alle 30 s abgelesen, notiert und anschließend grafisch aufgetragen. Jede Messung wird nach 3 min abgebrochen. Vor Beginn der nächsten Messung muss die Apparatur (ggf. mit einem Föhn) gekühlt werden. Führen Sie Messreihen durch, indem Sie an der Dosenöffnung folgende Stoffe befestigen (z. B. mit einem Gummiband): a) eine Polyethylenfolie, b) eine Aluminiumfolie, c) einen Flachbeutel aus Polyethylen (Beer), d) einen Flachbeutel aus Polyethylen, innen mit Wasser befeuchtet, und e) Dosenöffnung frei. Wiederholen Sie dann die Messreihe a), nachdem Sie im Rohr die Luft durch Kohlenstoffdioxid ersetzt haben. (Hinweis: Nach dem Einfüllen des Kohlenstoffdioxids verschließen Sie die beiden oberen Öffnungen am Rohr mit Knetmasse.)

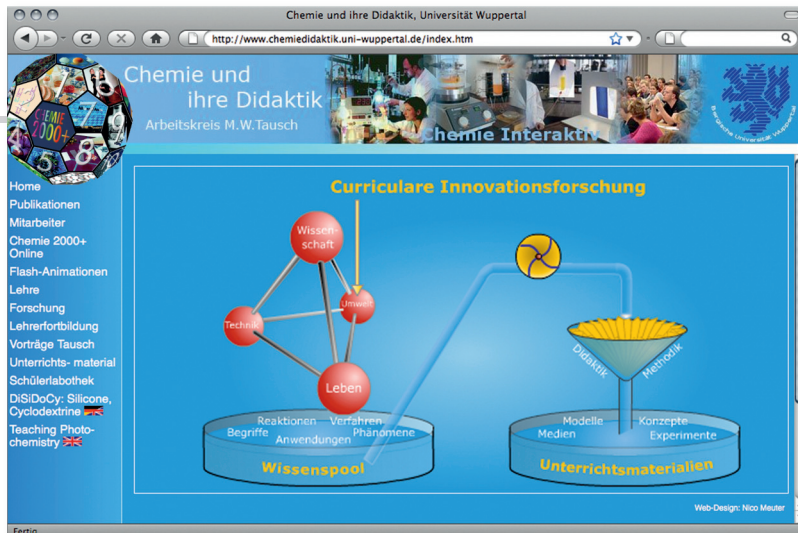
**Auswertung**

a) Treffen Sie anhand der Ergebnisse aus V1 begründete Aussagen über die Wärmedurchlässigkeit von Aluminium, Polyethylen und Wasser.

b) Begründen Sie mithilfe geeigneter Graphen, die Sie bei V1 ermitteln, warum Kohlenstoffdioxid Wärmeabstrahlung besser absorbiert als Luft.

Die fachlichen Inhalte werden auf Doppelseiten in **Lernzyklen** nach der **Methode der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung** erschlossen: Die **Arbeitsseite** (links) bietet Versuche, Informationen und Auswertungsfragen für den Unterricht. Auf der **Leseseite** (rechts) werden die Versuchsergebnisse mit weiteren Fakten verknüpft und zu neuen Erkenntnissen und Begriffen, die in die **Basiskonzepte** eingebettet sind, zusammengeführt.

Auf **EVA-Seiten** (Erweiterung, Vertiefung, Anwendung) werden fakultative Inhalte zu den übergeordneten Themen angeboten.



**Chemie 200+ Online** ist das Internet-Portal zu diesem Buch. Es enthält **EVA Online-Seiten** und zusätzliche **interaktive Materialien** zu einzelnen Buchseiten sowie weitere Lehr- und Lernmodule für den Unterricht.

## Kompetenzen

## Grundwissen

**KOMPETENZEN ERWERBEN** 62

**Atematmosphäre**

**Kompetenz** Anwenden mathematischer Verfahren zur Lösung von Aufgaben zum chemischen Gleichgewicht

Für sehr viele chemische Reaktionen sind die Gleichgewichtskonstanten  $K$  bekannt und in Tabellen aufgeführt. Mithilfe dieser Angaben und der eingesetzten Anfangskonzentrationen  $c_0$  der Edukte in einer chemischen Reaktion kann man die Konzentrationen aller

**Aufgabe**  
Berechnung der Gleichgewichtskonzentrationen  $c$  aus der Gleichgewichtskonstanten  $K$  und den Anfangskonzentrationen  $c_0$

Für eine Veresterung setzen Sie in einem Versuch Ethansäure,  $c_0 = 1 \text{ mol/L}$ , und Ethanol,  $c_0 = 6 \text{ mol/L}$ , ein. Die Gleichgewichtskonstante  $K$  des Estergleichgewichts ist bei  $20^\circ\text{C}$   $K = 4$  (vgl. S. 57). Berechnen Sie die Konzentrationen aller Reaktionsteilnehmer im Gleichgewicht.

**Lösung**  
Bekannt Informationen (vgl. Aufgabenstellung):  
 $c_0$  (Ethansäure) =  $1 \text{ mol/L}$ ,  $c_0$  (Ethanol) =  $6 \text{ mol/L}$   
Reaktionsgleichung des Estergleichgewichts:  
 $\text{H}_3\text{CCOOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$

Massenwirkungsgesetz zum Estergleichgewicht:  
 $K = \frac{c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) \cdot c(\text{H}_2\text{O})}{c(\text{H}_3\text{CCOOH}) \cdot c(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})} = 4$

a) Da nur der Wert für  $K$  bekannt ist, hat die Gleichung vier Unbekannte.  
Zu ihrer Lösung, sucht man nach Beziehungen zwischen den Konzentrationen der Stoffe, wodurch sich die Anzahl an Unbekannten auf eine reduzieren lässt:  
1. Der Reaktionsgleichung entnimmt man, dass  $n(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = n(\text{H}_2\text{O}) = 1:1$  und damit auch  $c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = c(\text{H}_2\text{O}) = 1:1$ , also  $c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = c(\text{H}_2\text{O})$  ist.  
Diese Unbekannte ( $\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5$ ) bezeichnet man zur Vereinfachung mit  $x$ :  
 $x = c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5)$

Reaktionsteilnehmer im Gleichgewicht berechnen. Für die Praxis ist das wichtig, weil so die zu erwartende Produktmenge aus den eingesetzten Eduktmengen bestimmt werden kann.

2. Im Gleichgewicht gilt für  $c(\text{H}_3\text{CCOOH})$ :  
 $c(\text{H}_3\text{CCOOH}) = c_0(\text{H}_3\text{CCOOH}) - c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = 1 \text{ mol/L} - x$

Da für jedes Ester-Molekül ein Ethansäure-Molekül verbraucht wird, verringert sich bei der Reaktion die Konzentration der Ethansäure um die Konzentration des gebildeten Esters.  
 $c(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = c_0(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) - c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = 6 \text{ mol/L} - x$

3. Analog zu 2. gilt für  $c(\text{H}_2\text{O})$ :  
 $c(\text{H}_2\text{O}) = c_0(\text{H}_2\text{O}) - c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = 6 \text{ mol/L} - x$

Es ergeben sich nun folgende Beziehungen:

	$\text{H}_3\text{CCOOH}$	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	$\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5$	$\text{H}_2\text{O}$
$c_0$ [mol/L]	1-x	6-x	x	0
$c$ [mol/L]	1-x	6-x	x	x

b) Durch Einsetzen der Terme für  $c$  in das MWG und Setzen von  $K = 4$  ergibt sich:  
 $4 = \frac{x^2}{(1-x) \cdot (6-x)^2}$   
oder umgeformt:  $3x^2 - 28x + 24 = 0$ .

c) Für diese quadratische Gleichung findet man die Lösungen:  $x_1 = 0,95 \text{ mol/L}$  oder  $x_2 = 8,38 \text{ mol/L}$ . Die Lösung  $x_2$  kann nicht die Konzentration des entstandenen Esters sein, da sie größer ist als die Anfangskonzentration der eingesetzten Edukte.

d) Im Gleichgewicht liegen folgende Konzentrationen vor:  
 $c(\text{H}_3\text{CCOOC}_2\text{H}_5) = 0,95 \text{ mol/L}$   
 $c(\text{H}_2\text{O}) = 0,95 \text{ mol/L}$   
 $c(\text{H}_3\text{CCOOH}) = 0,05 \text{ mol/L}$   
 $c(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 5,05 \text{ mol/L}$

Auf den Seiten **Kompetenzen erwerben** wird der Umgang mit Kompetenzoperatoren demonstriert, der mit den Seiten **Kompetenzen trainieren** geübt werden kann.

**GRUNDWISSEN** 159

**Stoffkreisläufe in der Natur**

Die gekoppelten Gleichgewichte (1) bis (4) sind am Kreislauf des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre, im Wasser der Meere und Ozeane und in den Kalkmerianen der Gebirge und Korallenriffe beteiligt:

$$\text{CO}_2(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CO}_2(\text{aq})$$

$$2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{HCO}_3^-(\text{aq})$$

$$\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{HCO}_3^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

$$\text{CaCO}_3(\text{s}) + 2 \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 3 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2(\text{g})$$

Auch der natürliche Kalk-Kreislauf beruht auf diesen Reaktionen: Nach der Rückreaktion aus (3) löst sich Kalkstein (Calciumcarbonat) im Sickerwasser und nach der Hinreaktion aus (3) kristallisiert er in den Stalaktiten und Stalagmiten der Tropfsteinhöhlen aus.

Im natürlichen Kohlenstoff-Kreislauf werden Wasser und Kohlenstoffdioxid (in grünen Pflanzen bei der Photosynthese zu Sauerstoff und Kohlenhydraten) umgesetzt. Diese endergonische Reaktion wird durch das Sonnenlicht angetrieben. Bei der Zellatmung läuft die exergonische Rückreaktion ab:

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6(\text{s}) + 6 \text{O}_2(\text{g}) \rightleftharpoons 6 \text{CO}_2(\text{g}) + 6 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$$

Am natürlichen Stickstoff-Kreislauf sind ebenfalls lebende Organismen beteiligt. Der Kreislauf setzt sich aus einer Vielzahl von Prozessen zusammen:

**Stoffkreisläufe in der Technik**

Der technische Kalk-Kreislauf findet beim Brennen, Löschten und Abbinden des Kalks z.B. in der Bauindustrie statt:

$$\text{CaCO}_3(\text{s}) \xrightarrow{\Delta H^\circ_f = -1207 \text{ kJ}} \text{CaO}(\text{s}) + \text{CO}_2(\text{g}) \quad \Delta H^\circ_r = +179 \text{ kJ}$$

$$\text{CaO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \xrightarrow{\Delta H^\circ_f = -98 \text{ kJ}} \text{Ca(OH)}_2(\text{s}) \quad \Delta H^\circ_r = -64 \text{ kJ}$$

Bei der technischen Ammoniaksynthese nach dem HABER-BOSCH-Verfahren wird ein Gemisch aus Wasserstoff und Stickstoff bei hohem Druck (25 bis 35 MPa) und Temperaturen von ca.  $550^\circ\text{C}$  in Gegenwart eines Katalysator-Systems zu ca. 20% zu Ammoniak umgesetzt. In der Anlage werden mehrere Stoffe prozessintegriert. Im Kreislauf geführt, darunter das Gasgemisch ( $3 \text{H}_2 + \text{N}_2$ ):

Ein technischer Kohlenstoff-Kreislauf kommt zustande, wenn nachwachsende Rohstoffe technisch genutzt werden.

Verarbeitung (z.B. Remanentien, Raffinerien) → Zwischenprodukte (z.B. Cellulose) → fertigung → Endprodukte (z.B. Zucker, Öl, Stärke) → Kompost, Bio-Müll → natürliche Zersetzung →  $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$  → Photosynthese → nachwachsende Rohstoffe

Ein abschließendes **Grundwissen** fasst die Inhalte der Kapitel strukturiert nach den **Basiskonzepten** zusammen. Im Anhang ergänzt eine Chemikalienliste das **Sicherheitskonzept** beim Experimentieren. Ein **Glossar** ermöglicht schnellen Zugang zu den Definitionen der wichtigsten Fachbegriffe.