**Abbau (2)**

**Gärungen**

**Aufgaben:**

**1 Brenztraubensäure als Elektronen-Akzeptor**

Damit die Glykolyse ablaufen kann, muss genügend NAD+ zur Verfügung stehen. Um NAD+ aus NADH zu regenerieren, wird ein Elektronen-Akzeptor benötigt, der zwei Elektronen von NADH aufnimmt.

Begründen Sie, dass sich Brenztraubensäure – u. a. aufgrund der stöchiometrischen Verhält­nisse – dafür besonders gut eignet.

**2 Milchsäure-Synthese**

2.1 Erstellen Sie aus B1 anhand der Informationen von M1 eine Blackbox-Darstellung zur Synthese von Milchsäure aus Brenztraubensäure, wobei NAD+ aus NADH regeneriert wird (Stoffumwandlung des Energiespeichers von oben nach unten eintragen). Markie­ ren Sie alle energiereichen Stoffe mit Rot. Überprüfen Sie die Koeffizienten.

2.2 Entwickeln Sie aus der Blackbox-Darstellung von 2.1 die Summengleichung der Milch­ säure-Synthese aus Brenztraubensäure.

**3 Milchsäure-Gärung**

3.1 Ergänzen Sie B2 anhand der Blackbox-Darstellungen der Glykolyse sowie der Milch­ säure-Synthese zu einer Doppel-Blackbox-Darstellung der Milchsäure-Gärung. Daraus soll ersichtlich werden, welche Stoffe aus der Glykolyse in die Milchsäure-Synthese einfließen und welche den umgekehrten Weg nehmen. Markieren Sie alle energie­ reichen Stoffe mit Rot. Überprüfen Sie die Koeffizienten.

3.2 Entwickeln Sie aus der Blackbox-Darstellung der (kompletten) Milchsäure-Gärung eine Summen­gleichung dieses Stoffwechselwegs.

**4 Alkohol-Synthese**

4.1 Entwickeln Sie anhand der Informationen von M2 analog zu B1 eine Blackbox-Dar­stel­lung zur Synthese von Ethanol („Trinkalkohol“) aus Brenztraubensäure, wobei NAD+ aus NADH rege­ne­riert wird. Markieren Sie alle energie­reichen Stoffe mit Rot. Über­prüfen Sie die Koeffi­zienten.

4.2 Entwickeln Sie aus der Blackbox-Darstellung von 4.1 die Summengleichung der Alko­ hol-Synthese aus Brenztraubensäure.

**5 Alkoholische Gärung**

5.1 Entwickeln Sie analog zu 3.1 eine Doppel-Blackbox-Darstellung der alkoholischen Gärung. Markieren Sie alle energiereichen Stoffe mit Rot. Überprüfen Sie die Koeffi­zien­ten.

5.2 Entwickeln Sie aus der Blackbox-Darstellung der (kompletten) alkoholischen Gärung eine Summengleichung dieses Stoffwechselwegs.

**6 Bedeutung im Alltag**

Recherchieren Sie je drei Konsumartikel, die durch Milchsäure- bzw. alkoholische Gärung entstehen und listen Sie diese auf.

**Materialien:**

**M1 Milchsäure-Synthese und Milchsäure-Gärung**

Bei der Milchsäure-Synthese innerhalb der sogenannten Milchsäure-Gärung, die bei Sauer­stoff­mangel in unseren Muskeln ab­läuft, wird die Brenztraubensäure, die bei der Glykolyse entstanden ist, durch NADH reduziert, wobei Milchsäure (C3H6O3; ihr Anion C3H5O3– heißt Lactat) entsteht. In der Milchsäure steckt die Energie der Brenztrau­ben­säure und zusätzlich die von NADH abgegebene Energie.

**B1**

**Milchsäure-Synthese**

**B2**

**Glykolyse**

**Milchsäure-Synthese**

**M2 Alkohol-Synthese und alkoholische Gärung**

Hefezellen regenerieren bei Sauerstoffmangel ihr NAD+ mit Hilfe der alkoholischen Gärung. Dabei wird Brenztraubensäure in gleiche Anteile Kohlenstoffdioxid und Ethanol umgewandelt. Ethanol enthält viel Energie, was man daran erkennen kann, dass es mit bläulicher Flamme verbrennt, was beim Flambieren von Speisen genutzt wird.

**Hinweise für die Lehrkraft:**

*Oft wird mit Milchsäuregärung nur die Umwandlung von Brenztraubensäure zu Milchsäure bezeichnet (analog bei der alkoholischen Gärung). Ich nenne diesen Schritt allerdings Milch­säure-Synthese und bezeichne als Milchsäuregärung die gesamte Umwandlung von Glukose zu Milchsäure. Das ist ein didaktischer Trick, um alkoholische und Milchsäuregärung der Zell­atmung gegenüberstellen zu können.*

**1 BTS**

BTS entsteht bei der Glykolyse in genau gleichen Mengen wie NADH. Es stellt in erster Linie ein Abfallprodukt dar, das ohnehin sonst keine Verwendung mehr fände.

*(Ggf. auch: Die Carboxygruppe bzw. die Ketogruppe der Brenztraubensäure lassen sich zur Aldehydgruppe bzw. zur Hydroxygruppe reduzieren.)*

**2 Milchsäure-Synthese**

2.1

NADH + H+

C3H4O3 C3H6O3

BTS Milchsäure

NAD+

**Milchsäure-Synthese**

*Hinweis: Wie bereits bei der Glykolyse am Beispiel der Brenztraubensäure erläutert, ist es sinn­voll, im Unterricht die protonierten Formen der organischen Säuren zu ver­wen­den.*

2.2

C3H4O3 + NADH + H+ → C3H6O3 + NAD+

Brenztraubensäure Milchsäure

**3 Milchsäure-Gärung**

3.1 Doppel-Blackbox: *Nicht ganz einfach zu erstellen, ggf. sind Einhilfen nötig.*

2 NAD+

C6H12O6 2 C3H4O3 2 C3H6O3

Glukose Brenztraubensäure Milchsäure

2 NADH + 2 H+

2 ADP

+ 2

2 ATP

**Milchsäure-Synthese**

**Glykolyse**

3.2 Summengleichung:

Das NAD+/NADH-System steckt in einem inneren Kreis­lauf und fällt deshalb ebenso heraus wie das Zwischenprodukt Brenztraubensäure:

C6H12O6 + 2 ADP + 2 → 2 C3H6O3 + 2 ATP

Glukose Milchsäure

*Die Kursteilnehmer sollten diese Summengleichung unbedingt selbständig aus dem Doppel-Blackbox-Schema erarbeiten, denn dabei wird deutlich klar, dass auch hier die Stoffe innerhalb des Kreislaufs nur Hilfsaufgaben übernehmen und weder als Edukte noch als Produkte auftreten (wie z. B. beim Calvin-Zyklus).*

**4 Alkohol-Synthese**

4.1 Blackbox der Alkohol-Synthese:

NADH + H+

C3H4O3 C2H6O + CO2

BTS Ethanol

NAD+

**Alkohol- Synthese**

*Auf die Vorgänge innerhalb der Blackbox wird nicht eingegangen, auch nicht auf die Frage, ob die Reduktion vor oder nach der Molekülspaltung erfolgt.*

4.2 Summengleichung der Alkoholsynthese:

C3H4O3 + NADH + H+ → C2H6O + CO2 + NAD+

Brenztraubensäure Ethanol

**5 Alkoholische Gärung**

5.1 Doppel-Blackbox:

2 NAD+

C6H12O6 2 C3H4O3

Glukose Brenztraubensäure

2 NADH + 2 H+

2 ADP

+ 2

2 ATP

2 CO2 +

2 C2H6O

Ethanol

**Alkohol-Synthese**

**Glykolyse**

5.2 Summengleichung:

C6H12O6 + 2 ADP + 2 → 2 C2H6O + 2 CO2 + 2 ATP

Glukose Ethanol

**6 Bedeutung im Alltag**, z. B.:

Milchsäure-Gärung: Sauermilch, Jogurt, Sauerrahm, Sauerkraut

alkoholische Gärung: Bier, Wein, Sekt, Prosecco

Thomas Nickl, August 2024