

Inhalt:

- [13.1 - Der Energietransport](#)
- [13.2 - Die Glycolyse](#)
- [13.3 - Der Citronensäurezyklus](#)
- [13.4 - Der Harnstoffzyklus](#)
- [13.5 - Der Fettabbau](#)
- [13.6 - Verknüpfungen im Zellstoffwechsel](#)
- [13.7 - Lernkontrolle](#)
- [13.8 - Literatur](#)
- [13.9 - Web-Links](#)


Lernziele:

Nach der Bearbeitung dieses Kapitels sollten Sie



- wissen wie die Energie in Zellen übertragen werden kann
- wissen wie Wasserstoff in Zellen übertragen werden kann
- die Klassierung der Nahrungsmittel kennen
- die Bedeutung des Citronensäurezyklus kennen
- die Bedeutung des Harnstoffzyklus kennen
- wissen, wie der Kohlenhydratabbau funktioniert
- wissen, wie Fette verarbeitet werden
- das Zusammenspiel der einzelnen Abbauvorgänge kennen

13.1 Der Energietransport

Der [Zellstoffwechsel](#)  ist der zentrale Vorgang in einer Zelle, bei welcher Energie gewonnen wird. Die Gewinnung der Energie ist notwendig zur Erhaltung wichtiger physiologischer Vorgänge, z. B. zur Kontraktion von Muskeln.

Es ist schliesslich nicht ein einziger Prozess, der die notwendige Energie liefert, sondern es sind mehrere Prozesse am Ganzen beteiligt. Die Energie entnehmen wir unserer Nahrung, die wir grob in die Kategorien

[Kohlehydrate](#)

[Fette](#)

[Proteine](#)

einteilen können. Wie der Abbau der einzelnen Ernährungsclassen vor sich geht, ist in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

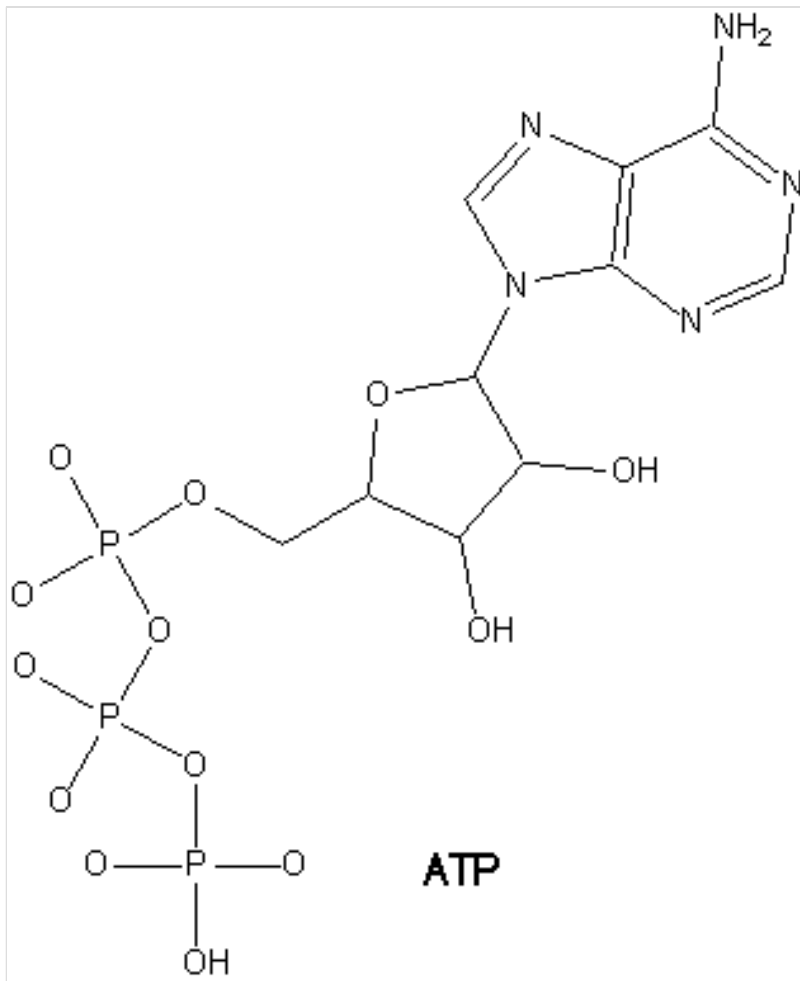


Bild 13.1: ATP

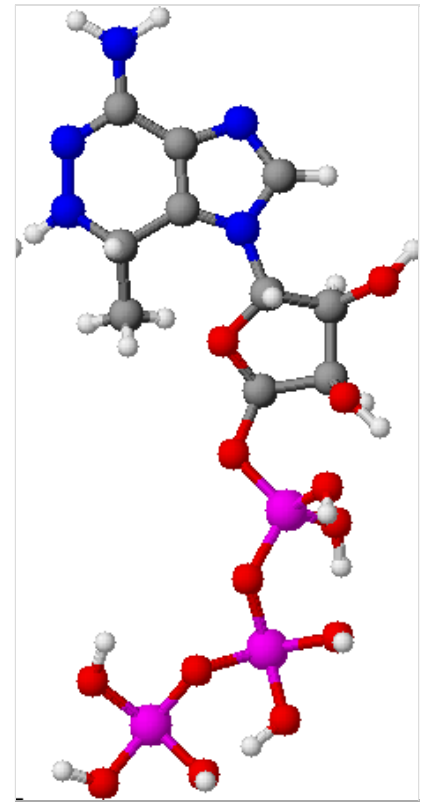


Bild 13.2: ATP

Wichtig für eine Zelle selbst ist die Energieübertragung. Damit chemische Reaktionen überhaupt ablaufen können, ist Energie, Aktivierungsenergie notwendig.

Die Natur hat einen einzigen Stoff, [ATP](#) entwickelt, welcher als universeller Transport- und Speicherstoff für Energie schlechthin dient. Die Energie, die in ATP gespeichert ist, ist in den chemischen Bindungen selbst gespeichert. Es sind die energiereichen Phosphatbindungen, bei deren Spaltung Energie freigesetzt werden kann. Diese Energie dient [Enzymen](#) als [Aktivierungsenergie](#) für ganz verschiedene Prozesse.

Energieübertragung durch ATP

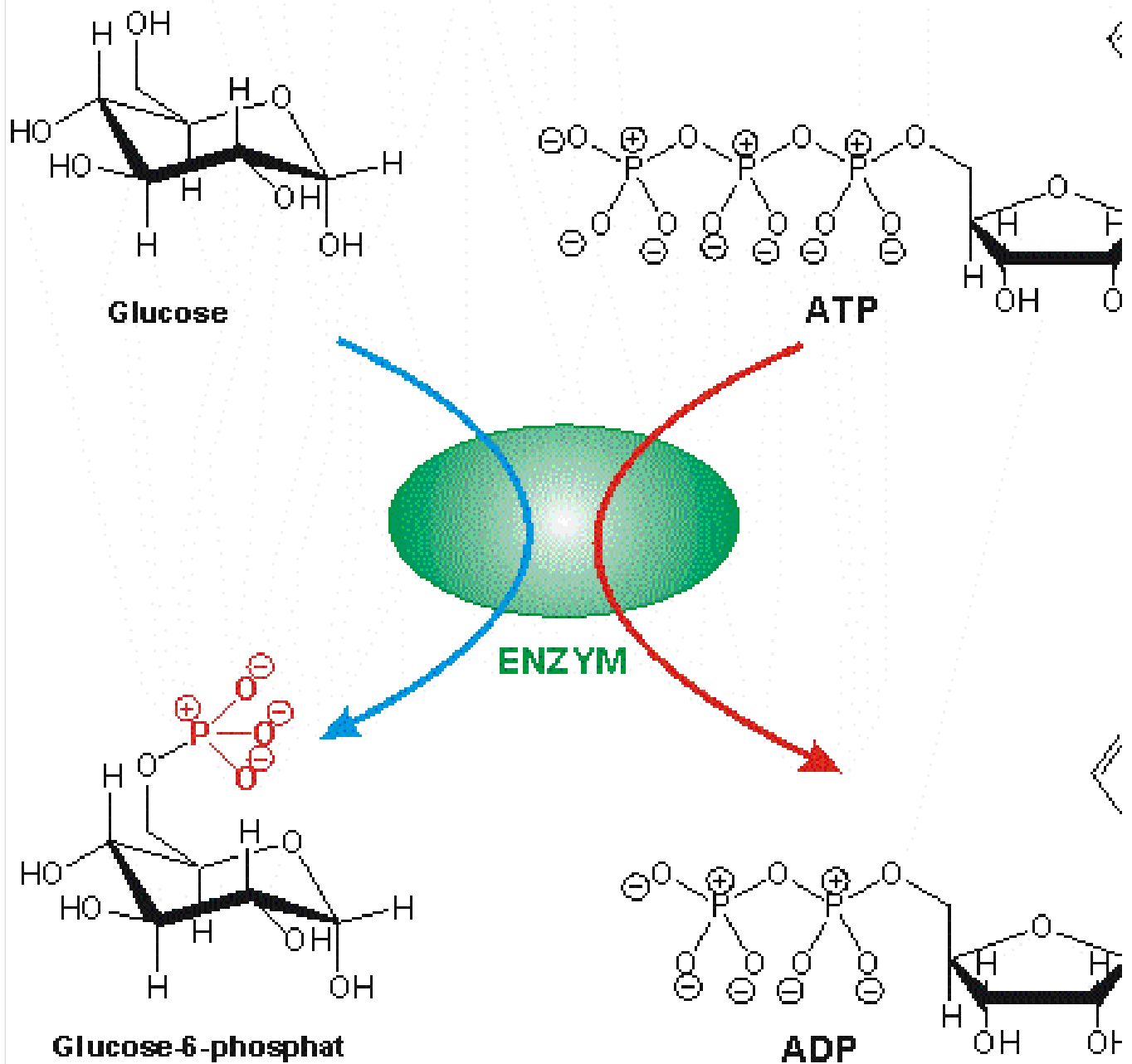
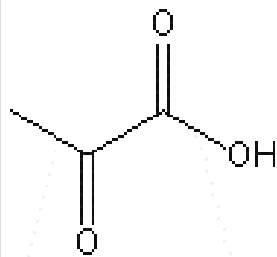


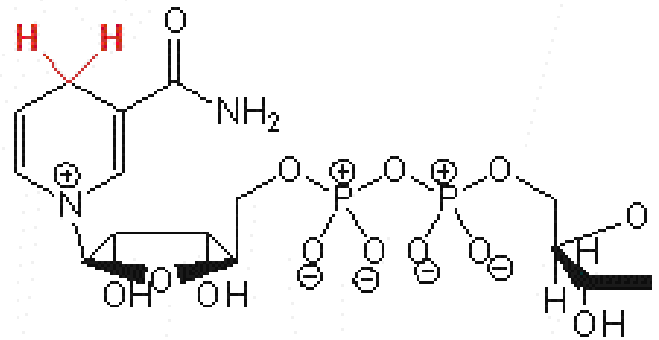
Bild 13.3: ATP und Energie

Ein ebenso wichtiger Prozess wie die Übertragung der Energie ist die Übertragung von Wasserstoffatomen. So entsteht z. B. in den Muskeln bei starker Belastung durch eine reduktive Wasserstoffübertragung aus Brenztraubensäure Milchsäure. Der Wasserstoff wird von einem ebenso universellen Molekül, dem Coenzym [NADH](#) , Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid geliefert. Es besitzt die Fähigkeit Wasserstoff locker zu binden und ihn bei Bedarf wieder abzugeben.

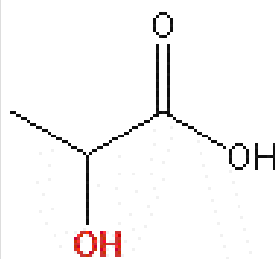
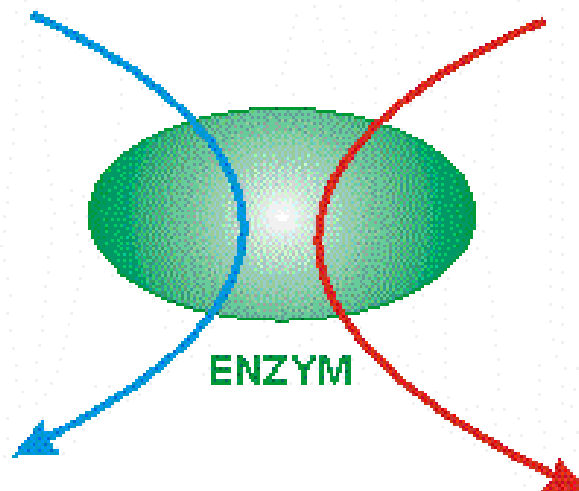
Wasserstoffübertragung durch NADH



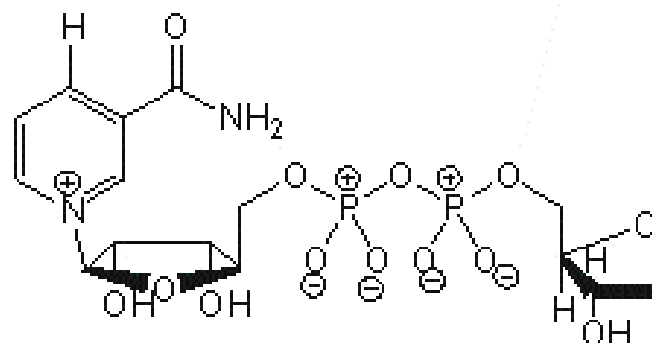
Brenztraubensäure



Nicotin-Adenin-Dinucleotid NADH




Milchsäure



Nicotin-Adenin-Dinucleotid NAD⁺

Bild 13.4: Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid

13.2 Die Glycolyse

Die [Glycolyse](#)  beschreibt die Umwandlung, den Abbau von Kohlehydraten. [Kohlehydrate](#) nehmen wir in der Nahrung in Form von Monosacchariden, z. B. Glucose, Disacchariden, z. B.

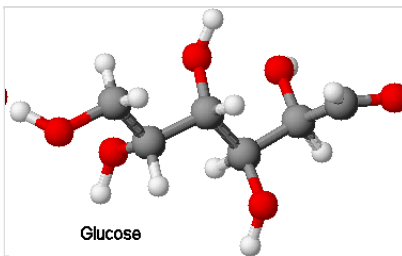


Bild 13.5: Glucose

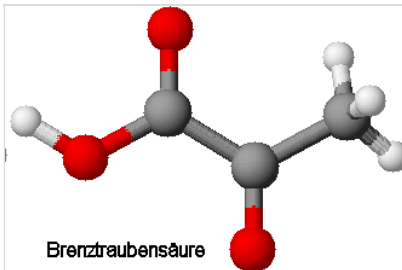


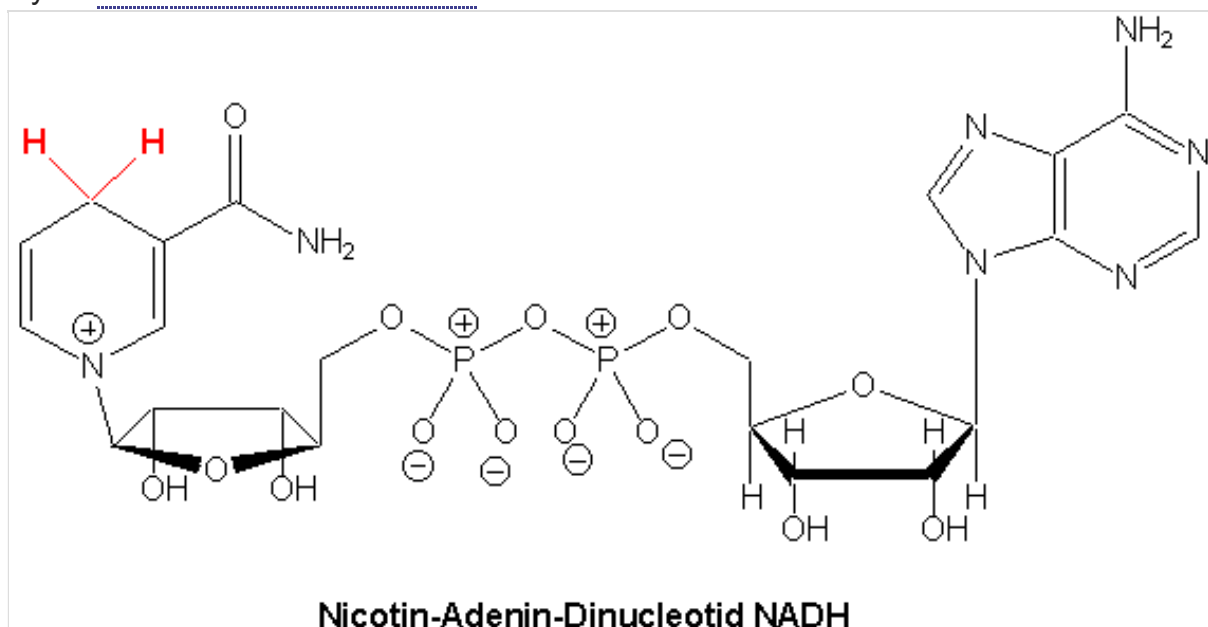
Bild 13.7: Brenztraubensäure

[Saccharose](#) oder Polysacchariden, vor allem Stärke zu uns. Die erste Phase des Verdauungsvorganges spaltet die Di- und Polysaccharide in blutbahngängige Glucoseeinheiten, die dann in der Glycolyse verwertet werden. Bei diesem Prozess wird im Cytoplasma eine Glucoseeinheit C_6 in zwei Einheiten [Brenztraubensäure](#) C_3 umgewandelt.

Die Glycolyse beginnt mit einer Aktivierung der Glucose. Unter Verbrauch einer [ATP-Einheit](#) wird [Glucose-6-phosphat](#) gebildet. [Glucose-6-phosphat](#) ist energiereicher und damit reaktionsfreudiger. In dieser Form kann es die Zellmembran nicht mehr durchdringen, bleibt also in der Zelle gefangen. Nach einer Umlagerung zu [Fructose-6-phosphat](#) [\(Bild\)](#) wird das Molekül erneut phosphoryliert zu Fructose-1,6-bisphosphat, welches schliesslich in zwei C_3 -Einheiten gespalten wird, in [Glycerinaldehyd-3-phosphat](#) [\(Bild\)](#) und [Dihydroxyacetonphosphat](#) [\(Bild\)](#) . Diese beiden Moleküle stehen miteinander in einem [chemischen Gleichgewicht](#).

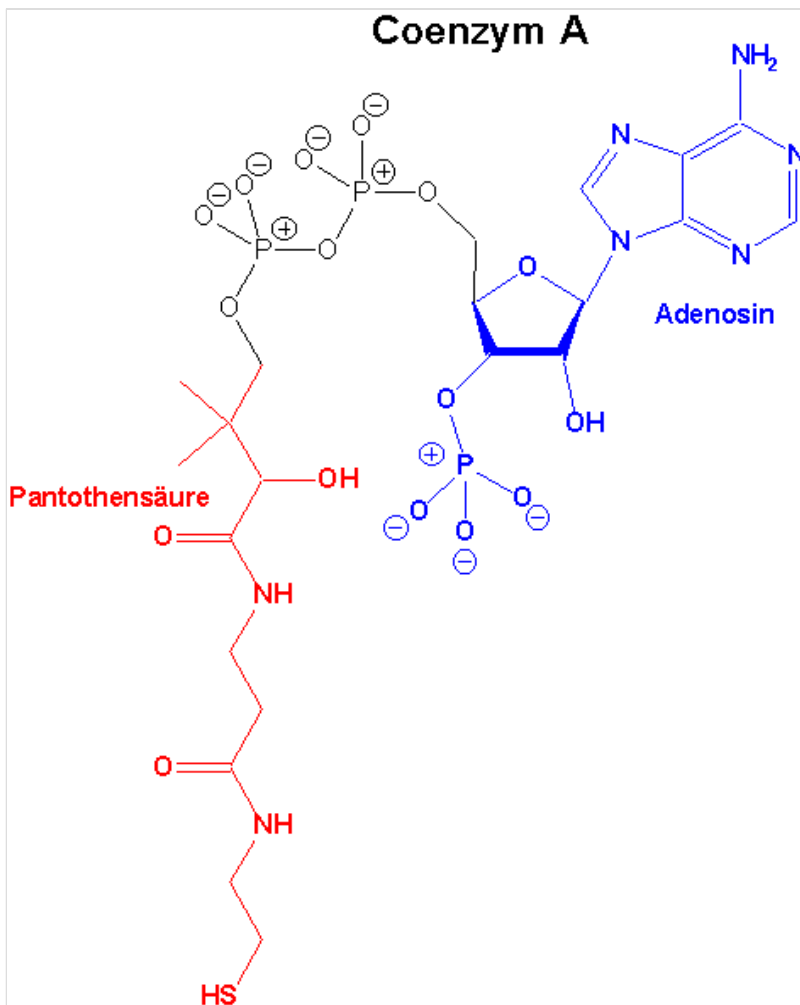
Glycerinaldehyd wird in einem weiteren Schritt [oxidiert](#) und phosphoryliert zu [Glycerinsäure-1,3-bisphosphat](#) . Dieser Schritt, die Oxidation des Aldehyds ist der energieliefernde Schritt in der Glycolyse.

Alles über alles gesehen erwirbt sich eine Zelle bei der Glycolyse einen Gewinn an Energie in Form zweier Moleküle ATP pro Glucosemolekül. Im weiteren entstehen zwei Moleküle des Coenzyms [Nicotin-Adenin-Dinucleotid](#)



(NADH), welches der Zelle für weitere Reaktionen zur Verfügung steht. [Die Glycolyse](#)

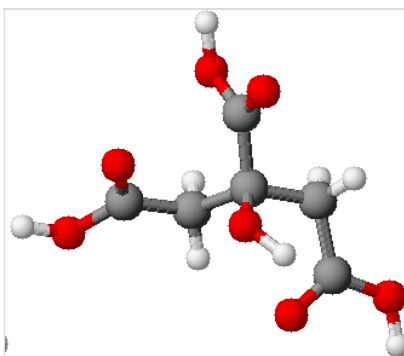
13.3 Der Citronensäurezyklus



Bei der Glycolyse wird [Glucose](#) in zwei Moleküle [Brenztraubensäure](#) gespalten. Die Brenztraubensäure wird in einem weiteren Schritt, einer oxidativen Decarboxylierung zerlegt. Dabei wird CO_2 abgespalten und gleichzeitig NADH gebildet. Es bleibt schliesslich eine C_2 -Einheit, ein Essigsäurerüst übrig, welches sich mit dem [Coenzym A](#) zu [Acetyl-Coenzym A](#) verbindet. In dieser Weise wurde die C_2 -Einheit in einen reaktiveren Zustand, das Acetyl-CoA versetzt. Acetyl-CoA ist eine zentrale Verbindung im gesamten Stoffwechsel, es wird im weiteren Verlauf des Kohlenhydratstoffwechsels in den Citronensäurezyklus eingebracht.

Im [Citronensäurezyklus](#) verknüpft sich Acetyl-Coenzym A mit [Oxalessigsäure](#) , wobei das Coenzym A abgespalten wird. Aus der [Oxalessigsäure](#) , einer C_4 -

Einheit wird in dieser Weise eine C_6 -Einheit, [Citronensäure](#) gebildet.



n einem mehrstufigen Kreisprozess wird von der Citronensäure nun insgesamt zweimal CO_2 abgespalten und über die Stationen [Isocitronensäure](#) (Bild) , [α - Ketoglutarensäure](#) (Bild) , [Bernsteinsäure](#) (Bild) , [Fumarsäure](#) (Bild) und [Apfelsäure](#) (Bild) entsteht erneut Oxalessigsäure. Die Oxalessigsäure steht nun für den Kreisprozess wieder zur Verfügung, durch die Reaktion mit Acetyl-Coenzym A entsteht wieder Citronensäure und der Zyklus kann von neuem beginnen. Neben den zwei Molekülen CO_2 , die während des Kreisprozesses entstehen, bilden sich drei Einheiten NADH und ein Molekül [FADH₂](#) (Bild) . So wird also der gesamte

Wasserstoff, der beim Reaktionszyklus entsteht an wasserstoffübertragende Coenzyme gebunden und in dieser Weise für weitere Reaktionen konserviert.

Der Citronensäurezyklus

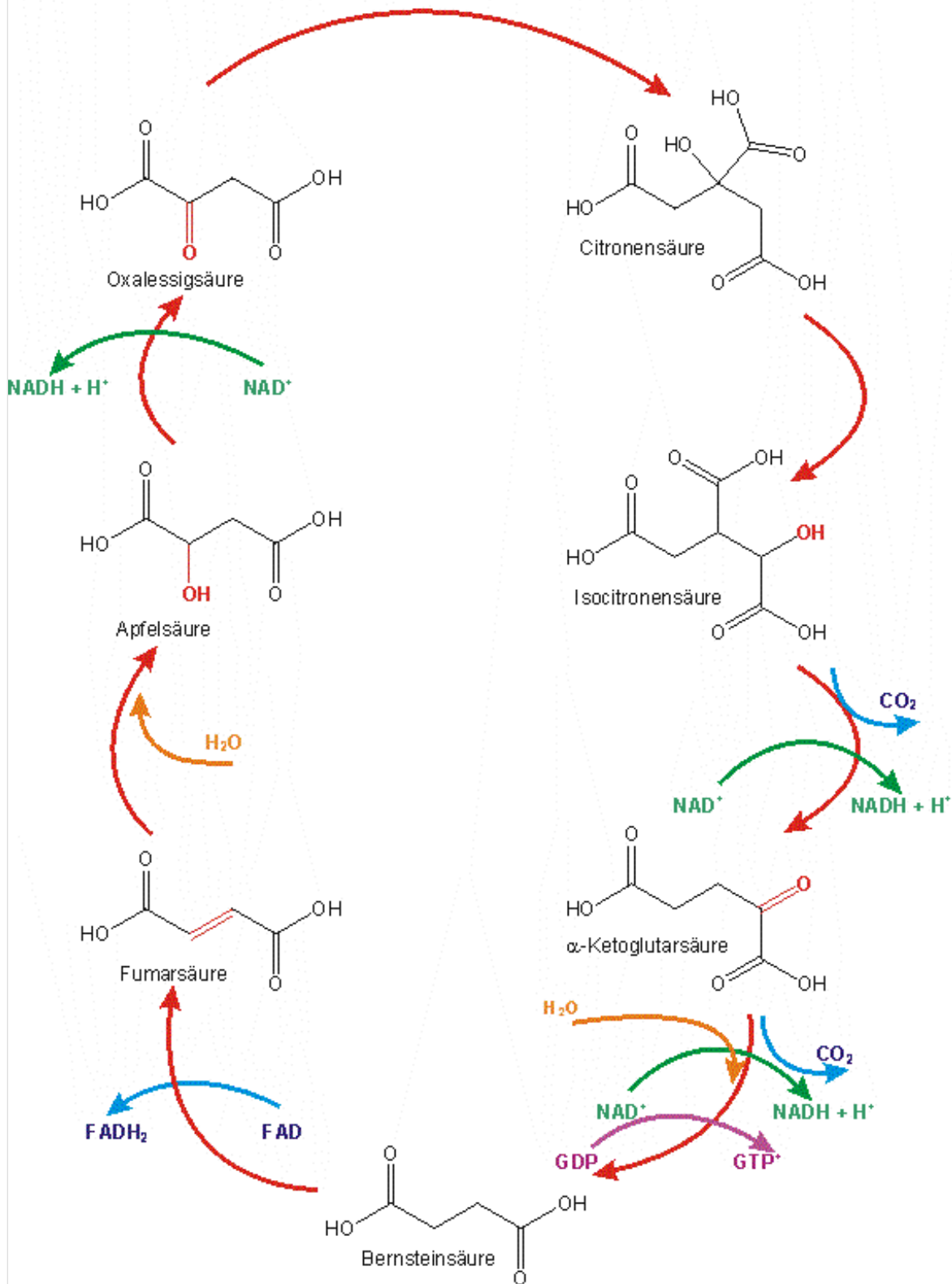


Bild 13.26: Der Citronensäurezyklus

13.4 Der Harnstoffzyklus

Der Harnstoffzyklus  ist ein Analogon zum Citronensäurezyklus allerdings mit dem Zweck

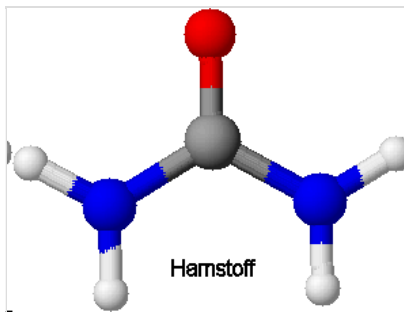







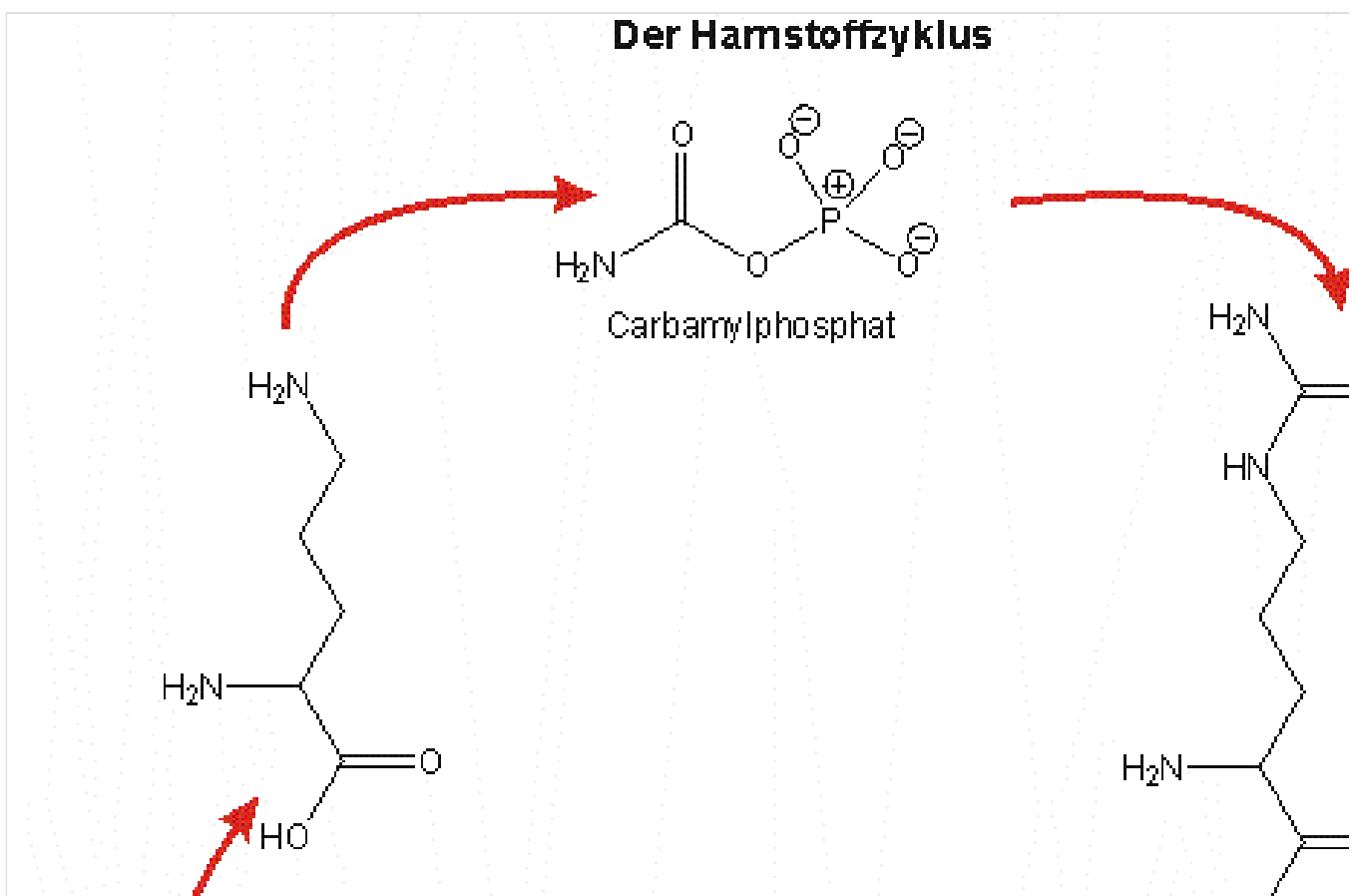
Bild 13.27: Harnstoff

Proteine abzubauen und zu verwerten. [Proteine](#), welche unserem Körper mit der Nahrung zugeführt werden, werden im Magen und Dünndarm in ihre kleinsten Einheiten, die Aminosäuren zerlegt. Die Zerlegung geschieht durch spezielle Enzyme, die Proteasen. Die so erhaltenen Aminosäuren werden verwendet um körpereigene Proteine aufzubauen, oder aber der weiteren Aufspaltung zugeführt. Beim Aminosäureabbau, z. B. der oxidativen Desaminierung können in den Mitochondrien Zellgifte wie z. B. Ammoniak entstehen. Damit dieses Zellgift keinen Schaden anrichten kann, wird es in

[Harnstoff](#) umgewandelt, der problemlos ausgeschieden werden kann. Der Harnstoff wird über mehrere Stufen synthetisiert.

Ammoniak aus der Desaminierung von [Aminosäuren](#) und Kohlendioxid aus der Atmung oder der Decarboxylierung von Aminosäuren werden unter enormem Energieaufwand miteinander zu [Carbamylphosphat](#)  verknüpft. Dieses Molekül wird an [Ornithin](#) , eine Aminosäure gebunden und so in den Harnstoffzyklus eingeschleust.

Das Molekül [Citrullin](#)  ist das Produkt der Verknüpfung von [Carbamylphosphat](#) und [Ornithin](#). Es reagiert mit einer weiteren Aminosäure, [Asparaginsäure](#)  zu [Arginin](#)  wobei eine C₄-Einheit, [Fumarsäure](#) abgespalten wird. [Arginin](#) spaltet Harnstoff ab, der nun ausgeschieden werden kann und bildet dadurch erneut Ornithin. So ist der Zyklus geschlossen und kann von neuem beginnen. Über die im vorletzten Schritt abgespaltene Fumarsäure steht der Harnstoffzyklus direkt mit dem Citronensäurezyklus in Verbindung. Durch diese Verbindung kann die im einen Zyklus gewonnene Energie in den anderen übertragen werden.



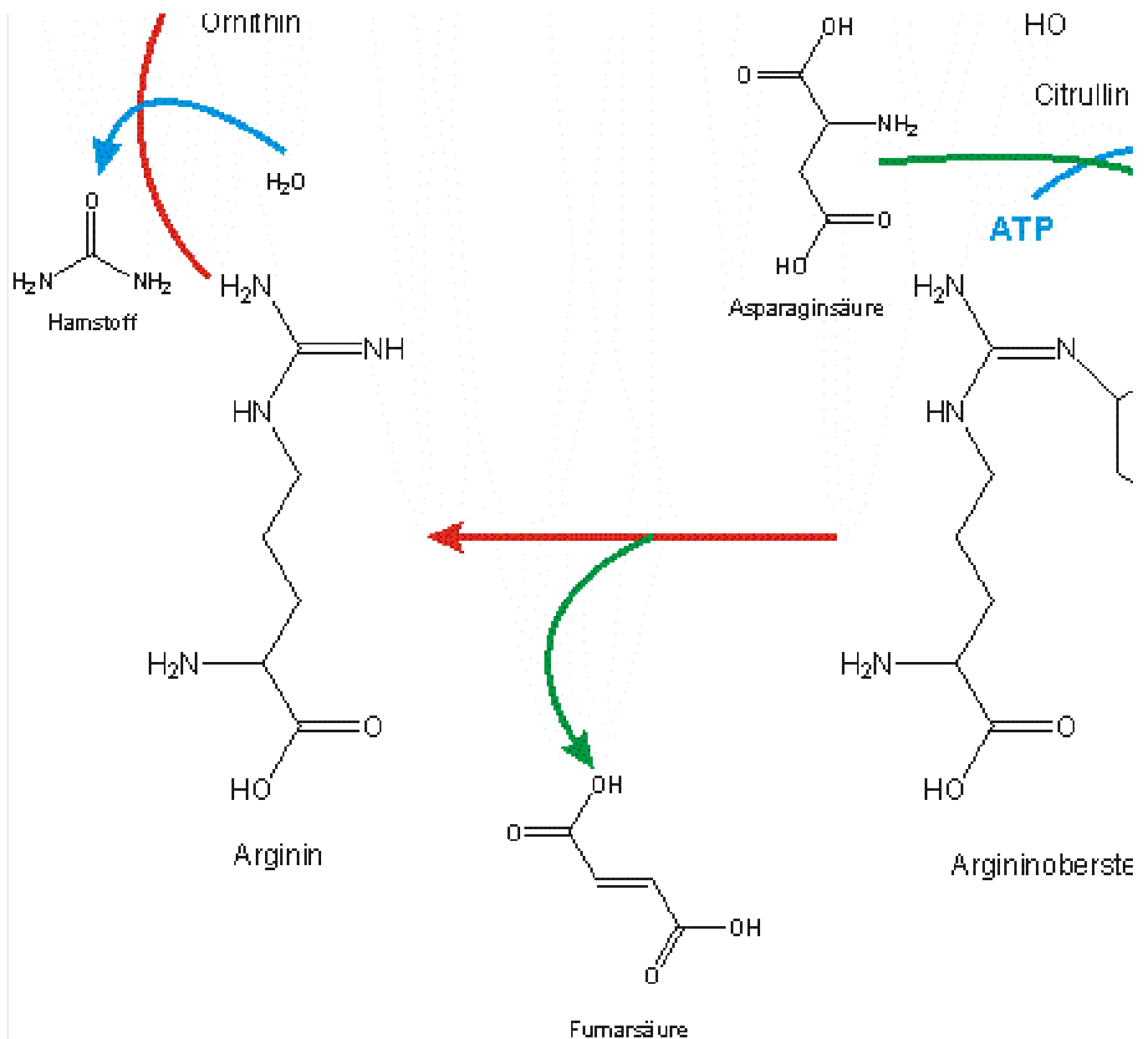


Bild 13.33: Der Harnstoffzyklus

13.5 Der Fettabbau

Fette sind in Form von Glyceriden hervorragende Energiespeicher. Sie werden im Cytoplasma von Fettzellen abgelagert. Der Fettgehalt eines menschlichen Körpers normaler Statur beträgt zwischen 10 und 15 % kann aber durchaus variieren bei Fettleibigkeit oder sehr durchtrainierten Athleten.

Der Abbau von Fetten beginnt damit, dass ein Glycerid gespalten wird in Glycerin und die Fettsäuren. Das Glycerinmolekül wird über mehrere Stufen bis hin zum Glycerinaldehyd-3-phosphat umgewandelt und dann in der Glycolyse weiterverarbeitet.

Die Fettsäuren werden in mehrstufige Abbauzyklen eingebracht, die β -Oxidation. Sie

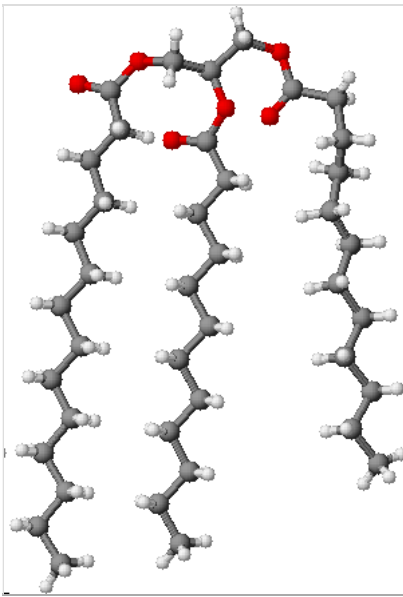
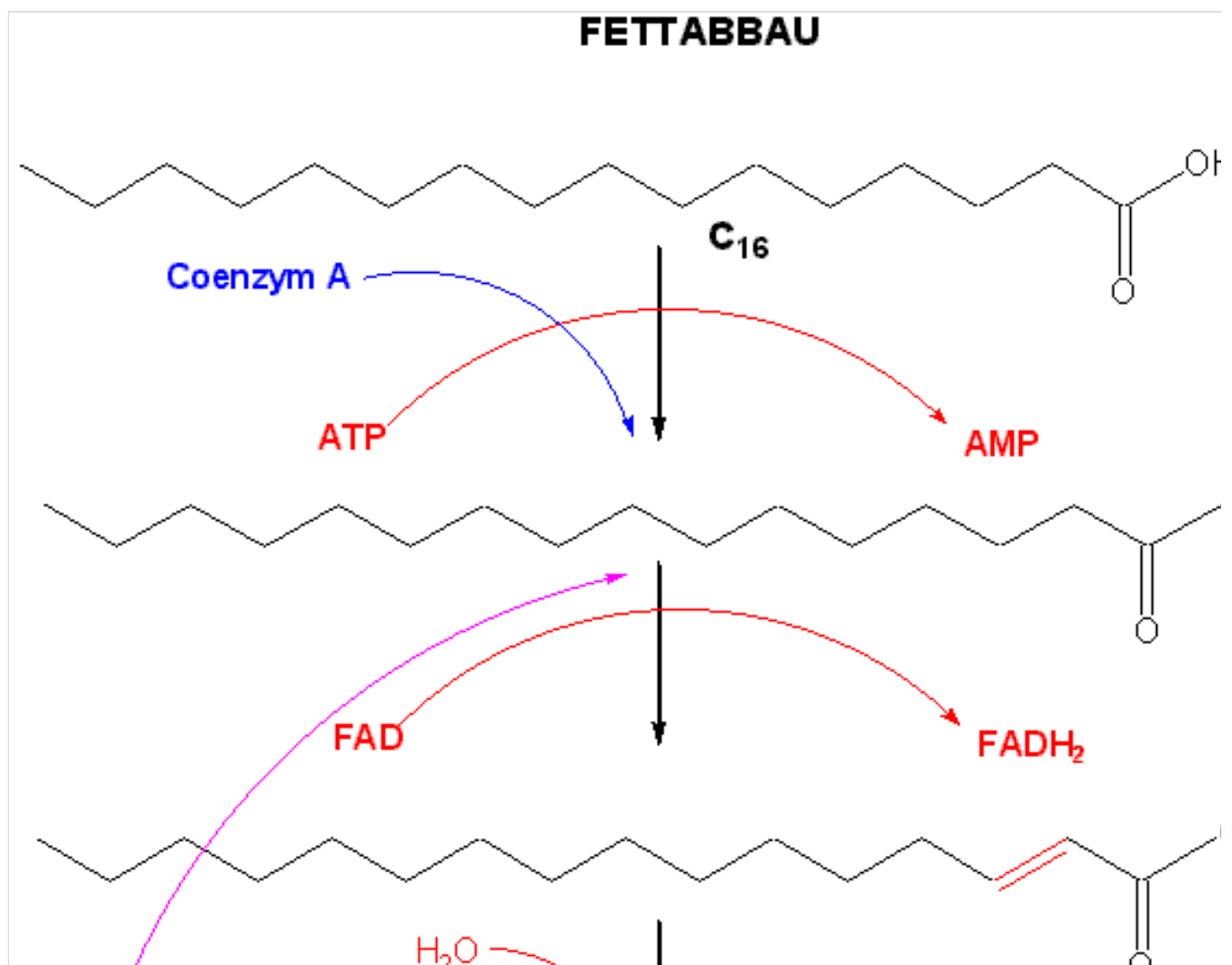


Bild 13.34: Ein Glycerid

beschreibt die Oxidation des Kohlenstoffatoms in β -Stellung zur Carbonsäurefunktion. Die Fettsäure wird vor dem eigentlichen Abbau aktiviert durch eine Verknüpfung mit Coenzym A. Beim einmaligen Durchlauf des Fettabbau-Zyklus wird die Fettsäure um eine C_2 -Einheit verkürzt. Bei diesem Prozess wird Wasserstoff frei, der von [FAD](#) aufgenommen und gespeichert wird. In einer weiteren Dehydrierung, Wasserstoffabspaltung wird der Wasserstoff von [NAD⁺](#) aufgenommen und schliesslich die C_2 -Einheit abgespaltet. Die C_2 -Einheit, ein Essigsäuregerüst wird an [Coenzym A](#) angelagert, wodurch [Acetyl-Coenzym A](#) entsteht. Acetyl-Co A wird in den Citronensäurezyklus eingeschleust und liefert erneut Energie. Alles über alles gesehen hat Fett rund den doppelten Energieinhalt wie Glucose bei gleichen Massen.

Als Bilanz des Fettabbaus entstehen pro C_2 -Einheit einer Fettsäure 2 Einheiten [ATP](#). Im weiteren kommen durch den Abbau von Acetyl-Co A jeweils eine GTP- und eine $FADH_2$ -Einheit hinzu. Schliesslich fallen 3 Moleküle NADH an. Dies ergibt eine stolze Summe von energiespeichernden Molekülen beim Abbau eines einzigen [Glycerids](#).



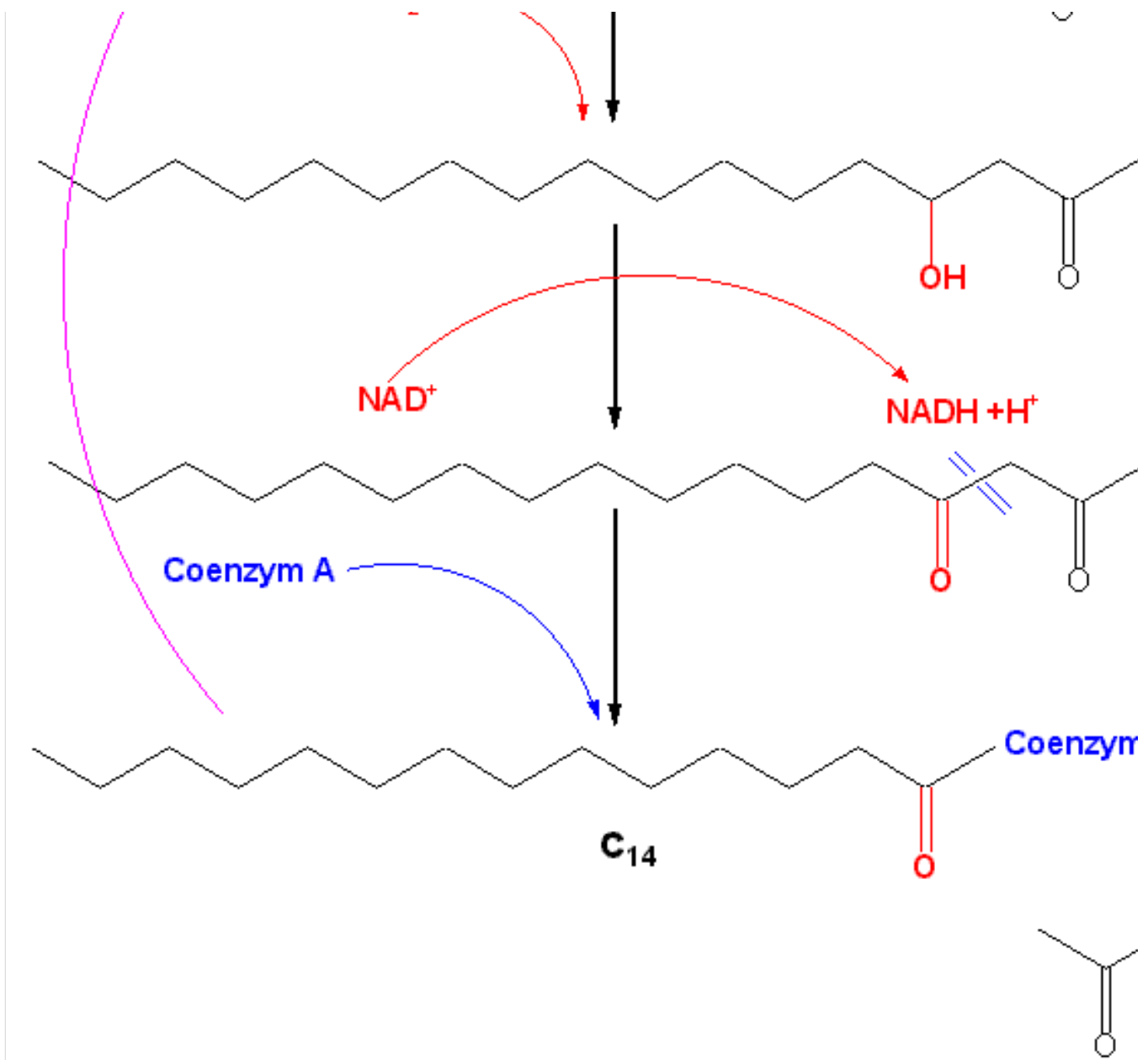


Bild 13.37: Der Fettabbau

13.6 Verknüpfungen im Zellstoffwechsel

Die einzelnen Vorgänge Fettabbau, Citronensäurezyklus, Harnstoffzyklus und Atmungskette sind in einer Zelle eng miteinander verknüpft. Der zentrale Vorgang, die Drehscheibe der Energiemaschine ist dabei der Citronensäurezyklus. In ihm münden der Fettabbau, der Kohlenhydratabbau, der Harnstoffzyklus und der Proteinabbau. Der grösste Teil der reduzierten Coenzyme, welche in der Atmungskette unter riesigem Energiegewinn wieder oxidiert werden können, entsteht im Citronensäurezyklus.

Der grösste Teil der Stoffwechselvorgänge spielt sich in den Mitochondrien, dem Kraftwerk einer Zelle ab. Die Bildung von ATP erlaubt es die Biosynthesen körpereigener Stoffe

durchzuführen. Jedes der entstandenen Zwischenprodukte im Zellstoffwechsel kann grundsätzlich für den Aufbau körpereigener Stoffe wiederverwendet werden.

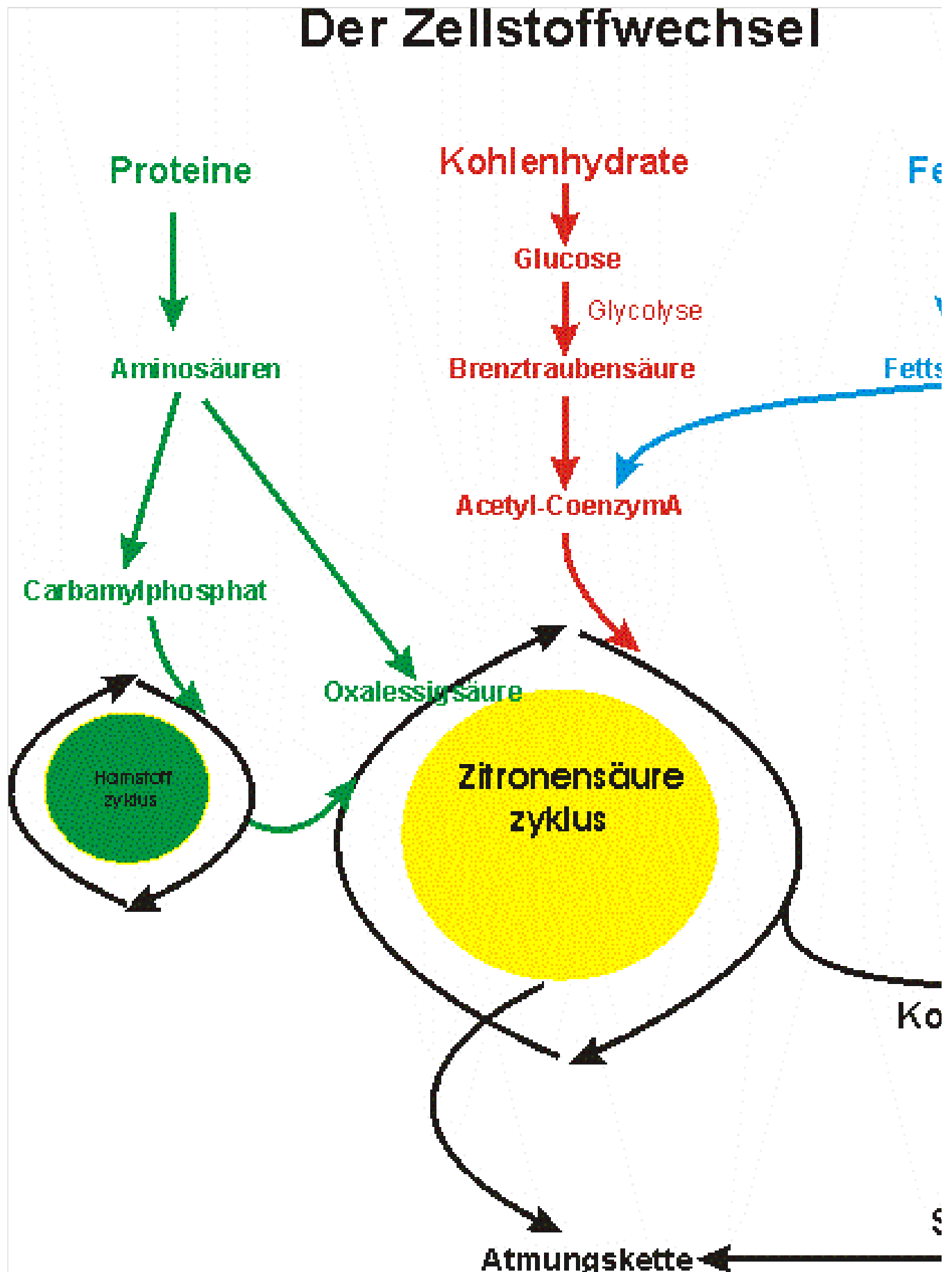


Bild 13.38: Der Zellstoffwechsel

13.7 Lernkontrolle

1. Zucker gehört bei den Nahrungsmittel in die Klasse der

- a) ☐ Vitamine
- b) ☐ Proteine
- c) ☐ Kohlenhydrate

2. Fette sind

- a) ☐ Glycerine
- b) ☐ Proteine
- c) ☐ Glyceride

3. Die Energie im Zellstoffwechsel wird gespeichert in

- a) ☐ ATP
- b) ☐ NAD⁺
- c) ☐ Coenzym A

4. Die Übertragung von Wasserstoff geschieht durch

- a) ☐ Vitamin C
- b) ☐ ATP
- c) ☐ NADH

5. Polysaccharide werden bei der Verdauung zerlegt in

- a) ☐ Glucose
- b) ☐ Saccharose
- c) ☐ Proteine

6. Das Endprodukt der Glycolyse ist

- a) ☐ Glucose
- b) ☐ Glycerin
- c) ☐ Brenztraubensäure

7. Der erste Schritt der Glycolyse ist

- a) ☐ die Aktivierung von Glucose
- b) ☐ die Deaktivierung von Glucose
- c) ☐ die Abspaltung von Kohlendioxid

8. Während der Glycolyse wird

- a) ☐ Wasserstoff übertragen
- b) ☐ Glucose dimerisiert
- c) ☐ insgesamt Energie verbraucht

9. Coenzym A

- a) ☐ ist ein Vitamin
- b) ☐ enthält Vitamin C
- c) ☐ enthält Pantothersäure

10. Zu Beginn des Citronensäurezyklus

- a) ☐ bindet sich ein Acetylrest an Oxalessigsäure
- b) ☐ bindet sich Coenzym A an Citronensäure
- c) ☐ bindet sich Wasserstoff an Citronensäure

11. Oxalessigsäure und Apfelsäure

- a) ☐ sind identisch
- b) ☐ weisen dieselbe Anzahl C-Atome auf
- c) ☐ weisen eine unterschiedliche Anzahl C-Atome auf

12. Fumarsäure ist

- a) ☐ eine starke Säure
- b) ☐ eine ungesättigte Dicarbonsäure
- c) ☐ ein Enzym

13. FAD dient

- a) ☐ der Speicherung von Vitaminen
- b) ☐ der Speicherung von Sauerstoff
- c) ☐ der Speicherung von Wasserstoff

14. FAD enthält

- a) ☐ Ribose
- b) ☐ Coenzym A
- c) ☐ Vitamin B2

15. Der Harnstoffzyklus dient der Verwertung von

- a) ☐ Vitaminen
- b) ☐ Kohlenhydraten
- c) ☐ Proteinen

16. Harnstoff

- a) ☐ wird in den Zellen gespeichert
- b) ☐ wird ausgeschieden
- c) ☐ lagert sich an Coenzym A

17. Ornithin ist

- a) ☐ eine Aminosäure
- b) ☐ ein Protein
- c) ☐ ein Energiespeicher

18. Der Harnstoffzyklus steht mit dem Citronensäurezyklus in Verbindung

- a) ☐ über Coenzym A
- b) ☐ über Harnstoff
- c) ☐ über Fumarsäure

19. Fette sind

- a) ☐ hervorragende Energiespeicher
- b) ☐ schlechte Energiespeicher
- c) ☐ nicht abbaubar

20. Beim Fettabbau

- a) ☐ werden C_2 -Einheiten abgeschnitten
- b) ☐ werden C_4 -Einheiten abgeschnitten
- c) ☐ wird viel Energie benötigt

[korrigieren](#)

13.8 Literatur

W. Christen

Grundlagen der organischen Chemie

Diesterweg/Salle, Sauerländer, 1982

Div. Autoren

Lexikon der Naturwissenschaftler

Spektrum, 1996

E. Pretsch, J. Seibl, W. Simon, T. Clerc

Strukturaufklärung organischer Verbindungen

Springer, 1981

H. Hediger

Quantitative Spektroskopie

Hüthig, 1985

Div. Autoren

Lexikon der Chemie

Spektrum, 2000

W. Miram, K.H. Scharf

Biologie heute SII

Schrödel, 1988

13.9 Web-Links

Allgemein

Theorie 

Theorie 

Citronensäurezyklus

Theorie 

Glycolyse

Theorie 

Theorie 

Fettabbau

Theorie 

Harnstoffzyklus

Theorie 