

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 (die Gruppe CoA-S- hat die Oxidationszahl -1).
- 1.2 Für die Reduktion von NAD^+ werden 2 Elektronen und 2 Protonen (Wasserstoff-Ionen) benötigt. Klären Sie anhand von B1 deren Herkunft.
- 1.3 Erklären Sie beide Wortbestandteile der Bezeichnung „oxidative Decarboxylierung“.
- 1.4 Formulieren Sie, ausgehend von B1, die Summengleichung der oxidativen Decarboxylierung mit Summenformeln und zwar einmal mit Coenzym A (wie in B1) und einmal unter Vernachlässigung von Coenzym A (mit freier Essigsäure = Ethansäure).
- 1.5 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 (unter Vernachlässigung von Coenzym A).

3 Tricarbonsäure-Zyklus (M3)

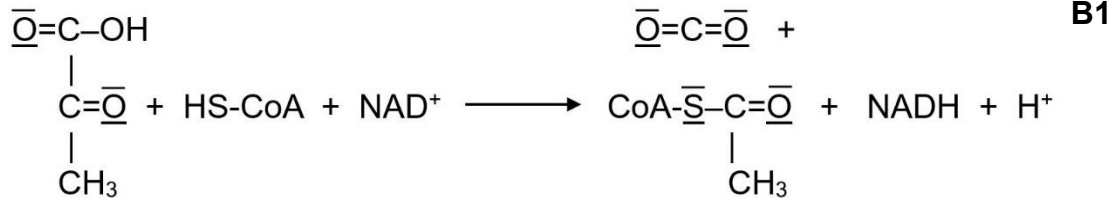
Der dritte Stoffwechsel-Abschnitt des aeroben Abbaus von Glukose beginnt damit, dass die aktivierte Essigsäure an ein Akzeptor-Molekül gebunden wird. Dabei entsteht Zitronensäure und Coenzym A wird abgespalten.

- 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_2 .
Formulieren Sie – analog zu NADH – die Reaktionsgleichung zur Entstehung von FADH_2 . 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 (unter Vernachlässigung von Coenzym A) 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:

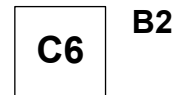
M1 Oxidative Decarboxylierung von Brenztraubensäure

Beim aeroben Abbau von Glukose wird die Brenztraubensäure in anderer Weise umgewandelt als bei den Gärungen, indem neben Kohlenstoffdioxid Essigsäure entsteht, die noch viel Energie enthält. B1 zeigt die Summengleichung dieses Reaktionsschritts in Strukturformeln. Die Essigsäure kommt dabei nicht frei vor, sondern gebunden an Coenzym A (HS-CoA); in dieser Form nennt man sie aktivierte Essigsäure.



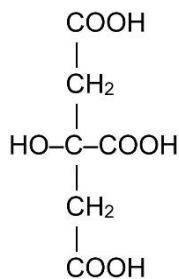
M2 C-Körper-Schema

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: CO₂. Stoffe wie ATP, NADH usw. werden nach wie vor mit ihren üblichen Bezeichnungen geschrieben.) B2 zeigt das Symbol für ein Molekül mit sechs Kohlenstoffatomen.

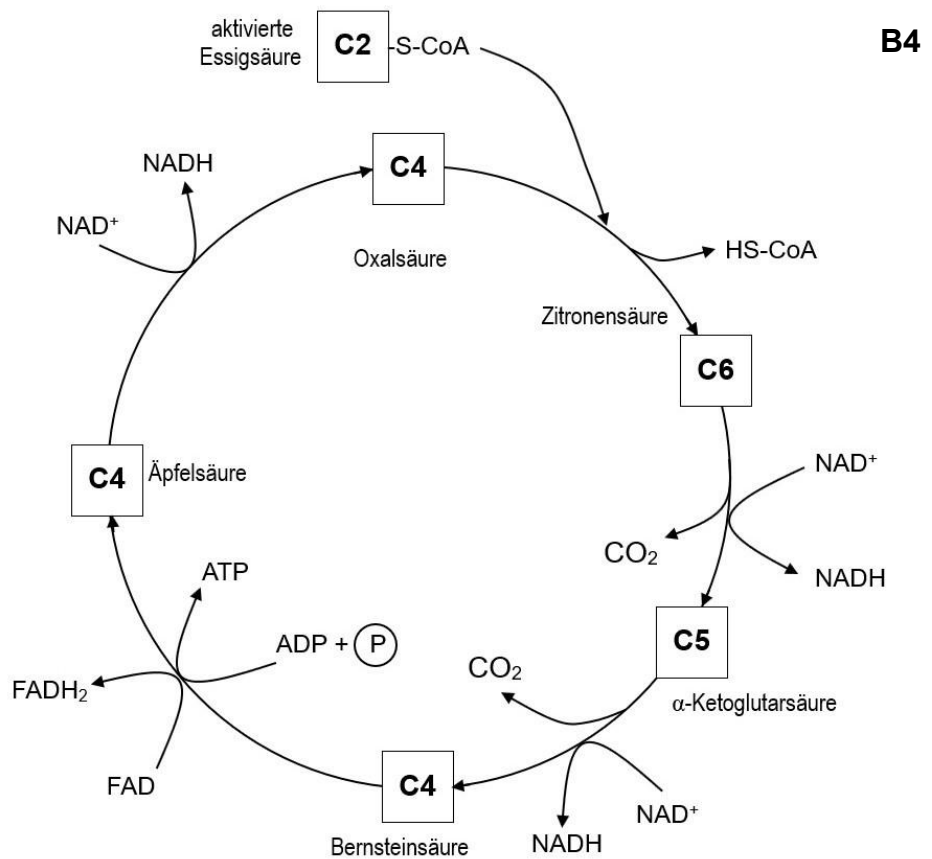


M3 Tricarbonsäure-Zyklus

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



B3

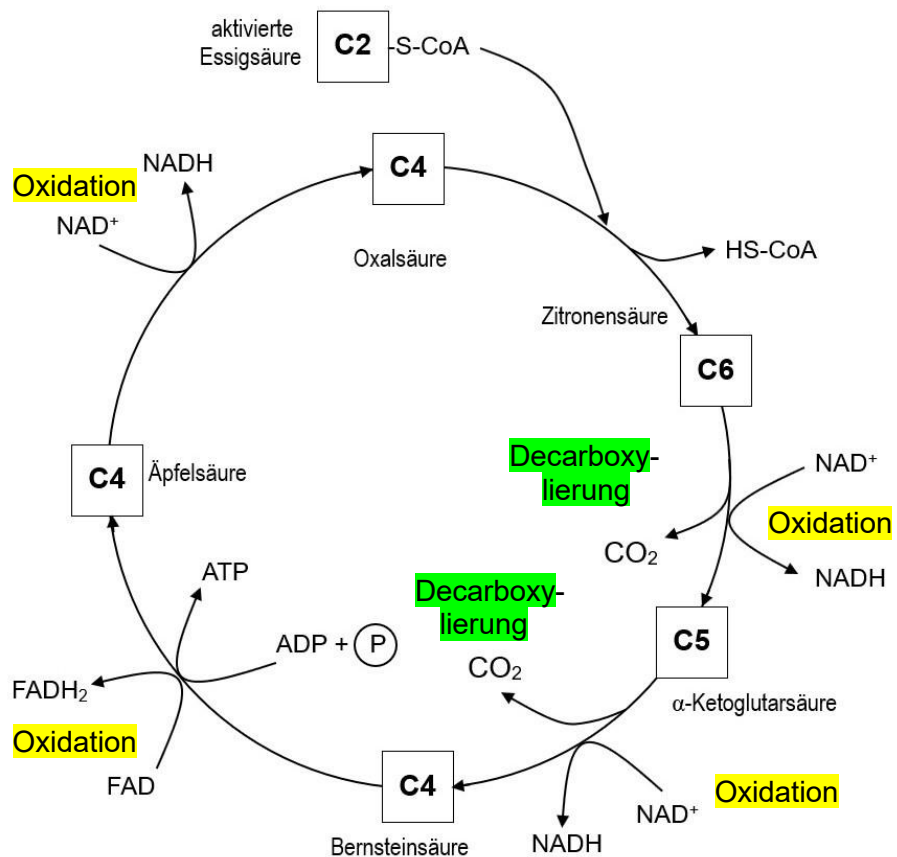


Die Namen der Zwischenprodukte im Trikarbonsäure-Zyklus stellen nach meiner Meinung keine Lerninhalte dar, die Formeln auch im eA-Kurs sowieso nicht.

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 NAD^+ übertragen werden, sodass NADH entsteht.

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

- 3.5
$$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{NAD}^+ + \text{FAD} + \text{ADP} + \text{P} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 3 \text{NADH} + 3 \text{H}^+ + \text{FADH}_2 + \text{ATP}$$

Die Formulierung der Summgleichung unter Berücksichtigung von Coenzym A ist schwieriger zu formulieren, bringt aber keinen echten Zugewinn und wird deshalb weggelassen.

3.6 **Problem 1:** „Regeneration von 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 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 %).

Thomas Nickl, August 2024