



## LEHRERINFO

### Anbindung an den Lehrplan

#### Mögliche Inhalte

- Fotosynthese, Calvin-Zyklus
- Enzymatik: Schlüssel-Schloss-Prinzip
- Rubisco: Akzeptor-Molekül im Calvin-Zyklus; Aufzeigen der Fehleranfälligkeit
- Carboxylierung / Reduktionsreaktion
- Coenzym A
- ATP-Beteiligung bei chemischen Reaktionen
- NADPH als Protonen-Donator
- Fotosyntheseforschung, synthetische Biologie

#### Mögliche Kompetenzen: Erkenntnisgewinnung

- Fragestellungen und Hypothesen auf Basis von Beobachtungen und Theorien entwickeln
- Erkenntnisprozesse und Ergebnisse interpretieren und reflektieren
- Eigene Ergebnisse und den eigenen Prozess der Erkenntnisgewinnung reflektieren, Gültigkeit von Daten beurteilen, mögliche Fehlerquellen ermitteln, Möglichkeiten und Grenzen von Modellen diskutieren

#### Material

- Kärtchenset „CETCH-it!“ in Variante 1 (Strukturformeln) und /oder Variante 2 (Einfaches Modell mit Kugel-Molekülen), ein Satz für eine Schülergruppe enthält 21 Kärtchen und 12 Infokarten
- Bestellmöglichkeit Kärtchenset: [www.max-wissen.de/produkt/kaertchenset-cetch-it/](http://www.max-wissen.de/produkt/kaertchenset-cetch-it/)
- Aufgaben für Schülerinnen und Schüler, siehe S. 3+4 oder PDF-Datei „CETCH-it!-separates Arbeitsblatt“

#### Möglicher Ablauf der Unterrichtseinheit

##### 1) Motivationsphase: Lehrerinfo

Vorstellung des Settings / Kontexts: Fotosynthese-Rate ist limitiert (Wirkungsgrad) und Enzym Rubisco fehleranfällig

##### 2) Forschungsfrage: (Wie) Geht es besser?

→ Ziele der synthetischen Biologie

**Medium:** Kärtchenset (Einsatz der Strukturformel-Karten oder Karten mit Kugel-Molekülen je nach chemischem Vorwissen)

**Aktivität:** Schülerinnen und Schüler legen Kreisläufe anhand der Aufgaben im Arbeitsblatt.

##### 3) Zwischenergebnis

Moderiertes Unterrichtsgespräch: Ermittlung der Anzahl verschiedener Kreislauf-Lösungen über den Vergleich mittels Fotos oder Karten-Nummern; ggf. Korrektur, falls grundlegende Kriterien nicht berücksichtigt wurden.

**Anschlussfrage:** Vergleich der Effizienz verschiedener Kreisläufe? Umsetzbarkeit im Labor?

→ Erkenntnis zu grundlegenden Voraussetzungen von Kreisläufen: Es gibt viele Möglichkeiten: Welche ist sinnvoll? Nicht jede Möglichkeit kann im Labor umgesetzt werden (Zeit, Kosten, Ressourcen).

**Aktivität:** Schülerinnen und Schüler optimieren die Kreisläufe mithilfe des Arbeitsblattes und der Infokarten. / **Medien:** Arbeitsblatt mit Aufgabenstellungen und einige Infokarten

**Lösungsansatz:** Sichtweise eines Forscher /einer Forscherin mit Hilfe der Infokarten einnehmen: Einbezug mehrerer chemischer und physikalischer Reaktionsbedingungen mit dem Ziel: Effizienz (kurz, thermodynamisch günstig und reduktive Carboxylierung) und O<sub>2</sub>-Unempfindlichkeit

#### 4) Diskussion im Plenum

z. B. Vergleich der ausgefüllten Tabelle zur Bewertung der Effizienz / Umsetzbarkeit eines Zyklus

#### 5) Ergebnissicherung

Bearbeitung der Aufgaben 3-5 im Arbeitsblatt; zusätzlich Zusammenfassung der Ergebnisse auf Smartboard o.ä. / im Heft (Vorschlag siehe unten)

#### 6) Ausblick

Realforschung: CETCH-Zyklus: 17 verschiedenen Enzymen aus 9 Organismen und 3 optimierte Enzyme

**Medium:** BIOMAX-Heft, Ausgabe 37 <https://www.max-wissen.de/max-hefte/kuenstliche-fotosynthese/>

#### Zusammenfassung Ergebnisse

- Die Rubisco ist langsam und fehleranfällig. Bei der künstlichen Fotosynthese wird sie durch funktionsfähigere Enzyme ersetzt.
- Die CO<sub>2</sub>-Fixierung ist ein geschlossener Kreislauf, weil dabei das Rezeptor-Molekül regeneriert wird.
- Die Produkt-Moleküle der natürlichen und künstlichen CO<sub>2</sub>-Fixierung (Glucose und Glyoxylat) werden letztlich aus CO<sub>2</sub>-Molekülen aufgebaut.
- Biochemische Prozesse müssen effizient sein, d.h. thermodynamisch begünstigt und wenige Reaktionsschritte beinhalten (= kurzer Kreislauf).
- Bei der künstlichen CO<sub>2</sub>-Fixierung geht es nicht um die Herstellung von Glucose, sondern von organischen Säuren, die als Edukte für weitere Synthese-Reaktionen im industriellen Maßstab dienen.

#### Mögliche zusätzliche Medien/Materialien

- Videointerview mit Helena Schulz-Mirbach zur künstlichen Fotosynthese  
<https://www.max-wissen.de/max-media/videointerview-kuenstliche-fotosynthese>
- BIOMAX-Heft 37: Künstliche Fotosynthese  
<https://www.max-wissen.de/max-hefte/kuenstliche-fotosynthese/>
- Interview (Text) mit Tobias Erb zu künstlichen Stoffwechselwegen und zur synthetischen Biologie:  
<https://www.mpg.de/10834735/synthetische-biologie-kohlendioxid-erb?c=2191>
- Video: Vortrag [40 min] von Tobias Erb zur künstlichen Fotosynthese und synthetischen Biologie  
<https://www.max-wissen.de/max-media/vortrag-photosynthese-synthetische-biologie/>
- Video [4 min, englisch] mit Tobias Erb zur Entwicklung des CETCH-Zyklus
- > **Der Link führt direkt zu YouTube:** <https://youtu.be/CPFscyYRS10?si=CD2XYt5dTGydWGTQ>
- Podcast [9 min] mit Tobias Erb „Turbo-Fotosynthese aus dem Reagenzglas“:  
<https://www.mpg.de/14890811/turbo-fotosynthese-aus-dem-reagenzglas>
- Podcast [14 min] mit Tobias Erb: Wie Sauerstoff die Fotosynthese veränderte  
<https://www.mpg.de/19395564/sauerstoff-photosynthese?c=2191>
- Pressemeldung: Künstliche Kohlenstoff-Fixierung überholt die Natur  
<https://www.mpg.de/24263491/0226-terr-kuenstliche-kohlenstoff-fixierung-ueberholt-die-natur-153410-x>

## AUFGABEN



### Aufgabe 1

Reiht die Kärtchen aneinander und entwickelt einen geschlossenen Kreislauf. Kombiniert dabei passende Reaktionsschritte, gegebenenfalls hilft euch dabei die Farbkodierung.

Der Kreislauf muss immer diese grundlegenden Kriterien erfüllen:

- Es gibt zwei CO<sub>2</sub>-fixierende Schritte.
- Bei einer Reaktion entsteht Glyoxylat, ein Produkt mit zwei Kohlenstoff-Atomen.

Notiert die Karten-Nummern, die ihr für eure(n) Kreislauf(e) verwendet habt, oder fotografiert euer Ergebnis.



### Aufgabe 2

**2.1** Kontrolliert bei euren Kreisläufen, ob an zwei Stellen CO<sub>2</sub> eingebaut wird und an welcher Stelle das Produkt Glyoxylat entsteht. Leitet daraus die Richtung des Kreislaufes ab und markiert sie mit einem Pfeil.

**2.2** Vergleicht die verschiedenen Kreisläufe und bewertet deren Qualität anhand folgender Kriterien sowie der Infokarten zu „Ferredoxin“ sowie „Thermodynamik“:

Ein optimaler Kreislauf erfüllt zu den Angaben in Aufgabe 1 zusätzlich die folgenden Kriterien:

**a) Der Kreislauf ist möglichst kurz.**

**b) Der Kreislauf ist thermodynamisch bevorzugt, d.h. er enthält keinen gestrichelten Reaktionsschritt.**

**c) Der Kreislauf ist sauerstoff-unempfindlich (d.h. er enthält kein Fd<sub>red</sub> bzw. Fd<sub>ox</sub>).**

**2.3** Nutzt passende Infokarten, um die Kriterien b) und c) zu erklären.

**2.4** Formuliert (eine) Hypothese(n) für die Erklärung zu Kriterium a).



### Aufgabe 3

„CCR katalysiert die effizienteste Reaktion zur Kohlendioxidfixierung, die wir bis heute kennen“, sagt Forscher Tobias Erb. Das von ihm entdeckte Enzym CCR agiert, als hätte es einen Turbo eingeschaltet: 20-mal schneller als das pflanzliche Rubisco und zudem fehlerfrei.

Erklärt das Zitat des Wissenschaftlers mithilfe passender Infokarten.



### Aufgabe 4

Eine mögliche Anwendung der künstlichen Fixierung von CO<sub>2</sub> könnte sein, einen Kreislauf in lebende Organismen – z. B. E. coli-Bakterien – einzubauen. Dies könnte ein wichtiger Schritt zur Reduzierung des globalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sein. Die Kreisläufe müssen so gestaltet sein, dass sie konkurrenzfähig zu den bakterieneigenen Stoffwechselkreisläufen sind, indem sie energetisch günstig ablaufen und die Zwischenprodukte nicht anderweitig vom Organismus chemisch verarbeitet werden.

Bewerte dieses Forschungsvorhaben aus ethischer Sicht und formuliere jeweils ein Pro- und ein Kontra-Argument.

**Möglicher Werte-Pool für die Argumentation:**

**Fortschritt, Tierwohl, Wirtschaftlichkeit, Gesundheit, Artenschutz, Umweltschutz**



### Aufgabe 5

Vergleiche den Calvin-Zyklus mit einem der künstlichen Zyklen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung, z.B. hinsichtlich der Phasen, der Schritte zur CO<sub>2</sub>-Fixierung und der Produkte.

Mögliche Hilfestellung für Aufgabe 2.2:

Lege eine Tabelle nach folgendem Schema an und fülle sie aus.

Zusätzliche Kriterien	Kurz, wenig Reaktionsschritte	Thermodynamisch bevorzugt / hat keinen gestrichelten Reaktionsschritt	Nicht empfindlich gegenüber Sauerstoff	Bewertung
4er-Kreislauf				
5er-Kreislauf				
9er-Kreislauf				
11er-Kreislauf				



## LÖSUNGSVORSCHLÄGE

### Lösung 1

Mögliche Kreisläufe:

**11er Zyklus:** Karten-Abfolge 12-15-14-13-16-18-21-3-1-2-20

**9er Zyklus:** Karten-Abfolge 12-15-14-13-10-11-17-19-20

**5er Zyklus:** Karten-Abfolge 4-6-9-8-5

**4er Zyklus:** Karten-Abfolge 4-7-8-5

### Lösung 2

**2.1** Kreislaufrichtung: CO<sub>2</sub>-Aufnahme bzw. Glyoxylat als Produkt

**2.2** Bewertung der Kreisläufe in aufsteigender Reihenfolge:

**4er:** ist zwar kurz, hat aber Fd<sub>red</sub>/Fd<sub>ox</sub> (Karte mit Schritt 4)

**5er:** ist zwar kurz, hat aber Fd<sub>red</sub>/Fd<sub>ox</sub>

**11er:** ist lang, hat kein Fd<sub>red</sub>/Fd<sub>ox'</sub>, aber hat eine Reaktion, die thermodynamisch ungünstig ist (Schritt 21, gestrichelter Pfeil in Kreislaufrichtung)

**9er:** ist kürzer als 11er, hat kein Fd<sub>red</sub>/Fd<sub>ox'</sub>, hat keine Reaktion, die thermodynamisch ungünstig ist → also beste Variante

Oder tabellarische Darstellung:

Zusätzliche Kriterien	Kurz, wenig Reaktions-schritte	Thermodynamisch bevorzugt / hat keinen gestrichelten Reaktionsschritt	Nicht empfindlich gegenüber Sauerstoff	Bewertung
4er-Kreislauf	Ja	Ja	Nein (Schritt 4)	Kurz, aber O <sub>2</sub> -empfindlich
5er-Kreislauf	Ja	Ja	Nein	Kurz, aber O <sub>2</sub> -empfindlich
9er-Kreislauf	Eher nein	Ja	Ja	Die beste Variante
11er-Kreislauf	Nein	Nein (Schritt 21)	Ja	Ungünstig, da lang + thermodynamisch ungünstig

### 2.3

> Infokarten: „Thermodynamik“ / „Ferredoxin“

- Reaktionszyklen dürfen nicht endotherm sein, da der Energieaufwand Kosten verursacht und evtl. andere Reaktionsschritte beeinträchtigt.
- Die Verwendung von Ferredoxin verursacht weitere Betriebskosten für den Zyklus, da der Reaktionsraum sauerstofffrei gehalten werden muss.

### 2.4

Hypothese für die Erklärung zu Kriterium a)

- Je weniger Teilschritte der Zyklus enthält, umso kostengünstiger und weniger störanfällig ist er und umso einfacher ist die Umsetzung im Reagenzglas.
- Kürzere Zyklen könnten perspektivisch besser in Organismus eingebaut werden, da sie weniger störanfällig sind.

### Lösung 3

> Infokarten „Rubisco“ / „Enzyme“ / „Reduktive Carboxylierung“

- CCR- bzw. ECR-Enzyme binden keine Sauerstoff-Moleküle, sondern setzen ausschließlich CO<sub>2</sub>-Moleküle in viel höherer Geschwindigkeit um.

- Das aktive Zentrum der CCR/ECR-Enzyme passt gemäß dem Schlüssel-Schloss-Prinzip besser zur räumlichen Struktur von CO<sub>2</sub> / nicht zu der von O<sub>2</sub>.
- Durch die stärkeren Anziehungskräfte zwischen aktivem Zentrum und CO<sub>2</sub> und der gleichzeitigen Reduktion von CO<sub>2</sub> (= Bindung als Carboxy-Gruppe) durch das Enzym sind diese Moleküle sehr effektiv.

#### Lösung 4

Je ein Argument formulieren, das folgende Bestandteile enthält:

**Deskriptive Information** (z. B. Synthetische Biologie mit kurzer Beschreibung des Forschungsziels), alternativ: Beschreibung des Interessenskonflikts („Wahrnehmen“ nach dem *WaageR-Modell*\*)

**Normative Aussage** (Verknüpfen der Situation mit passenden, der eigenen Meinung entsprechenden Normen) ⇒ kriterienbasiertes Bewerten

Schlussfolgerung mit Gewichtung des Pro- und Kontra-Arguments

\*Hinweis zum *WaageR-Modell*: Das *WaageR-Modell* ist eine Möglichkeit zur Bewertung. Siehe Vorschlag der MNU; Literatur: MNU (Hrsg.): Themenreihe Bildungsstandards - Bewertungskompetenz in den Naturwissenschaften, 2022; ISBN 978-3-940516-29-9;

> PDF online (Abruf am 5.12.25): [https://www.mnu.de/images/publikationen/Bewertungskompetenzen/Bildungsstandards\\_Bewertungskompetenz.pdf](https://www.mnu.de/images/publikationen/Bewertungskompetenzen/Bildungsstandards_Bewertungskompetenz.pdf)

#### Lösung 5:

##### Calvin-Zyklus:

- Kreislauf mit 3 Phasen (Fixierung / Reduktion / Regeneration)
- Zyklus muss 6x durchlaufen werden, um rechnerisch 1 Molekül Glucose aufzubauen
- Produkt des Zyklus ist Phosphoglycerinaldehyd

##### Künstliche Zyklen zur CO<sub>2</sub>-Fixierung:

- keine klare Dreiteilung, da Fixierung und Reduktion in einem Schritt ablaufen; Zwischen den Fixierungen können weitere Reaktionsschritte liegen; Bildung (Abspaltung) von Glyoxylat führt oftmals direkt zum „Akzeptor-Moleküle“ für CO<sub>2</sub>
- Bindung von 2 CO<sub>2</sub>-Molekülen pro Zyklus
- Produkt z.B. Glyoxylat

---

Der Text wird unter [CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) veröffentlicht.

Stand: 01/2026; Text: Dr. P. Oberpaul; Beratung: C. Deurer; Layout und Redaktion: max-wissen-Team