

## Abbau (3)

# Abbau von Brenztraubensäure zu Kohlenstoffdioxid

### Aufgaben:

#### 1 Oxidative Decarboxylierung der Brenztraubensäure (M1)

Der aerobe Abbau von Glukose beginnt mit der Glykolyse. Die dabei entstehende Brenztraubensäure wird in einem zweiten Stoffwechsel-Abschnitt mit der Bezeichnung oxidative Decarboxylierung umgewandelt.

- 1.1 Ergänzen Sie in B1 bei allen Kohlenstoff-Atomen, bei denen eine chemische Veränderung auftritt, die Oxidationszahl.
- 1.2 Erklären Sie beide Wortbestandteile der Bezeichnung „oxidative Decarboxylierung“.
- 1.3 Formulieren Sie, ausgehend von B1, die Summengleichung der oxidativen Decarboxylierung mit Summenformeln.
- 1.4 Formulieren Sie die beiden Probleme, die am Ende der Glykolyse noch bestehen, und beurteilen Sie, ob bzw. inwiefern die oxidative Decarboxylierung zur Lösung dieser Probleme beiträgt.

#### 2 C-Körper-Schema

- 2.1 Beurteilen Sie, welche der folgenden Stoffe zu dem in B2 dargestellten C-Körper-Symbol passen (M2). Führen Sie, wenn nötig, Recherchen zu den Formeln durch.

Ribose / Fruktose / Brenztraubensäure / Glukose

- 2.2 Formulieren Sie die Summengleichung der oxidativen Decarboxylierung in Form eines C-Körper-Schemas.

#### 3 Tricarbonsäure-Zyklus (M3)

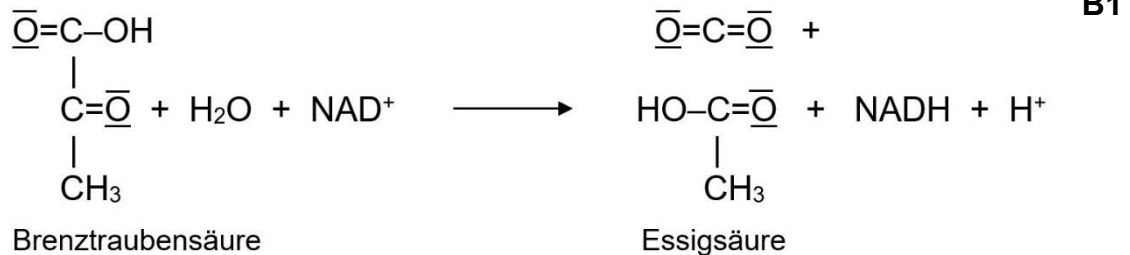
Der dritte Stoffwechsel-Abschnitt des aeroben Abbaus von Glukose beginnt damit, dass die aktivierte Essigsäure an ein Akzeptor-Molekül gebunden wird, wodurch Zitronensäure entsteht.

- 3.1 Leiten Sie aus B3 und B4 die Bedeutung des Begriffs „Tricarbonsäure-Zyklus“ ab.
- 3.2 Im Tricarbonsäure-Zyklus taucht ein weiterer Kurzzeit-Redox-Energiespeicher auf: das Flavin-Adenin-Dinukleotid FAD. Seine reduzierte Form ist FADH<sub>2</sub>.  
Formulieren Sie – analog zu NADH – die Reaktionsgleichung zur Entstehung von FADH<sub>2</sub>. Markieren Sie die energiereiche Form sowie die zugeführte Energie mit Rot.
- 3.3 Kennzeichnen Sie in B4 alle Reaktionsschritte, bei denen die als C-Körper dargestellten Stoffe oxidiert werden. Kennzeichnen Sie alle Decarboxylierungs-Schritte.
- 3.4 Beschreiben Sie anhand von B4 den Reaktionsschritt, bei dem das Akzeptor-Molekül für Essigsäure regeneriert wird, in Worten.
- 3.5 Entwickeln Sie aus B4 die Summengleichung der Verstoffwechslung von Essigsäure im Tricarbonsäure-Zyklus in Summenformeln (mit allen Energiespeichern). Ergänzen Sie fehlende Wasserstoff- und Sauerstoff-Atome in Form von Wasser. Markieren Sie die energiereichen Stoffe mit Rot.
- 3.6 Beurteilen Sie, inwiefern der Tricarbonsäure-Zyklus zur Lösung der beiden Probleme beiträgt, die am Ende der Glykolyse bestehen.

## Materialien:

### M1 Oxidative Decarboxylierung von Brenztraubensäure

Beim aeroben Abbau von Glukose wird die Brenztraubensäure in anderer Weise umgewandelt als bei den Gärungen, indem neben Kohlenstoffdioxid Essigsäure (Ethansäure) entsteht, die noch viel Energie enthält. B1 zeigt die Summengleichung dieses Reaktionsschritts in Strukturformeln. (Hinweis: Eigentlich liegt die Essigsäure nicht frei vor, sondern sie ist gebunden an Coenzym A und heißt dann aktivierte Essigsäure.)



### M2 C-Körper-Schema

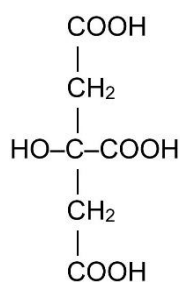
Das C-Körper-Schema stellt eine vereinfachte Schreibweise für chemische Stoffumwandlungen dar. Dabei wird in einem Quadrat lediglich die Anzahl der Kohlenstoff-Atome im Molekül angegeben. (Meist wird Kohlenstoffdioxid nicht als „C1“ geschrieben, sondern als Summenformel: CO<sub>2</sub>. Stoffe wie ATP, NADH usw. werden nach wie vor mit ihren üblichen Bezeichnungen geschrieben.) B2 zeigt das Symbol für ein Molekül mit sechs Kohlenstoffatomen.

**C6**

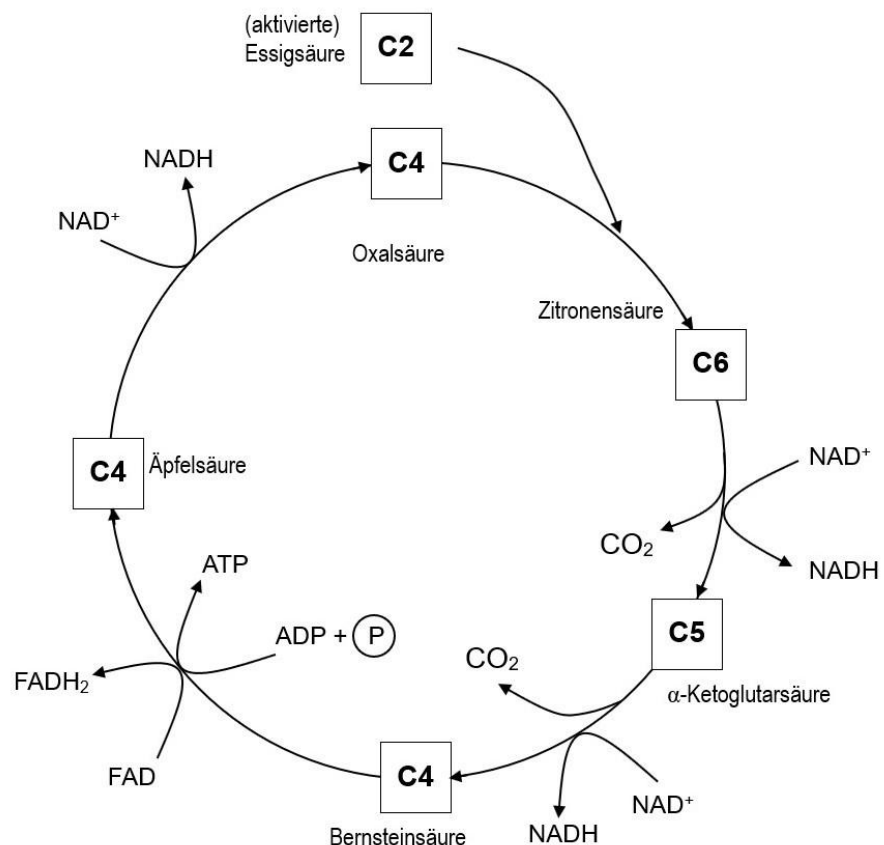
**B2**

### M3 Tricarbonsäure-Zyklus

B3 zeigt die Halbstrukturformel von Zitronensäure. B4 zeigt den Tricarbonsäure-Zyklus in vereinfachter Form.



**B3**



**B4**

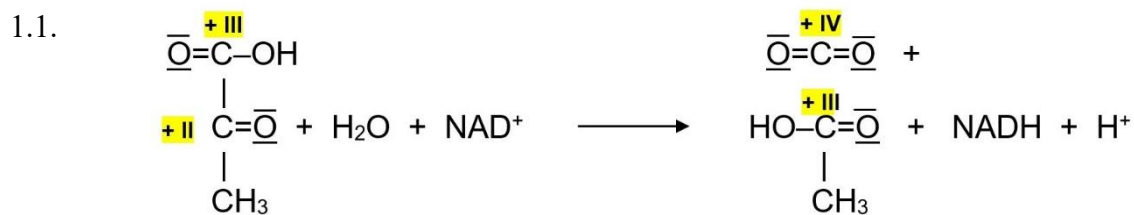
## Hinweise für die Lehrkraft:

Dies ist die für den Einsatz im gA-Kurs vereinfachte Form des Arbeitsblatts unter Vernachlässigung von Coenzym A.

Dieses Arbeitsblatt geht problemorientiert vor und bezieht sich eng auf mein Didaktikskript zur Dissimilation.

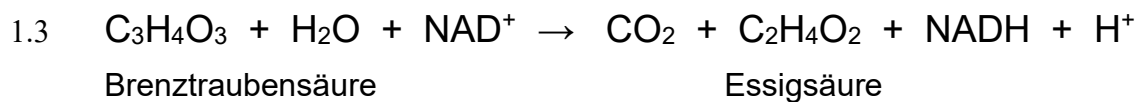
Zur Vereinfachung wird die Aktivierung der Essigsäure mit Coenzym A nicht angesprochen. Das ist nicht falsch, sondern stellt lediglich ein besonders stark vereinfachtes Modell dar.

### 1 Oxidative Decarboxylierung



1.2 oxidativ: Die Brenztraubensäure wird oxidiert.

Decarboxylierung: Die Carboxygruppe der Brenztraubensäure wird abgespalten, Kohlenstoffdioxid wird freigesetzt.



1.4 **Problem 1**: „Regeneration von  $\text{NAD}^+$ “

Dieses Problem wird nicht nur nicht gelöst, sondern verstärkt, indem die Menge an NADH pro Glukose verdoppelt wird.

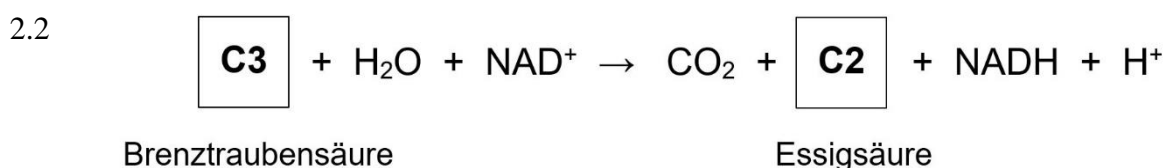
**Problem 2**: „Die Energie in Brenztraubensäure wird nicht genutzt.“

Dieses Problem wird nicht gelöst, denn auch (aktivierte) Essigsäure enthält viel Energie. Allerdings steckt ein Teil der Energie von Brenztraubensäure im Energieträger NADH.

### 2 C-Körper-Schema

Damit wird diese Schreibweise eingeführt bzw. wiederholt, die zur Betrachtung des Tricarbonsäure-Zyklus benötigt wird.

2.1 Fruktose und Glukose, denn sie besitzen jeweils 6 Kohlenstoff-Atome.  
Ribose hat nur 5, Brenztraubensäure nur 3 Kohlenstoff-Atome und passen nicht dazu.



### 3 Tricarbonsäure-Zyklus

Der Tricarbonsäure-Zyklus ist aus didaktischen Gründen hier stark vereinfacht dargestellt ohne Zwischenschritte wie z. B. die Umwandlung von Zitronensäure in Isozitronensäure usw. und ohne Formeln der Stoffe.

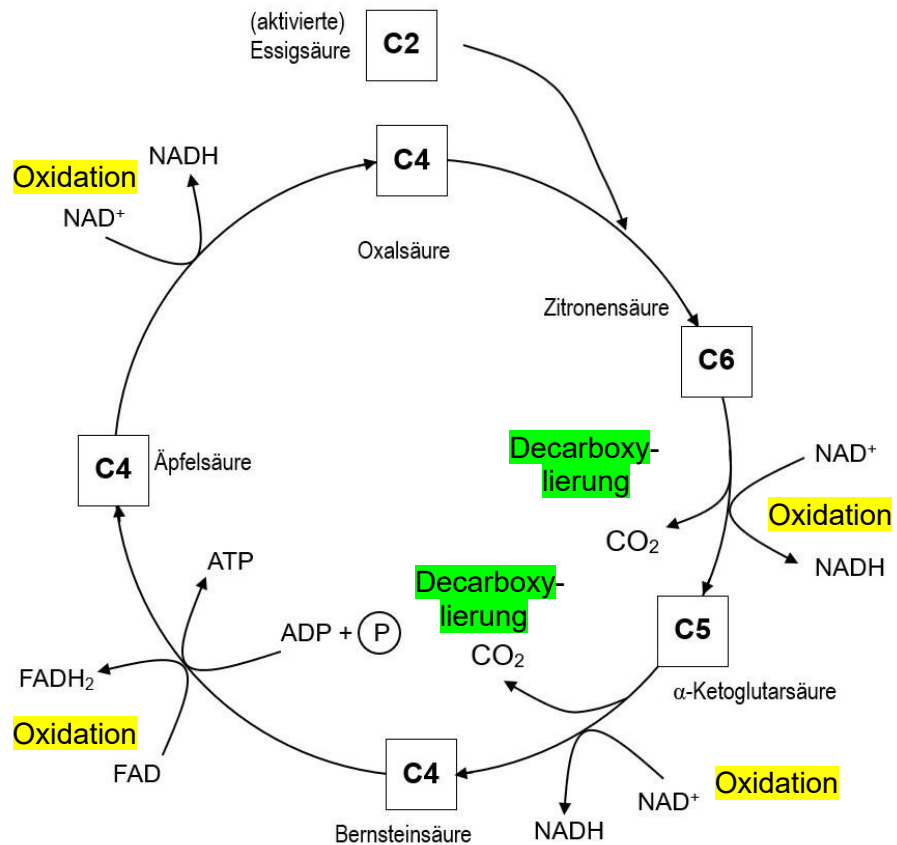
Die Namen der Zwischenprodukte innerhalb des Tricarbonsäure-Zyklus stellen aus meiner Sicht keine Lerninhalte dar; wesentlich ist dagegen die jeweilige Anzahl ihrer Kohlenstoffatome (und damit die Orte der Abspaltung von Kohlenstoffdioxid) sowie die Redox-Vorgänge (und damit die Bildung von NADH und FADH<sub>2</sub>).

Im Tricarbonsäure-Zyklus sind zwei weitere oxidative Decarboxylierungen enthalten (nämlich die von Zitronensäure und  $\alpha$ -Ketoglutarat); das kann angesprochen werden, muss aber nicht.

3.1 Die Zitronensäure enthält drei Carboxygruppen, ist also eine Tricarbonsäure. Der Stoffwechsel-Abschnitt stellt einen Stoffkreislauf dar, ist also ein Zyklus.

3.2  $\text{FAD} + 2 \text{e}^- + 2 \text{H}^+ + \text{Energie} \rightarrow \text{FADH}_2$

3.3.



*Hinweis:* Die Skizze des Tricarbonsäure-Zyklus dient lediglich als Übungsmaterial und stellt selbst keinen Lerninhalt dar, denn der LehrplanPLUS verlangt lediglich eine Übersicht über die Abschnitte des aeroben Abbaus. Das C-Körper-Schema hat den Nachteil, dass die Oxidationsschritte nur an der Bildung der beiden Energieträger NADH und FADH<sub>2</sub> zu ersehen sind, nicht an der Veränderung der Zwischenprodukte selbst.

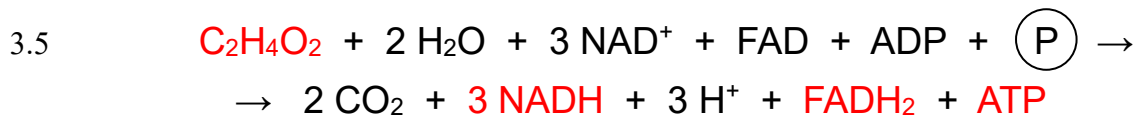
Die Namen der Zwischenprodukte im Trikarbonsäure-Zyklus stellen nach meiner Meinung keine Lerninhalte dar, die Formeln sowieso nicht.

Ggf. kann im Kreislaufschema zusätzlich die Bildung von ATP mit dem Begriff „Phosphorylierung“ bezeichnet werden.

Anmerkung zu FAD als prosthetische Gruppe von Enzymkomplex II: vgl. Didaktikskript  
Beim Menschen entsteht im Tricarbonsäure-Zyklus GTP, nicht ATP. ATP entsteht allerdings bei anderen Lebewesen an dieser Stelle. Ich würde die Sache hier nicht künstlich durch die Einführung noch eines weiteren Energieträgers verkomplizieren.

- 3.4 Äpfelsäure wird zum Akzeptor-Molekül Oxalsäure oxidiert, wobei zwei Elektronen und zwei Protonen auf  $\text{NAD}^+$  übertragen werden, sodass NADH entsteht.

Diese Formulierung stellt nur eine Übung zur Kommunikations-Kompetenz dar und keinen Lerninhalt.



- 3.6 **Problem 1:** „Regeneration von  $\text{NAD}^+$ “

Dieses Problem wird durch den Tricarbonsäure-Zyklus nicht nur nicht gelöst, sondern massiv verstärkt, indem die Menge an NADH erheblich erhöht wird und zusätzlich noch  $\text{FADH}_2$  erzeugt wird, das ebenfalls zu FAD regeneriert werden muss.

**Problem 2:** „Die Energie in Brenztraubensäure wird nicht genutzt.“

Dieses Problem wird insofern gelöst, als am Ende des Tricarbonsäure-Zyklus der gesamte Kohlenstoff aus der Glukose in Form von Kohlenstoffdioxid vorliegt, also in der maximal oxidierten und damit energiearmen Form. Allerdings steckt der größte Teil der Energie aus der Glukose in Redox-Energiespeichern, die somit nicht direkt nutzbar ist; lediglich zwei weitere ATP pro Glucose werden gewonnen (immerhin eine Erhöhung der Ausbeute um 100 %).