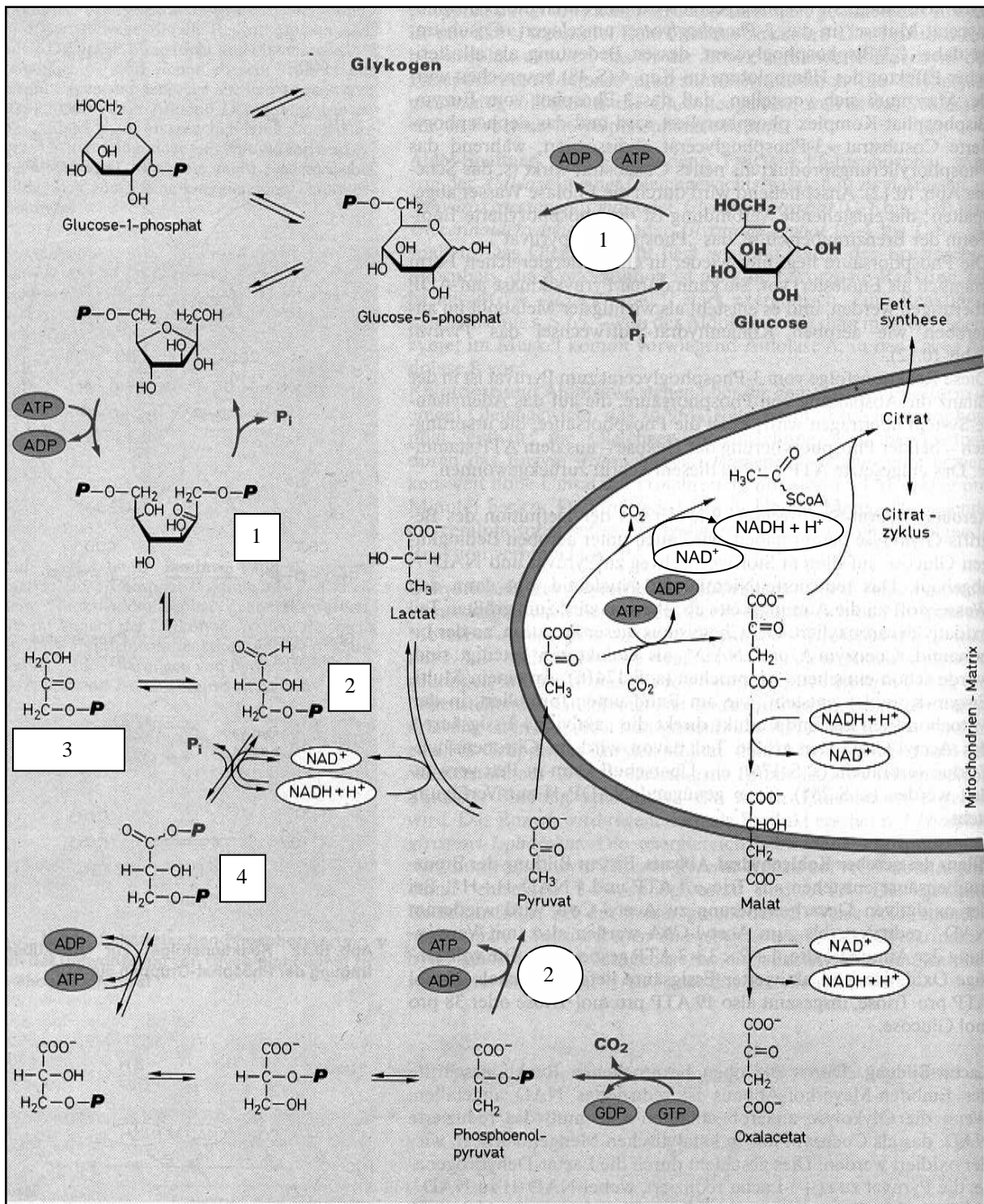


## 5.2. Fragen zu Abbauwegen im Energiestoffwechsel (Katabolismus)

### Stoffwechselwege (16)

In der folgenden Abbildung sind mehrere Stoffwechselwege dargestellt:



- Um welche Stoffwechselwege handelt es sich und in welchen Körperzellen laufen sie ab? (2)
- Geben Sie die Summgleichung mit allen Edukten und Produkten für einen dieser Stoffwechselwege an. (3)
- Benennen sie die Verbindungen 1 bis 4. (2)
- Geben Sie den Reaktionstyp der Reaktionen 1 (beide Richtungen!) und 2 an. (2)
- Welche Bedeutung haben die Reaktionen 1 und 2 für die Umkehrbarkeit der dargestellten Stoffwechselwege? (2)
- Oxalacetat kann in bestimmten Stoffwechselsituationen aus Aminosäuren gewonnen werden. Geben Sie den Namen dieser Reaktion an und formulieren Sie eine Reaktionsgleichung. (3)
- In welcher Stoffwechselsituation und aus welchem Grund läuft diese Reaktion ab? (2)

## Lösung

- Glycolyse in allen Körperzellen; Gluconeogenese in den Leberzellen.
- aerober Abbau von Glucose zu aktivierter Essigsäure (Glycolyse):  

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 2 \text{ADP}^- + 2 \text{H}_2\text{PO}_4^- + 4 \text{NAD}^+ \rightarrow 2 \text{Acetyl-S-CoA} + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{ATP}^{2-} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{NADH} + 2 \text{H}^+$$
- 1: Fructose-1,6-diphosphat, 2: Dihydroxyaceton-3-phosphat, 3: Glycerinaldehyd-3-phosphat, 4: 1,3-Diphosphoglycerat.
- 1: Hinreaktion: Phosphorylierung bzw. Veresterung; Rückreaktion: Dephosphorylierung bzw. Esterhydrolyse  
 2: Substratketten-Phosphorylierung und Keto-Enol-Tautomerie
- 1: Umkehrung der Phosphorylierung unter Rückgewinn von ATP ist unmöglich, daher einfache Esterhydrolyse ohne Energiegewinn bei der Gluconeogenese.  
 2: Umkehrung der Substratketten-Phosphorylierung ist unmöglich, daher Umweg über Malat bei der Gluconeogenese.
- Transaminierung von Asparaginsäure mit  $\alpha$ -Ketoglutarat zu Oxalacetat und Glutaminsäure.  
 Anschließend oxidative Desaminierung der Glutaminsäure mit einem weiteren Molekül Asparaginsäure zu Fumarsäure und Harnstoff
- Hungerstoffwechsel nach Aufbrauch der Glykogenvorräte: Oxalacetat wird für die Gluconeogenese und den Citratzyklus (Lipolyse) benötigt.

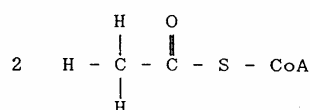
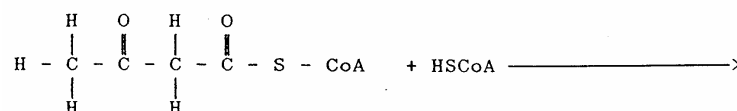
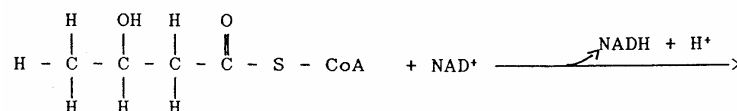
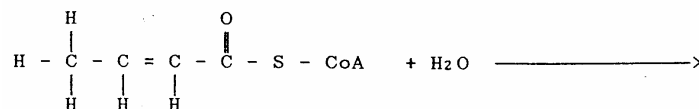
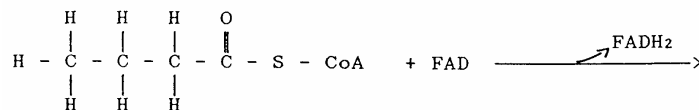
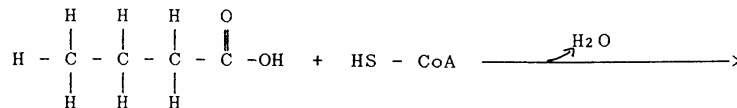
## $\beta$ -Oxidation (14)

Fett ist der Nährstoff mit dem höchsten Energiegehalt. Dies liegt zum einen an der strukturellen Verknüpfung der enthaltenen Atome und zum anderen an dem Abbauweg, den seine Bausteine im Körper durchlaufen.

- Beschreiben Sie mit Formeln den Abbau von Buttersäure zu zwei C2-Körpern. (4)
- Der Name für diesen Abbau lautet " $\beta$ -Oxidation". Erläutern Sie an entsprechenden Molekülstellen mit Hilfe von Oxidationszahlen, womit der Name " $\beta$ -Oxidation" begründet werden kann. (3)
- Berechnen Sie die energetische Ausbeute in Mol ATP für den vollständigen Abbau von 1 Mol Buttersäure zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ . (3)
- Berechnen Sie, wie viel Energie in KJ (in Form von ATP) der Organismus gewinnt, wenn er 5 g Buttersäure vollständig abbaut und zeigen Sie, welche Unterschiede sich in der Energiebilanz ergeben, wenn der Organismus statt Buttersäure die Substanz  $\beta$ -Hydroxy-Buttersäure vollständig abbaut. (1 Mol ATP  $\sim$  29 kJ) (4)

## Lösung

- Abbau von Buttersäure zu zwei C2-Körpern:



- Folgende Oxidationszahlen ergeben sich jeweils am  $\beta$ -C-Atom: -II / -II / -I /  $\pm 0$  / +II  
 Insgesamt ändert sich also die Oxidationszahl am  $\beta$ -C-Atom von -II nach +II, d.h. es wurden formal 4 Elektronen abgegeben, d.h. das  $\beta$ -C-Atom wurde oxidiert.

c) Eine  $\beta$ -Oxidation liefert

Aktivierung : - 2 ATP  
 1  $\text{FADH}_2$  : 2 ATP  
 1  $\text{NADH} + \text{H}^+$  : 3 ATP  
 2 akt. Essigsäure : 2 · 12 ATP = 24 ATP  
 => 1 Mol Buttersäure liefert also 27 Mol ATP.

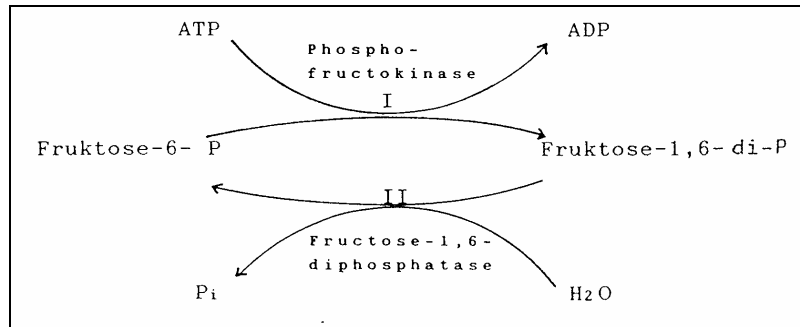
d) 1 Mol = 88 g Buttersäure liefern 27 Mol ATP bzw. 783 kJ

5 g Buttersäure liefern also  $783 \text{ kJ} / 88 \text{ g} \cdot 5 \text{ g} = 44,5 \text{ kJ}$ .

Wenn der Körper b-Hydroxy-Buttersäure abbaut, entfällt die Dehydrierung mit FAD, d.h. es werden 2 Mol ATP weniger gewonnen.

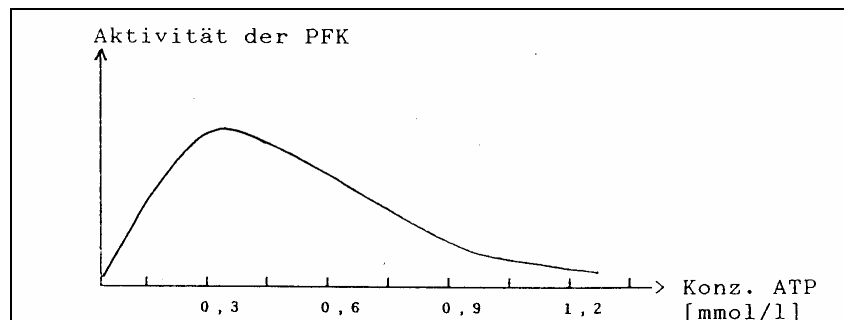
### Glycolyse (13)

Folgende Reaktionen sind Teilschritte von Stoffwechselwegen:



a) Ordnen Sie die beiden Schritte (I) und (II) den Stoffwechselwegen Glycolyse bzw. Gluconeogenese zu. (1)

b) Phosphofruktokinase (PFK) ist ein sogenanntes Schlüsselenzym im aeroben Nährstoffabbau. In der folgenden Graphik ist die Aktivität der PFK in Abhängigkeit von der zugesetzten ATP-Menge dargestellt.



Interpretieren Sie den Kurvenverlauf zum Zeitpunkt der ATP-Konzentrationen 0,0; 0,3 und 1,2 mmol/l. (3)

c) Welche biologische Bedeutung liegt in der Abhängigkeit der PTK von der ATP-Menge? Erläutern Sie Ihre Vorstellungen. (3)

d) Durch einen erblich bedingten Mangel an Fructose-1,6-diphosphatase kann der Stoffwechselschritt II nur erschwert ablaufen. Nachstehende Tabelle vergleicht Werte zwischen einem Gesunden und einem Erbkranken 20 Stunden nach der letzten Nahrungsaufnahme.

Erläutern und begründen Sie für die beobachteten Größen jeweils die physiologischen Zusammenhänge. (6)

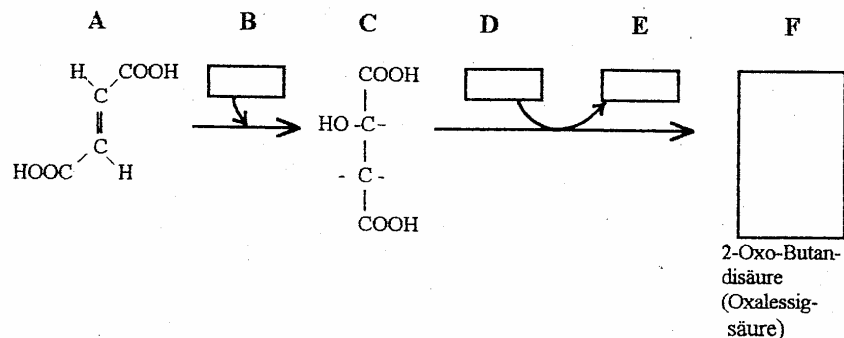
Beobachtete Meß-Größe	Gesunder	Erbkranker
Glukosespiegel	leicht abgefallen	stark abgefallen
Alaninspiegel	leicht erhöht	stark erhöht
Laktatspiegel	normal	leicht erhöht

## Lösung

- a) I : Glykolyse  
II : Glukoneogenese
- b) - Bei geringen ATP-Anteilen ist die Phosphorylierung mangels Cosubstrat erschwert, folglich ist auch die Aktivität des Enzyms sehr gering.  
- bei Mengen um ca. 0,3 mmol/l ATP zeigt PPK höchste Aktivität, d.h. es wird viel Fru-6-P phosphoryliert, die aus der Glycolyse stammt.  
- mit steigender ATP-Konz. sinkt die Aktivität des Enzyms vermutlich mangels Substrat Fru-6-P, da die Glykolyse gehemmt wird (s.u.). (3)
- c) Wird das durch die Endoxidation gebildete ATP nicht mehr gebraucht, kann es durch seine hohe Konzentration die Glykolyse hemmen und dadurch unnötigen Glucoseabbau verhindern. (3)
- d) Bei beiden gilt: fehlende Blutglucose führt zur Ausschüttung von Glucagon, Glykogenreserven werden aufgebraucht, Proteine unterliegen dem Abbau. (2)  
Gesunder: Blutglucosespiegel sinkt nicht so stark ab, da Gluconeogenese möglich; Verwendung der entstehenden Aminosäuren für Gluconeogenese, daher nur geringer Alaninanstieg. Gebildetes Lactat wird weiterverwertet (Gluconeogenese) und verändert den Blut-pH nicht. (3)  
Kranker: Durch fehlende Gluconeogenese fällt der Blutglucosespiegel drastisch ab, Anhäufung von Aminosäuren und Lactat, die nicht weiter verwertet werden können. (1)

## Citratzyklus (10)

Der Zitratzyklus nimmt eine zentrale Stellung im Stoffwechsel ein. Folgendes Schema zeigt einen Ausschnitt aus dem Zitratzyklus.



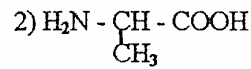
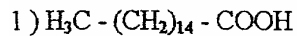
- a) Benennen Sie die Verbindung A mit dem systematischen Namen. (1)
- b) Ergänzen Sie das Schema an den Stellen B, D, E und F durch Angabe der Strukturformeln bzw. Namensabkürzungen der fehlenden Verbindungen. (Bitte nicht in das Aufgabenblatt schreiben!) (2)
- c) Geben Sie die Reaktionstypen der beiden Reaktionsschritte im oben abgebildeten Schema an. (2)
- d) Oxalacetat ist ein Schlüsselmolekül des Stoffwechselgeschehens. Erläutern Sie jeweils die Rolle der Oxalacetat in den folgenden Stoffwechselwegen  
- Citratzyklus  
- Glucosese Synthese aus Milchsäure und Asparaginsäure (2-Amino-butandisäure). (6)

## Lösung

- a) trans-Butendisäure (1)
- b) B:  $\text{H}_2\text{O}$ ; D:  $\text{NAD}^+$ ; E:  $\text{NADH} + \text{H}^+$ ; F: Strukturformel von Oxalacetat (2)
- c) 1. Schritt: elektrophile Addition; 2. Schritt: Redoxreaktion (1)
- d) Citratzyklus: Oxalacetat ist beteiligt an der Startreaktion: sie reagiert mit aktivierter Essigsäure zu Citronensäure. Aufgabe: Oxidation der ak. Essigsäure zu  $\text{CO}_2$ , Übertragung des Wasserstoffs auf Co-Enzyme, ATP-Bildung. (3)  
- Glucosese Synthese: Milchsäure und Asparaginsäure können zu Oxalacetat umgebaut werden und dann nach Anlagerung von  $\text{CO}_2$  in die Gluconeogenese einmünden. Aufgabe: Sicherstellung der Glucoseversorgung von Nervenzellen, Erythrocyten. (3)

### Acetyl-CoA (7)

- a) Acetyl-CoA ist eine zentrale Verbindung des Energiestoffwechsels. Geben Sie die Stoffwechselwege an, über die die zwei folgenden Substanzen in Acetyl-CoA umgewandelt werden können. Berechnen Sie ferner, wieviele mol ATP beim jeweiligen Abbau von einem mol der Substanzen 1 und 2 zu Acetyl-CoA entstehen. (4)



- b) Acetyl-CoA dient als Ausgangsstoff für die Bildung von Ketonkörpern. Erläutern Sie zwei Stoffwechselbedingungen, unter denen es im Organismus zu einer gesteigerten Ketonkörperbildung kommt und geben Sie deren biologischen Sinn an. (3)

### Lösung

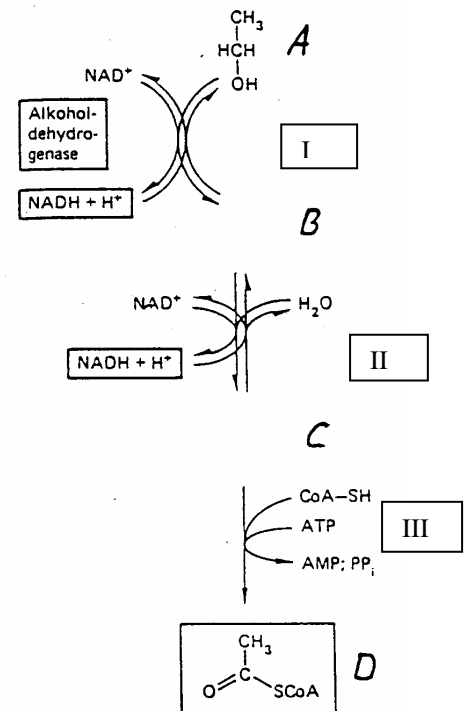
- a) Palmitinsäure:  $\beta$ -Oxidation zu 8 Molekülen Acetyl-S-CoA  $\Rightarrow$  Energiebilanz pro mol Palmitinsäure: 7 Durchläufe der  $\beta$ -Oxidation ergeben 7  $\text{FADH}_2$  und 7  $\text{NADH} + \text{H}^+ \Rightarrow 35$  ATP abzüglich 2 ATP für die Aktivierung der Fettsäure. (2)  
Alanin: Desaminierung oder Transaminierung zu Brenztraubensäure, anschließend ox. Decarboxylierung zu Acetyl-S-CoA Energiebilanz: 2  $\text{NADH} + \text{H}^+ \Rightarrow 6$  ATP (2)
- b) - bei Mangel an Reduktionsäquivalenten ( $\text{NAD}^+$ ) und vermehrter Acetyl-S-CoA-Bildung durch Fettsäureabbau. ( $\beta$ -Oxidation), kondensiert Acetyl-S-CoA  $\Rightarrow$  Ketonkörperbildung.  
- bei Mangel an Oxalacetat infolge verstärkter Gluconeogenese, z.B. bei Diabetes, werden ebenfalls vermehrt Ketonkörper gebildet. Bedeutung: z.B.: bei Glucosemangel können Ketonkörper zur Energieversorgung der Gehirn- und Nervenzellen herangezogen werden. (3)

### Alkoholabbau (6)

Das folgende Schema zeigt den schrittweisen Abbau von Alkohol im menschlichen Körper.

Benennen Sie die Stoffe A - D und geben Sie die Reaktionstypen I - III an. (3)

Erläutern Sie in Stichworten drei weitere Stoffwechselwege für das gebildete Produkt D. (3)

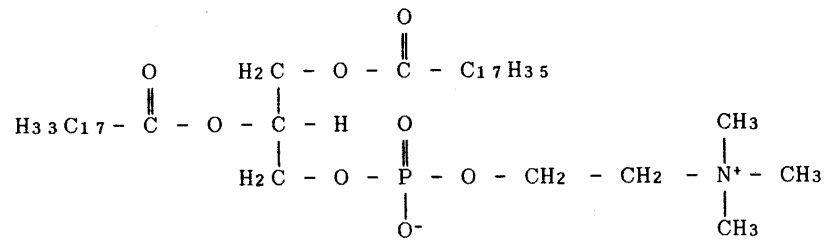


### Lösung

- a) A) Ethanol B) Ethanal C) Ethansäure D) Acetyl-CoA I, II Oxidation, III Veresterung
- b) Lipogenese aus der entsprechenden Anzahl Acetyl-S-CoA  $\Rightarrow$  Energiespeicherung  
Abbau über Citratcyclus und Atmungskette  $\Rightarrow$  Energiegewinn  
Cholesterinsynthese  $\Rightarrow$  Membranstoffwechsel, Gallensäuren

### Lecithin (10)

Eine wichtige Komponente des Bienengiftes ist das Enzym Phospholipase A2. Die Wirkung beruht unter anderem darauf, dass es das Lecithin (s. Strukturformel unten) an der mittelständigen Estergruppe spaltet und eines der Spaltprodukte die Membran der roten Blutkörperchen auflöst.

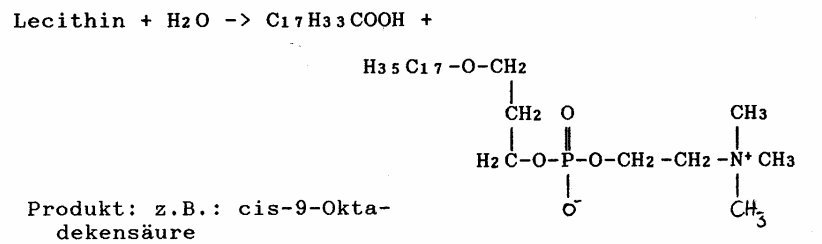


Lecithin

- Formulieren Sie die Reaktionsgleichung für die enzymatische Spaltung des Lecithins (verkürzte Strukturformel) durch das Enzym Phospholipase A2 und benennen Sie ein Reaktionsprodukt. (2)
- Eines der Spaltprodukte kann weiter hydrolysiert werden. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung und geben Sie die Namen von drei Hydrolyseprodukten an. (2)
- Geben Sie für den Abbau von zwei Hydrolyseprodukten aus b) die Namen aller beteiligten Stoffwechselwege und ihre jeweiligen Endprodukte an. (4)
- Beschreiben Sie den ersten Schritt des Abbaus von einem Hydrolyseprodukt aus c) durch einen Reaktionsgleichung mit Strukturformeln und Namen und geben Sie den Reaktionstyp an. (2)

### Lösung

a)



- Produkt aus a) + 3 H<sub>2</sub>O → C<sub>19</sub>H<sub>35</sub>COOH (Stearinsäure) + HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Dihydrogenphosphat) + HOCH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>N(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub><sup>+</sup> (Cholin) + CH<sub>2</sub>OHCHOHCH<sub>2</sub>OH (Glycerin)
- Stearinsäure: β-Oxidation zu Acetyl-S-CoA, FADH<sub>2</sub>, NADH + H<sup>+</sup>, Citratcyclus zu CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NADH + H<sup>+</sup>, GTP, ATP, Atmungskette zu H<sub>2</sub>O, ATP  
Glycerin: Aktivierung und Oxidation zu Dihydroxyacetonphosphat, Glycolyse zu Pyruvat, NADH + H<sup>+</sup>, ox. Decarboxilierung zu Acetyl-S-CoA und NADH + H<sup>+</sup>, Citratcyclus und Atmungskette wie oben
- Stearinsäure: Kondensation (=Aktivierung) mit HS-CoA gekoppelt mit Hydrolyse von ATP zu AMP und 2 P<sub>i</sub>.  
Glycerin: Kondensation (=Aktivierung) mit P<sub>i</sub> gekoppelt mit Hydrolyse von ATP zu ADP

### Aufbau von Aminosäuren (6)

Der Stoffwechsel ist nur begrenzt anpassungsfähig.

- Der Organismus kann bei Bedarf Aminosäuren selbst herstellen. Zeigen Sie einen Syntheseweg mit Hilfe einer Reaktionsgleichung mit Strukturformeln und Namen am Beispiel der Bildung von Alanin und bezeichnen Sie diesen Reaktionstyp. (3)
- Kleinkindern, die zur Stillung ihres Hungers fast ausschließlich Maisbrei erhalten, entwickeln selbst bei ausreichender Zufuhr an Nahrungsenergie, Vitaminen und Mineralstoffen Ödeme und eine Fettleber. Begründen Sie die Entstehung dieser Symptome. (3)

### Lösung

- Infolge des Mangels an essentiellen Aminosäuren  
Eiweißmangel im Blut führt zu Hypotonie, so dass sich Wasser im Gewebe ansammelt;  
Lipoproteinmangel in der Leber, so dass in der Leber gebildete Triglyceride nicht abtransportiert werden.
- Transaminierung: Brenztraubensäure/Pyruvat + Glutaminsäure → Alanin + Ketopentandisäure