Kapitel 10.08: Zellatmung - Dissimilation

Keimende weiße Bohne: Im inneren hat die Bohne Stärke gespeichert, die nun durch Zellatmung in ATP umgewandelt wird. Die freiwerdende Energie wird zum Wachstum der Wurzel und der ersten Blätter benötigt.
Erst wenn grüne Blätter vorhanden sind, kann die Photosynthese zur Energiegewinnung genutzt werden.

Freies Lehrbuch der Biologie von H. Hoffmeister und C. Ziegler
(unter GNU Free Documentation License, Version 1.2 (GPL)).

Die jeweils aktuellste Fassung finden Sie unter: https://hoffmeister.it/index.php/biologiebuch

Inhalt

Kapitel 10.08: Zellatmung - Dissimilation....1
Inhalt....2
Die Zellatmung findet in den Mitochondrien statt....3
Mitochondrien der Lunge im Transferelektronenmikroskop....5
Skizze eines Mitochondriums....6
Innere und äußere Atmung....7
Verschiedene Formen der äußeren Atmung:....7
Was versteht man unter Gasaustausch?....7
Anaerobe Atmung....7
Lungenatmung der Wirbeltiere....8
Einatmen und Ausatmen bei Säugetieren:....8
a) Brustkorbatmung:....8
b) Zwerchfellatmung:....8
Atemsteuerung der Säugetiere:....8
Atemvolumen und -frequenz bei Menschen:....8
Das komplette Atemsystem des Menschen....9
Der Aufbau der Lungenbläschen....10
Übersicht: Energiefreisetzung durch Stoffabbau (Dissimilation)....11
Übersicht über den Abbau von Kohlenhydraten....12
https://de.wikipedia.org/wiki/Zellatmung....12
Zellatmung: Energiefreisetzung & aerober Stoffabbau der Glucose in vier Schritten....13
a) Glykolyse....14
Details der Glycolyse....16
b) Oxidative Decarboxylierung....17
c) Citratzyclus = Citronensäurezyklus = Tricarbonsäurezyclus = Krebszyklus....18
Ablauf von Glycolyse, oxidativer Decarboxylierung und Zitronensäurezyklus im Detail....19
Zwischenbilanz der ersten drei Teilschritte....20
d) Endoxidation (=Atmungskette, =oxidative Phosphorylierung)....21
Schema der Endoxidation:....22
Übersicht über die Membranvorgänge der Endoxidation im Detail....23
Standardredoxpotentiale der beteiligten Stoffe:....24
Zwischenbilanz der Endoxidation:....24
Gesamtbilanz des aeroben Abbaus von Glucose:....24
Übersicht Zitronensäurezyklus (= Citratzyklus)....25
Detaillierter Zitronensäurezyklus (= Citratzyklus)....26
Zusammenfassung Zellatmung....27
Gesamtbilanz des aeroben Abbaus von Glucose:....27
Stoffwechselwege in Zelle....28
Auswahl an Produkten, die biotechnologisch aus Glucose erstellt werden können....29

Die Zellatmung findet in den Mitochondrien statt

Mitochondrien befinden sich in höher entwickelten Zellen (=Eucyten), wie wir sie bei Tieren und Pflanzen finden. In Procyten (z.B. Bakterien) hingegen sind sie nicht zu finden. Sie sind für die Zellatmung verantwortlich und versorgen so ihre Zellen mit Energie.
Sie sind von einer Doppelmembran umschlossenes und haben eine Länge von ca. 1 bis 10µm.

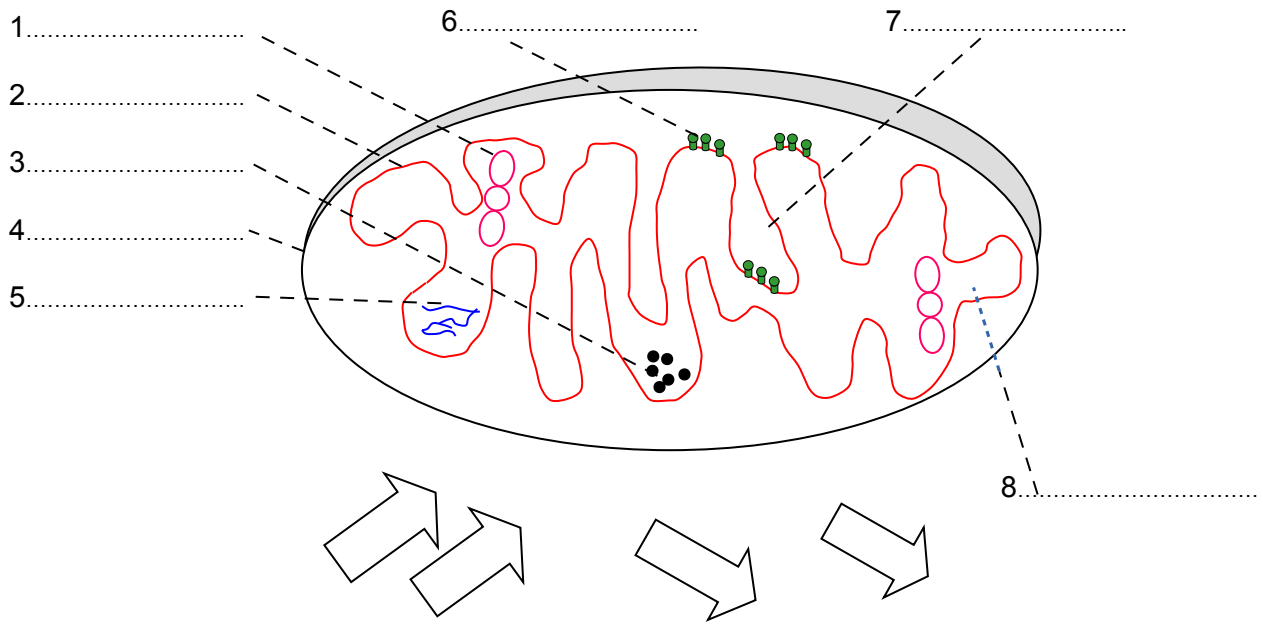
Durch die Zellatmung wandeln sie Zucker und Sauerstoff in Kohlenstoffdioxid, Wasser und Energie um. Die Energie wird dabei in Form der chemischen Verbindung ATP (**A**denosin**t**ri**p**hosphat) frei. Deshalb findet man besonders viele Mitochondrien in Zellen, die viel Energie verbrauchen (Muskelzellen, Nervenzellen, Sinneszellen, Spermien, Eizellen).
Der Vorgang der Zellatmung findet genau an der Membrangrenze der inneren Membranen statt.
Um nun möglichst viel Energie zu erzeugen ist diese innere Membran vielfach eingestülpt, was dazu führt, dass eine besonders große Membranfläche in das Mitochondrium passt.

Aufbau

1. Die äußere Membran umschließt das Mitochondrium und enthält Kanäle aus Tunnelproteinen, welche dem Stoffaustausch mit dem Zellplasma dienen (z.B. Molekülen und Ionen). Große Moleküle (z.B. organische Moleküle) können die Membran nicht passieren.
2. Bei Mitochondrien aus Muskelzellen ist die innere Membran zu sogenannten Cristae gefaltet, wodurch die Membranoberfläche, erheblich vergrößert wird => mehr Platz für chemische Reaktionen. In Leberzellen werden die Einstülpungen Tubuli genannt.
3. Der Innenraum der Cristae wird **Matrix** genannt.
4. Der **Intermembranraum** zwischen den beiden Membranen enthält viele Enzyme, so sind in der Lipiddoppelschicht der inneren Membran die Enzyme zur Zellatmung enthalten. Sie sind zu einem „ATP-Synthase-Komplex“ zusammengefasst. Er ist erkennbar im EM-Bild als 8,5 nm kleine gestielte Köpfchen. Hier findet im Verlauf der Zellatmung die ATP Bildung statt. Dort befinden sich auch noch andere Enzyme, z.B. zum Fettabbau.

Mitochondrien vermehren sich durch einfache Zellteilung selbst. Die Anzahl an Mitochondrien in einer Zelle, gibt Aufschluss über deren Energiebedarf. Eine eukaryotische Zelle enthält bis zu 2000 Mitochondrien. Verliert sie diese, z.B. durch Teilung, ist sie nicht in der Lage diese zu regenerieren.

Ordne die folgenden Begriffe zu: RNA, Ribosomen, innere Membran, äußere Membran, Cristae, ringförmige DNA, Matrix, O_2, H_2O, $C_6H_{12}O_6$ (=Zucker), CO_2, ATP-Synthase-Komplex



Die Zellatmung :	+	⟶	+	+ ATP (=Energie)

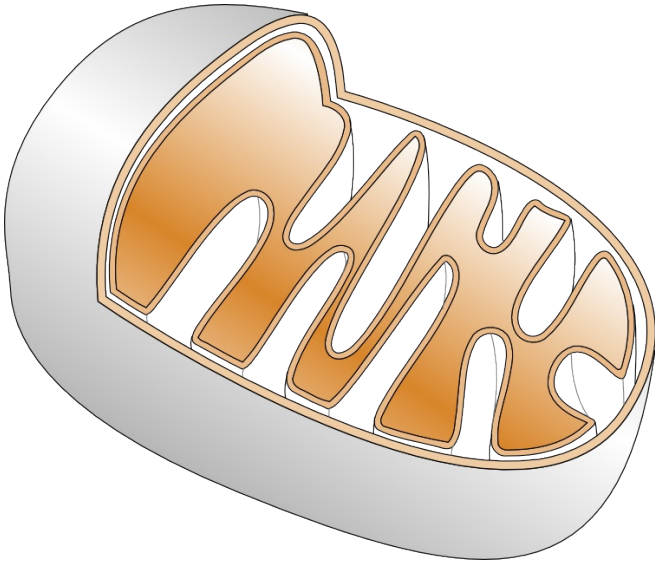
Aufgaben:

1. Interpretiere die folgenden Angaben:

Prozentuales Mitochondrienvolumen in Zellen bei Säugetieren:

- Gehirn: 37%
- Herz: 41%
- Leber: 17%
- Niere: 12%
- Weiße Blutkörperchen: 4%

2. Beschrifte die folgende Grafik so genau wie möglich:



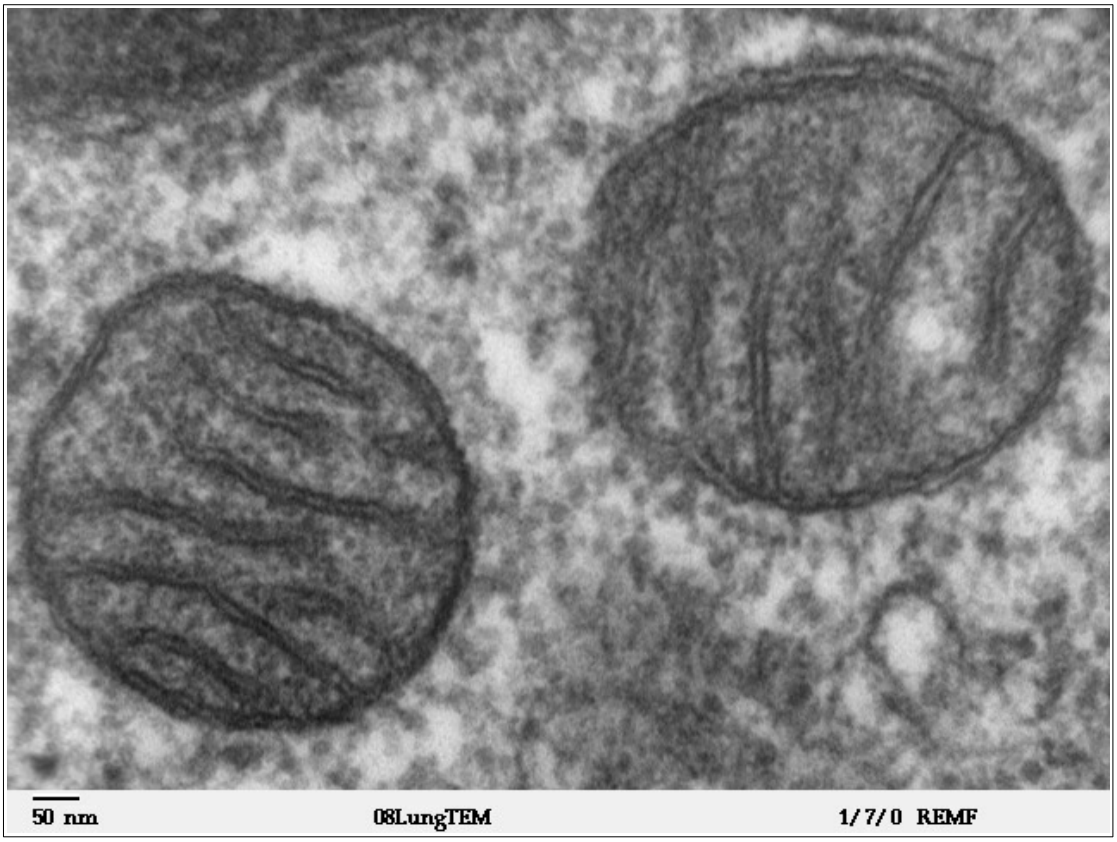
Quelle Bild: GNU Free Documentation License, Version 1.2 & Creative Commons Attribution ShareAlike 2.5 by Wikicommonsuser Tatoute; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mitochondrie.svg; https://commons.wikimedia.org/wiki/Commons:GNU_Free_Documentation_License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/

Zusatzinformationen:

https://de.wikipedia.org/wiki/Mitochondrium

Mitochondrien der Lunge im Transferelektronenmikroskop

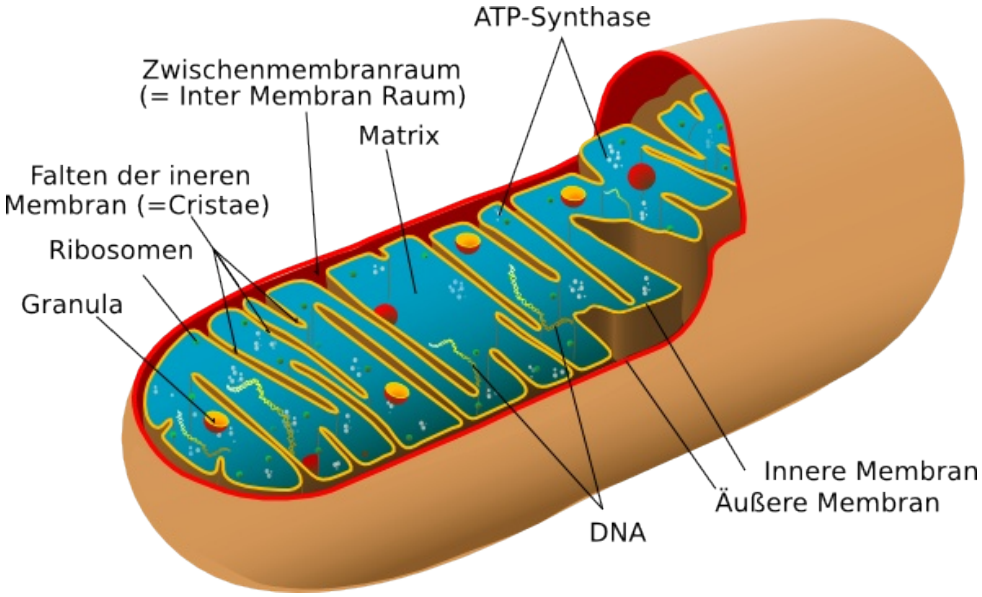
Lungenmitochondrien:



Quelle Bild: Public Domain, by Luisa Howard & Wikipedia - Thank you; https://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Mitochondria%2C_mammalian_lung_-_TEM.jpg bzw: https://remf.dartmouth.edu/images/mammalianLungTEM/source/8.html

Quelle Bild: Public domain by Wikipdeia & U.S. Dept. of Health and Human Services/National Institutes of Health; https://en.wikipedia.org/wiki/Image:Mitochondrion_186.jpg

Skizze eines Mitochondriums



Quelle Bild: Public Domain by Wikicommonsuser LadyofHats, Marina Ruiz - Muchas Gracias!
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animal_mitochondrion_diagram_de.svg

Innere und äußere Atmung

Der Begriff Atmung kann mehrere Dinge bedeuten. Einerseits, die mechanisch-anatomisch Atmung der Lunge mithilfe von Zwerchfell und Brustkorbmuskulatur. Auf der anderen Seite versteht man unter Zellatmung den biochemischen Vorgang der Energiegewinnung aus der Oxidation von Kohlenhydraten (in der inneren Membran der Mitochondrien). Die Energie wird bei der Zellatmung in Form von ATP frei.

Verschiedene Formen der äußeren Atmung:

- **Hautatmung**: Der Gasaustausch erfolgt über die Haut. Beim Menschen nur noch im geringen Bereich möglich.
- **Kiemenatmung**: Der Gasaustausch erfolgt im Wasser, welches an dünnen, gut durchbluteten Hautausstülpungen vorbeifließt. Dabei gelangt in Wasser gelöster Sauerstoff in das die Kiemen durchströmende Blut (zu finden bei Wirbellosen, Fischen und Amphibienlarven).
- **Tracheenatmung**: Der Gasaustausch erfolgt über ein den Körper durchziehendes röhrenartiges, weitverzweigtes Kanalsystem (bei Insekten, Tausendfüßern und einigen Spinnen).
- **Lungenatmung**: Der Gasaustausch erfolgt über in den Körper eingestülpte, oft stark gefaltete Säcke. Durch eine Muskeltätigkeit werden die Lungen geweitet und Sauerstoff wird eingesaugt. In den Lungen befinden sich viele Lungenbläschen, welche von Kapillaren durchzogen sind. An diesen Kapillaren findet der eigentliche Gasaustausch statt (bei lungenatmenden Schnecken, Amphibien, Reptilien, Vögeln und Säugetieren).
- Bei Pflanzen findet der Gasaustausch über die Spaltöffnungen statt (=Stomata).

Was versteht man unter Gasaustausch?

Wenn sich an einer feinen Membran Gase befinden, können einzelne Moleküle durch die Membran diffundieren. Bei Menschen wird die andere Seite der Membran mit Blut durchströmt (Lungenkapillaren), so dass Sauerstoff direkt ins Blut gelangt und Kohlenstoffdioxid aus dem Blut direkt in die Lunge gelangt.

Diese Diffusion hängt maßgeblich von der Anzahl der vorhandenen Gasmoleküle ab:
Je höher die Konzentration eines Gases ist, desto mehr kann durch die Membran in den Körper eindringen.

Weitere Faktoren, welche den Gasaustausch beeinflussen:

- Durchlässigkeit (=Permeabilität) der Membran für die auszutauschenden Substanzen
- Größe der Membranoberfläche
- Membrandicke (= Diffusionsstrecke)
- Temperatur (sie beeinflusst die Geschwindigkeit der Eigenbewegung der Moleküle und somit die Diffusionsgeschwindigkeit. Je wärmer es ist, desto besser ist der Gasaustausch).
- Der Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Seiten der Membran.
  Es gilt: je größer der Konzentrationsunterschied, desto rascher findet der passive Gasaustausch statt.

Anaerobe Atmung

Bei dieser Sonderform der Atmung, welche nur von Prokaryoten betrieben wird, werden die aus der Oxidation eines Energieträgers gewonnen Elektronen nicht auf Sauerstoff, sondern auf einen anderen Stoff übertragen (oft Schwefel!) (Bitte nicht mit der Gärung verwechseln!)

Lungenatmung der Wirbeltiere

Durch das Einatmen gelangt sauerstoffhaltige Luft durch Mund und Nase in den Körper. Nasenatmung befeuchtet die Atemluft und filtert sie zusätzlich. Diese Atemluft gelangt nun über den Rachenraum in die Luftröhre. Diese verzweigt sich im unteren Abschnitt in die beiden Bronchienäste, welche sich dann immer weiter zu den Bronchiolen verzweigen. An deren Ende befinden sich Lungenbläschen, welche von einer dünnen Membran umgeben sind und so den Sauerstoffübergang durch Diffusion in die Blutgefäße ermöglichen. Aus dem Blut gelangt durch die gleichen dünnen Membranen Kohlenstoffdioxid in die Ausatemluft.

Einatmen und Ausatmen bei Säugetieren:

Grundsätzlich kann man auf zwei Weisen die Lungen dazu bringen, Luft einzusaugen:

a) Brustkorbatmung:

Durch Zusammenziehen der Inspirationsmuskeln des Brustkorbs vergrößert sich der Brustkorb, die Lunge wird geweitet, ein Unterdruck entsteht in der Lunge und Luft strömt hinein.

Damit die Lunge auch den Bewegungen des Brustkorbs folgen kann, liegt zwischen beiden eine Haut, welche beide verbindet (=Lungenfell, =Pleura). Zwischen beiden herrscht eine starke Anziehung, vergleichbar mit zwei feuchten Glasplatten, welche durch etwas Wasser zusammengehalten werden. Die Flüssigkeit ermöglicht, dass beide Schichten sich trotz des Zusammenhalts noch gegeneinander verschieben können.
Merkmal: der Bauch wölbt sich beim Einatmen durch die Streckung des Brustkorbs nach innen.

b) Zwerchfellatmung:

Ein nach unten senken des Zwerchfells durch Zwerchfellmuskulatur bewirkt ebenfalls einen Unterdruck in der Lunge, welcher so Luft einsaugt.
Merkmal: der Bauch wölbt sich beim Einatmen durch die Bewegung des Zwerchfells nach außen.

Zum Ausatmen entspannen sich die Atemmuskeln und durch das Zusammenziehen der elastischen Muskelfasern wird Lungenluft hinausgedrückt.

Atemsteuerung der Säugetiere:

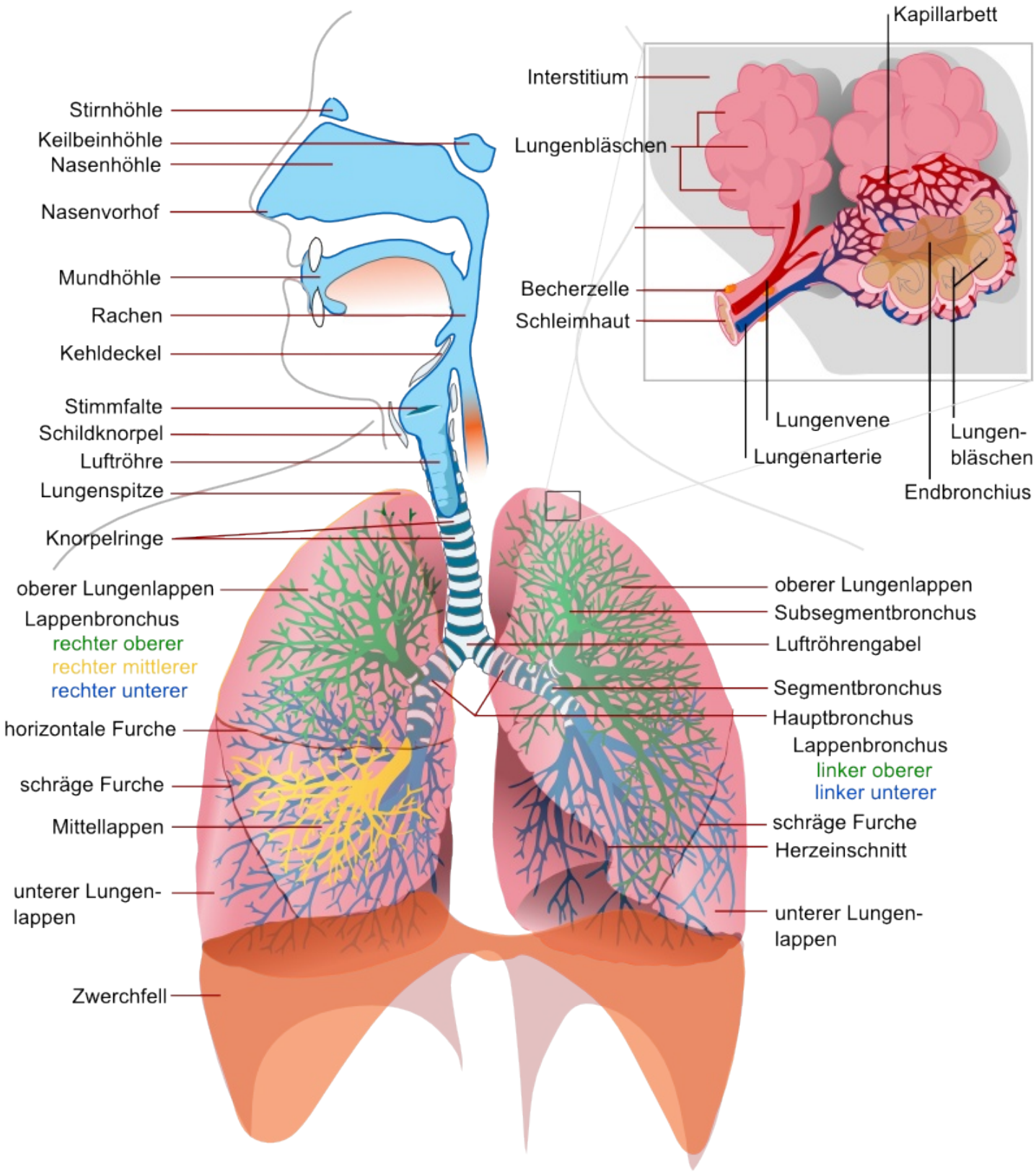
Chemorezeptoren messen in der Lunge den Gehalt an Kohlenstoffdioxid und melden dies an Rückenmark und Gehirn. Wird ein Schwellenwert an Kohlenstoffdioxid überschritten, wird der Atemreiz verstärkt.
Weiterhin messen einige Rezeptoren den pH-Wert des arteriellen Blutes. Je mehr CO_2 enthalten ist, desto geringer wird der pH-Wert, da sich mehr Kohlensäure bildet.

Atemvolumen und -frequenz bei Menschen:

Alter	Atemzüge pro Minute unter Ruhebedingungen
Erwachsene	15
Jugendliche	18
Schulkind	20
Kleinkind	25
Säugling	30
Neugeborene	40-50

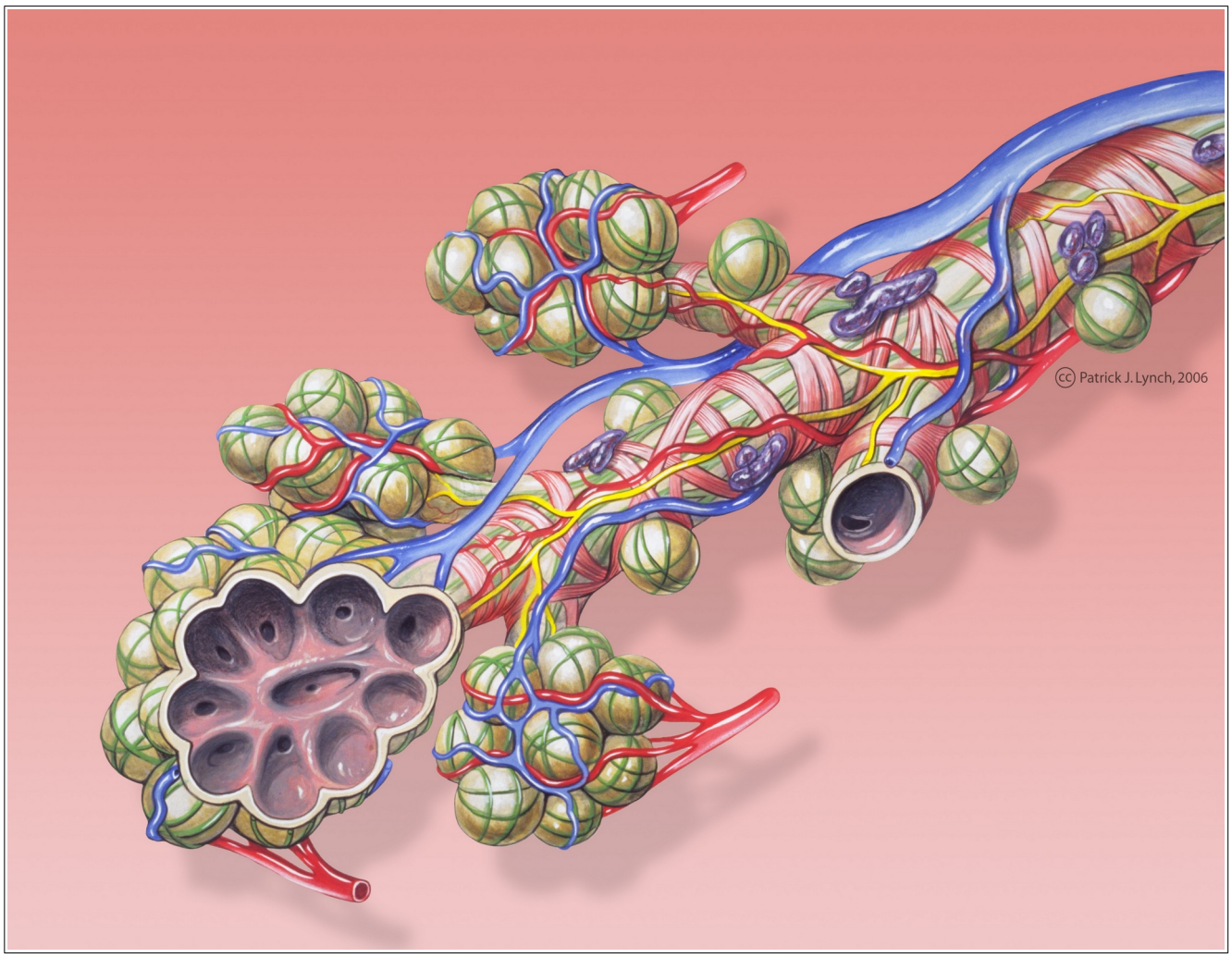
Pro Atemzugvolumen nimmt ein Erwachsener ca. 0,5 Liter Luft auf => in 68 Jahre atmet man ca. 300 000m^3 Luft ein. Pro Jahr atmet ein Mensch ca. 350 kg CO_2 aus (entspricht ca. 1 kg/Tag!).

Das komplette Atemsystem des Menschen



Quelle Bild: Public domain by Wikicommonsuser LadyofHats, Marina Ruiz - Muchas Gracias; https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Respiratory_system_complete_de.svg

Der Aufbau der Lungenbläschen

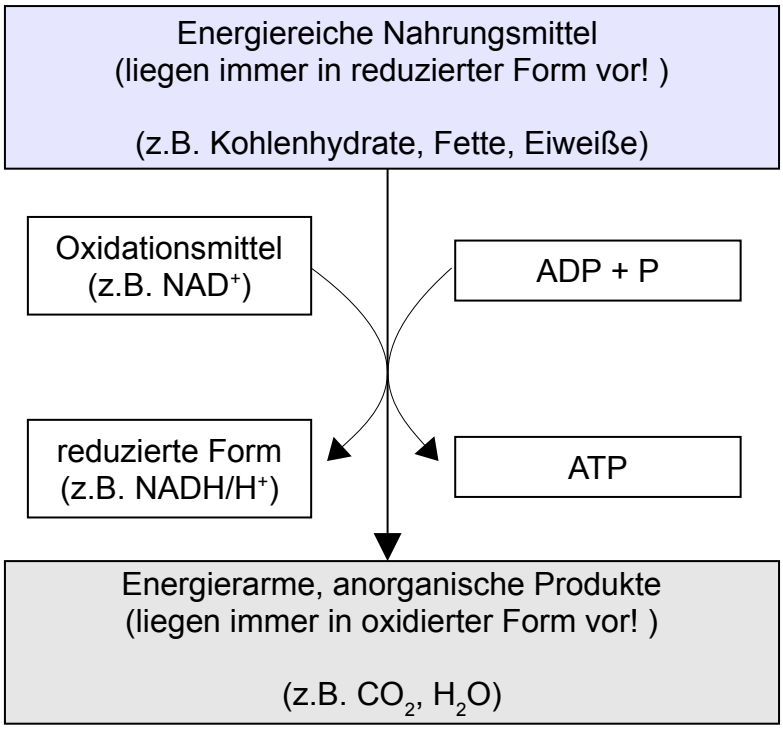


Quelle Bild: Creative Commons-Lizenz 2.5 by Patrick J. Lynch, medical illustrator & Wikicommons - Thank you; https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Bronchial_anatomy.jpg; https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/deed.de

Übersicht: Energiefreisetzung durch Stoffabbau (Dissimilation)

Vergleiche: Was ist dem autotrophen und dem heterotrophen Stoffwechsel gemeinsam

Dissimilation = Abbau von energiereichen, organischen Substanzen zu Energiegewinnung. Die Energie ist dann als ATP bzw. Wärme nutzbar.



Man unterscheidet zwei Typen der Dissimilation:
Zellatmung (aerober Abbau) und Gärung (anaerober Abbau):

a) **Aerober Abbau** (= Zellatmung): mit O_2!
=> vollständiger Abbau des organischen Materials zu CO_2 und H_2O

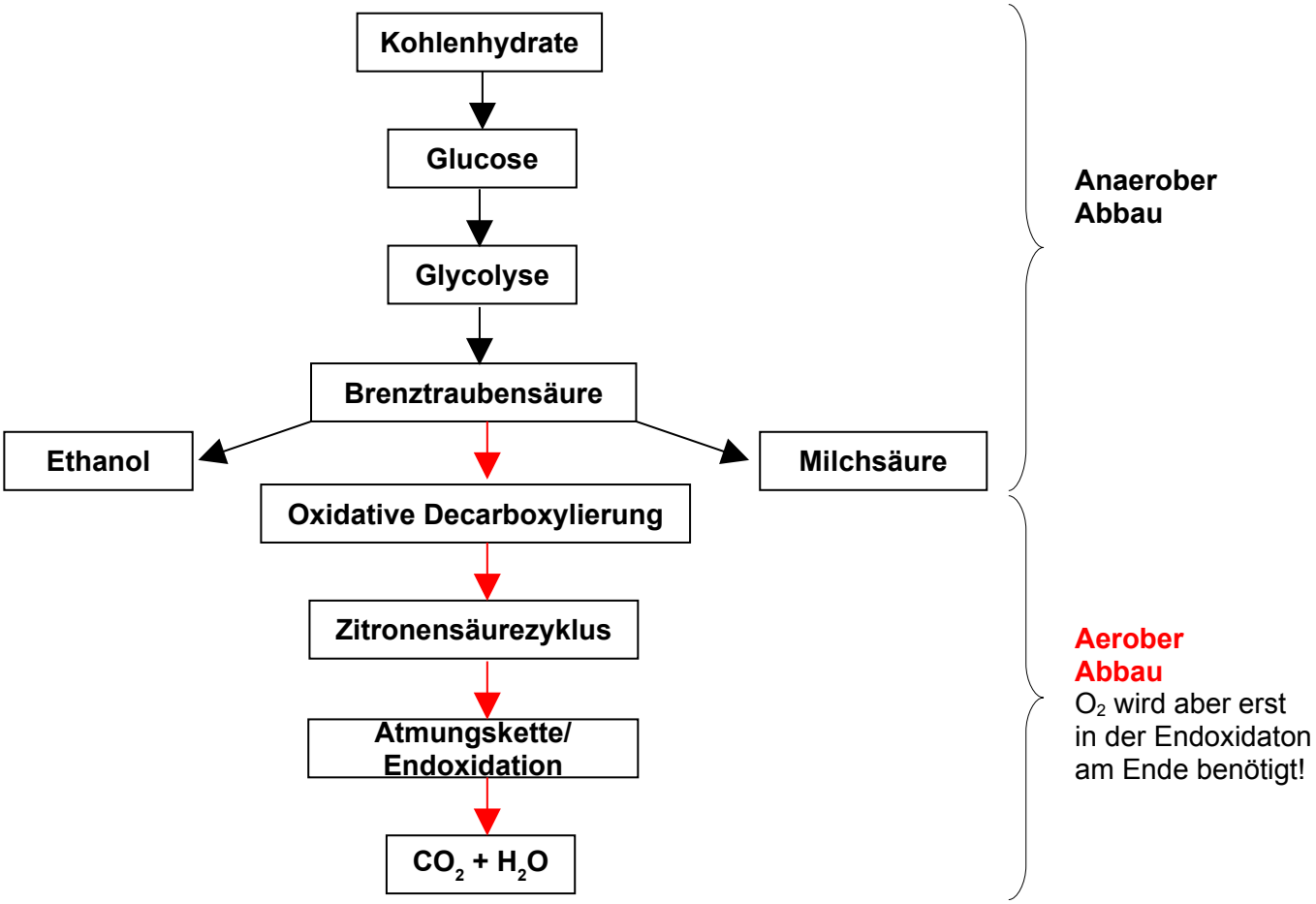
b) **Anaerober Abbau** (= Gärung): ohne O_2!
=> unvollständiger Abbau, es bleiben organische Endprodukte

Zwei Arten: - Michsäuregärung (Produkte: CO_2 und Milchsäure)

- alkoholische Gärung (Produkte: CO_2 und Ethanol)

Um gleich mit einem Vorurteil aufzuräumen: auch Pflanzen betreiben Zellatmung! Natürlich setzten sie die Energie von Glucose und anderen Kohlenhydraten um, um so Biomasse aufzubauen und Energie für ihren Stoffwechsel zu haben. Der Unterschied ist, dass sie die Kohlenhydrate vorher in der Photosynthese selbst herstellen!

Übersicht über den Abbau von Kohlenhydraten



Durch Zellatmung werden Nährstoffe oxidiert. Der Abbau von Zucker ist, chemisch gesehen, eine stufenweise Oxidation des Zuckers. Bei dieser Elektronenabgabe werden Elektronen frei, welche über eine Atmungskette auf externe Elektronenakzeptoren übertragen werden (z.B. Sauerstoff).

Durch Zellatmung werden Nährstoffe oxidiert. Der Abbau von Zucker ist, chemisch gesehen, eine stufenweise Oxidation des Zuckers. Bei dieser Elektronenabgabe werden Elektronen frei, welche über eine Atmungskette auf externe Elektronenakzeptoren übertragen werden (z.B. Sauerstoff).

Erinnere Dich, eine Oxidation ist eine Abgabe von Elektronen! Die Elektronen werden oft an Sauerstoff abgegeben (dabei wird O_2 zu $2O^{2-}$ reduziert!)

Bei der Zellatmung ist der Elektronenakzeptor Sauerstoff. Bei der Gärung können Nitrat $(NO_3)^-$, Fumarat, Fe^{3+} oder Sulfat $(SO_4)^{2-}$ als Elektronenakzeptoren verwendet werden.

Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Dissimilation_%28Biologie%29
https://de.wikipedia.org/wiki/Zellatmung

Zellatmung: Energiefreisetzung & aerober Stoffabbau der Glucose in vier Schritten

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \dashrightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O \quad \Delta G = -2880\ kJ/mol$$

(=> exergonische Reaktion)

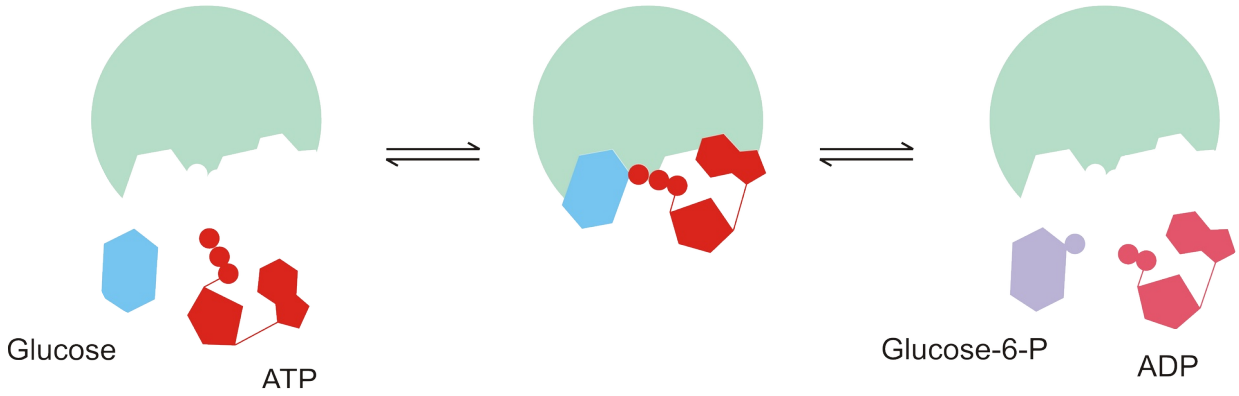
In der Zelle wird durch biologische Oxidation Energie gewonnen. Diese entspricht der Energie, welche durch die Verbrennung der gleichen Menge Zucker frei werden würde.
Damit diese Energie nicht in Form von Wärme frei wird - und somit unseren Körper schädigen würde (und sowieso verloren gehen würde), wird Glucose in viele enzymatisch gesteuerten Einzelschritte abgebaut. Diese Art des Abbaus ist besser kontrollierbar und energetisch effektiver!

Die vier Teilprozesse der Zellatmung:

- Glykolyse
- Oxidative Decarboxylierung
- Citratzyclus (auch Tricarbonsäurezyklus bzw. Krebszyklus genannt)
- Endoxidation (=Atmungskette)

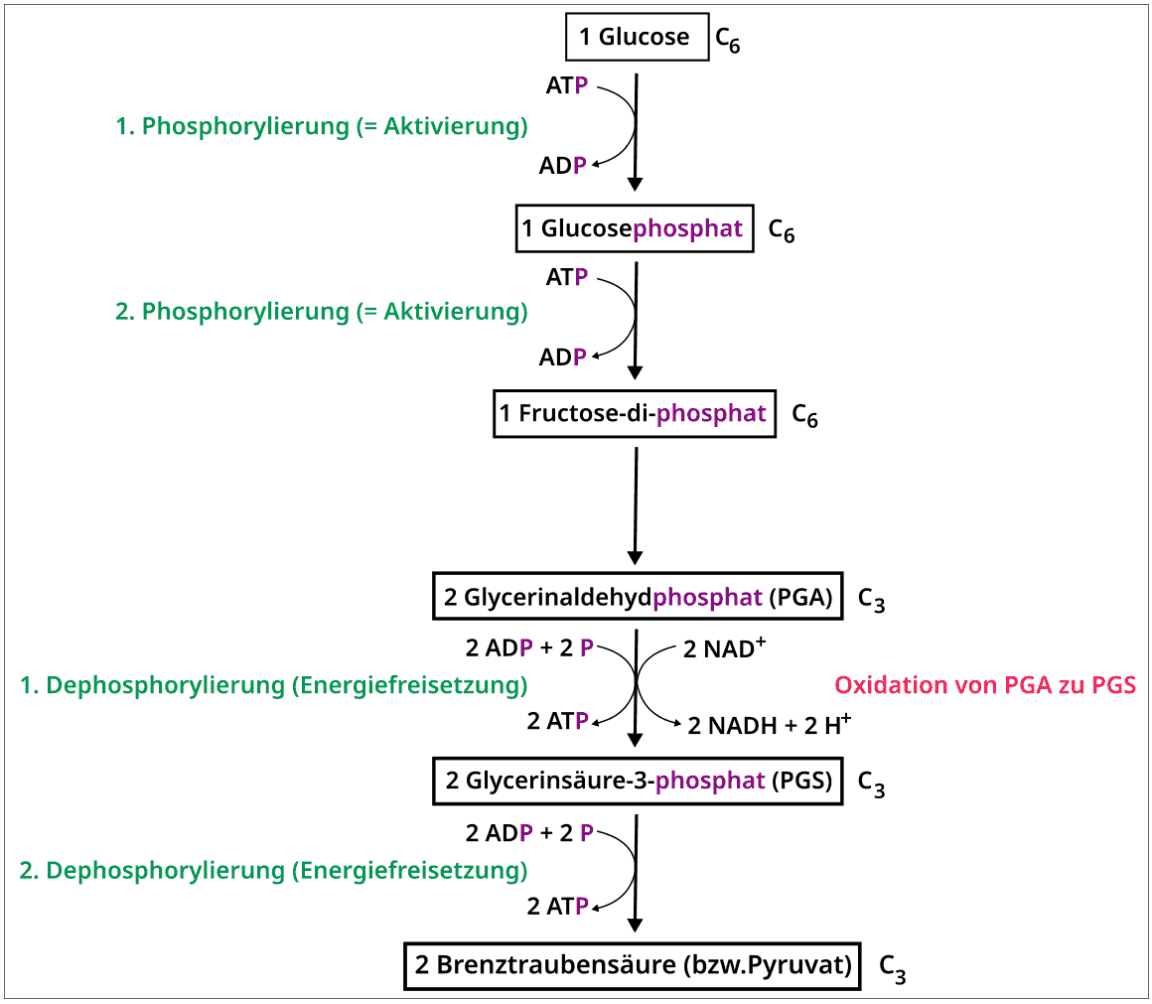
a) Glykolyse

Die **Glycolyse findet im Cytoplasma** der Zellen statt. Sie benötigt keinen Sauerstoff. Sie ist ein anaerober Vorgang. Ihr erster Schritt ist die Aktivierung der Glucose durch Phosphat. Diese Reaktion wird auch **Hexokinase-Reaktion** genannt. Das beteiligte Enzym heißt demzufolge Hexokinase (bzw. auch Glucokinase). Diese Reaktion bildet Glucose-6-Phosphat und ist mit $\Delta G = -13{,}7$ kJ/mol exergonisch!



Glucose + ATP ---> Glucose-6-Phosphat + ADP

Es schließt sich ein folgender Schritt an, bei dem aus Glucose-6-Phosphat dann Fructose-1,6-diphosphat gebildet wird:



Zusammenfassend kann man sagen, dass ein Abbau des C_6-Körpers „Glucose“ zu **zwei C_3-Körpern** (BTS = Brenztraubensäure) unter Gewinn von 2ATP und 2NADH/H^+ stattfindet.

Gesamtbilanz der Glycolyse:

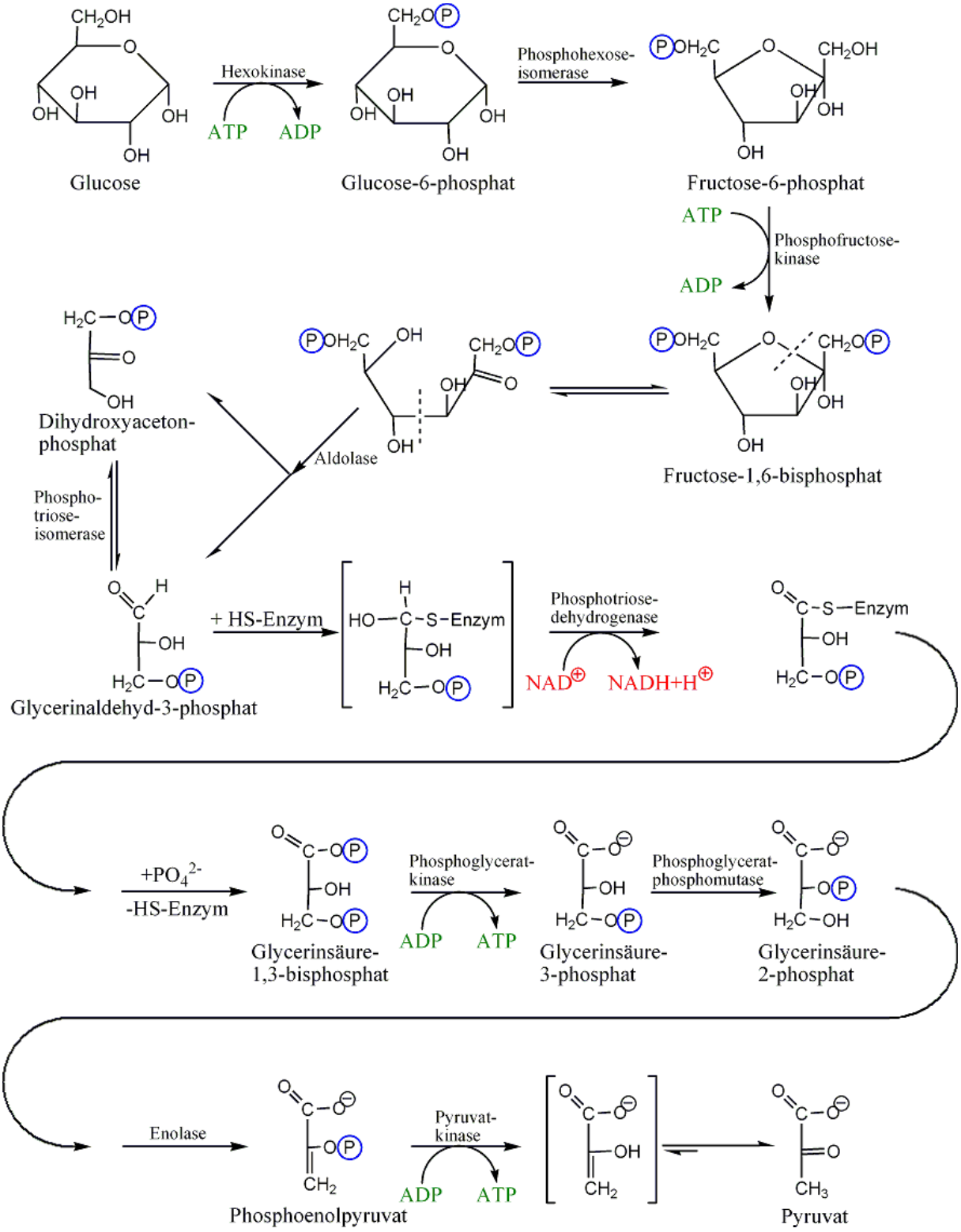
$C_6H_{12}O_6$ + 2ADP + 2P + 2NAD^+ ---> **2 Brenztraubensäure** + 2ATP + 2$NADH/H^+$
Glucose

Der Ablauf der Glycolyse findet im Cytoplasma jeder Zelle statt (und nicht etwa im Mitochondrium!)!

Es entstehen Reduktionsäquivalente in Form von $NADH/H^+$. Und genau das ist das Problem. Die Reduktionsäquivalente $NADH/H^+$ müssen wieder zu NAD^+ oxidiert werden, damit der Vorgang der Glycolyse weitergehen kann.

Dafür wird normalerweise Sauerstoff als Oxidationsmittel verwendet. Ohne Sauerstoff muss irgendein anderes Oxidationsmittel verwendet werden und das ist bei den verschiedenen Gärungen einfach die Brenztraubensäure selbst. Bei ihrer Reduktion entstehen dann die Abfallprodukte der Gärung, wie z.B. Ethanol, Propionsäure oder Milchsäure. Je nach Produkt werden die verschiedenen Gärungen benannt, also z.B. „Alkoholische Gärung“ (z.B. bei der Bierhefe), „Propionsäuregärung“ (z.B. bei verschiedenen Käsesorten) oder „Milchsäuregärung“ (bei Joghurt, Sauermilch etc.).

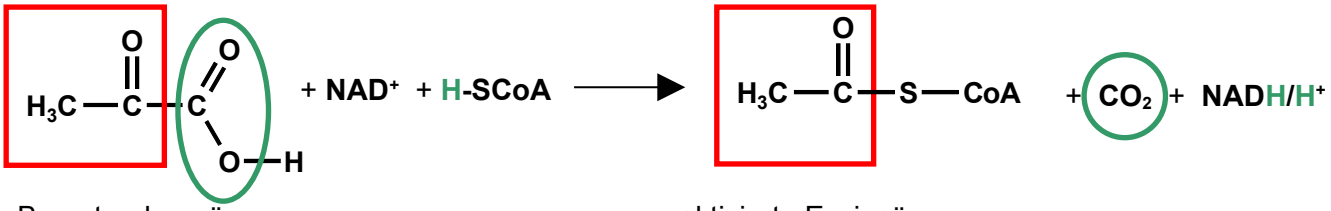
Details der Glycolyse



Quelle Bild: Public domain von Wikipediauser Morglin - Danke; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Glycolyse.png

b) Oxidative Decarboxylierung

In **der Matrix der Mitochondrien** wird Brenztraubensäure (C_3) unter Abspaltung von CO_2 in einen aktivierten C_2-Körper überführt. Dieser wird **Acetyl-CoA** bzw. aktivierte Essigsäure genannt. Dabei wird pro Brenztraubensäuremolekül ein $NADH/H^+$ gebildet.



Brenztraubensäure aktivierte Essigsäure

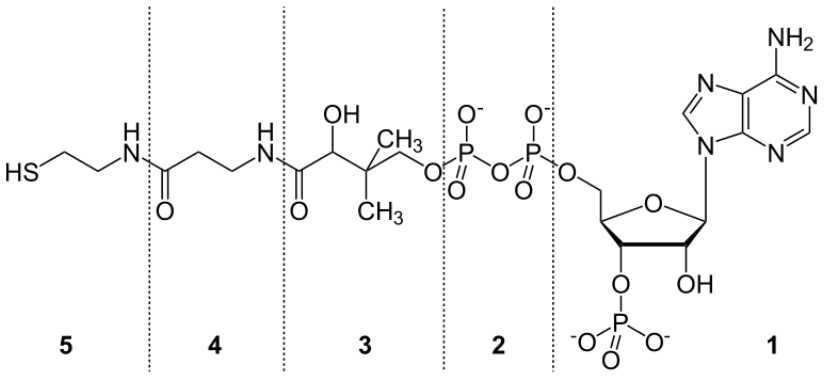
Gesamtbilanz:

(C₂-Körper) **2BTS + 2CoA + 2 NAD⁺ ---> 2 Acetyl-CoA + 2 NADH/H⁺** (aktivierte Essigsäure)

Der Ablauf der oxidativen Decarboxylierung findet in der Mitochondrien-Matrix statt.

Zusatzinformationen:

- https://de.wikipedia.org/wiki/Acetyl-CoA#Acetyl-CoA
- **Struktur des Acetyl-CoA:**



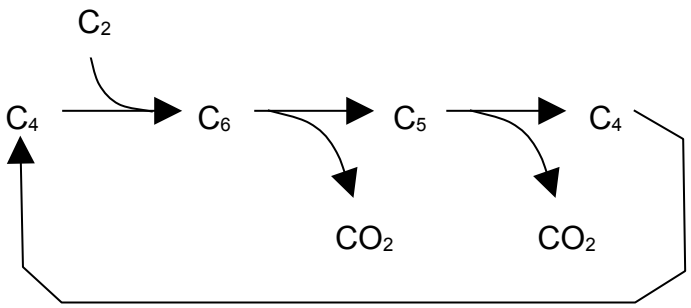
1: 3'-phosphoryliertes-Adenosin.
2: Diphosphat, Phosphorsäureanhydrid
1 + 2: 3'-phosphoryliertes-Adenosindiphosphat.
3: Pantoinsäure, Dihydroxy-Dimethyl-Butansäure.
4: β-Alanin.
3 + 4: Pantothensäure.
5: β-Mercapto-Ethylamin,Thioethanolamin, Cysteamin.
3 + 4 + 5: Pantethein

Quelle Bild: Public domain by Wikicommonsuser Neurotiker - Danke; https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Coenzym_A_beschriftet.svg

c) Citratzyclus = Citronensäurezyklus = Tricarbonsäurezyclus = Krebszyklus

Übertragung der **Acetyl-Gruppe** (aktivierte Essigsäure) [=***C_2-Körper***] auf einen **Akzeptor** (=Oxalacetat) [=***C_4-Körper***], wobei **Citronensäure** [***C_6-Körper***] entsteht.

Die Acetylgruppe wird dabei vollständig zu CO_2 oxidiert. Dann wird der Akzeptor regeneriert.



Der C_2-Körper (aktivierte Essigsäure) wird auf einen C_4-Körper übertragen. Dabei entsteht ein C_6-Körper (Citronensäure), welcher wieder in einen C_4-Körper abgebaut wird. Die 2 freiwerdenden Kohlenstoffe verlassen als sehr energiearmes CO_2 den Zyklus.

Wie viel Sauerstoff brauche ich für die beiden CO_2-Moleküle?
- 10 stammt aus der Acetylgruppe => 3 fehlen noch (also fehlen noch drei!)

Der notwendige Sauerstoff stammt aus H_2O, welches in den Zyklus einfließt. Die freiwerdenden Wasserstoffe werden auf Redoxäquivalente übertragen.

Was passiert mit den Redoxäquivalenten wie NAD^+ und 2FAD?
=> Sie werden reduziert

Gesamtbilanz:

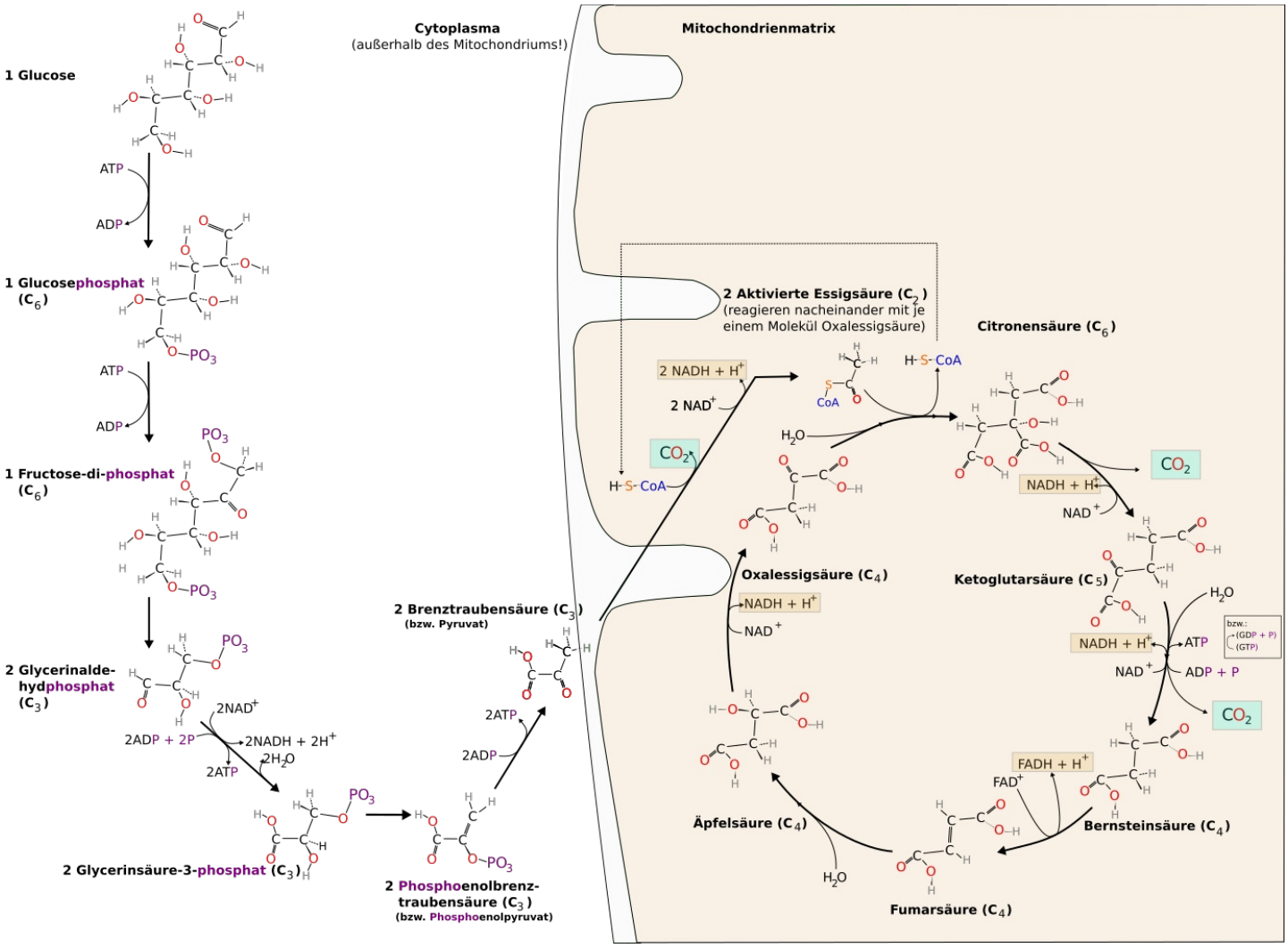
$2Acetyl\text{-}CoA + 6H_2O + 2ADP + 2P_i + 6NAD^+ + 2FAD \dashrightarrow 4CO_2 + 2CoA + 2ATP + 6NADH/H^+ + 2FADH_2$

Anmerkung: Eigentlich entsteht GTP statt ATP - hier also vereinfacht dargestellt!)

Ablauf: **in Mitochondrien (Matrix)**

Tipp: Das Säurerestanion der Essigsäure heißt Acetat. Es wird auch oft das Wort Acetyl verwendet. Also einfach nicht verwirren lassen, wenn beide Begriffe verwendet werden!

Ablauf von Glycolyse, oxidativer Decarboxylierung und Zitronensäurezyklus im Detail



Zwischenbilanz der ersten drei Teilschritte

Die energiereichen Reduktionsäquivalente dieses Abbauwegs der Glucose werden nun im weiteren Verlauf in der Mitochondrienmembran mithilfe von Sauerstoff wieder oxidiert. Sie stehen dann wieder für die oben beschriebenen Stoffwechselvorgänge als NAD^+ und FAD zur Verfügung und liefern außerdem bei der Oxidation noch einen erheblichen Energiebetrag.
Oxidationsmittel ist Sauerstoff.

$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 4ADP + 4P + 10NAD^+ + 2FAD \rightarrow 6CO_2 + 4ATP + 10NADH/H^+ + 2FADH_2$$

Zusatzinformationen
https://de.wikipedia.org/wiki/Citratzyklus

d) Endoxidation (=Atmungskette, =oxidative Phosphorylierung)

In den ersten drei Schritten wurde die energiereiche Glucose nun zu Kohlenstoffdioxid abgebaut. Allerdings wurden nur 4mol ATP gewonnen. Weitere Energie wurde zum Aufbau der Reduktionsäquivalente NADH + H^+ und $FADH_2$ (Oxidationszahl 0, genau wie bei H_2 => energiereich) genutzt. Dazu wurde der Wasserstoff der Glucose (Oxidationszahl I) und des aufgenommenen Wassers genutzt.
Ließe man diesen energiereichen Wasserstoff aus NADH/H+ nun wieder zur Oxidationstufe I oxidieren und seine Elektronen abgeben und auf Sauerstoff übertragen - so würde, genau wie bei der Knallgasreaktion sehr viel Energie freiwerden.
Diese Reaktionshitze wäre aber für Lebewesen sicherlich nicht sehr bekömmlich. Ein anderer Weg musste gefunden werden.

Was passiert nun mit NADH + H^+ und $FADH_2$?
=> Diese Stoffe dienen der weiteren Energiegewinnung, indem Sie eine Protonengradienten aufbauen. Dabei entstehen wieder NAD^+ und FAD. Man spricht auch von einer „Regenerationsreaktion“:

NADH/H^+ und $FADH_2$ werden mithilfe von O_2 oxidiert und liefern jeweils 3mol bzw. 2mol ATP.
(also noch zusätzlich 10·3 + 2·2 = 34 mol ATP)

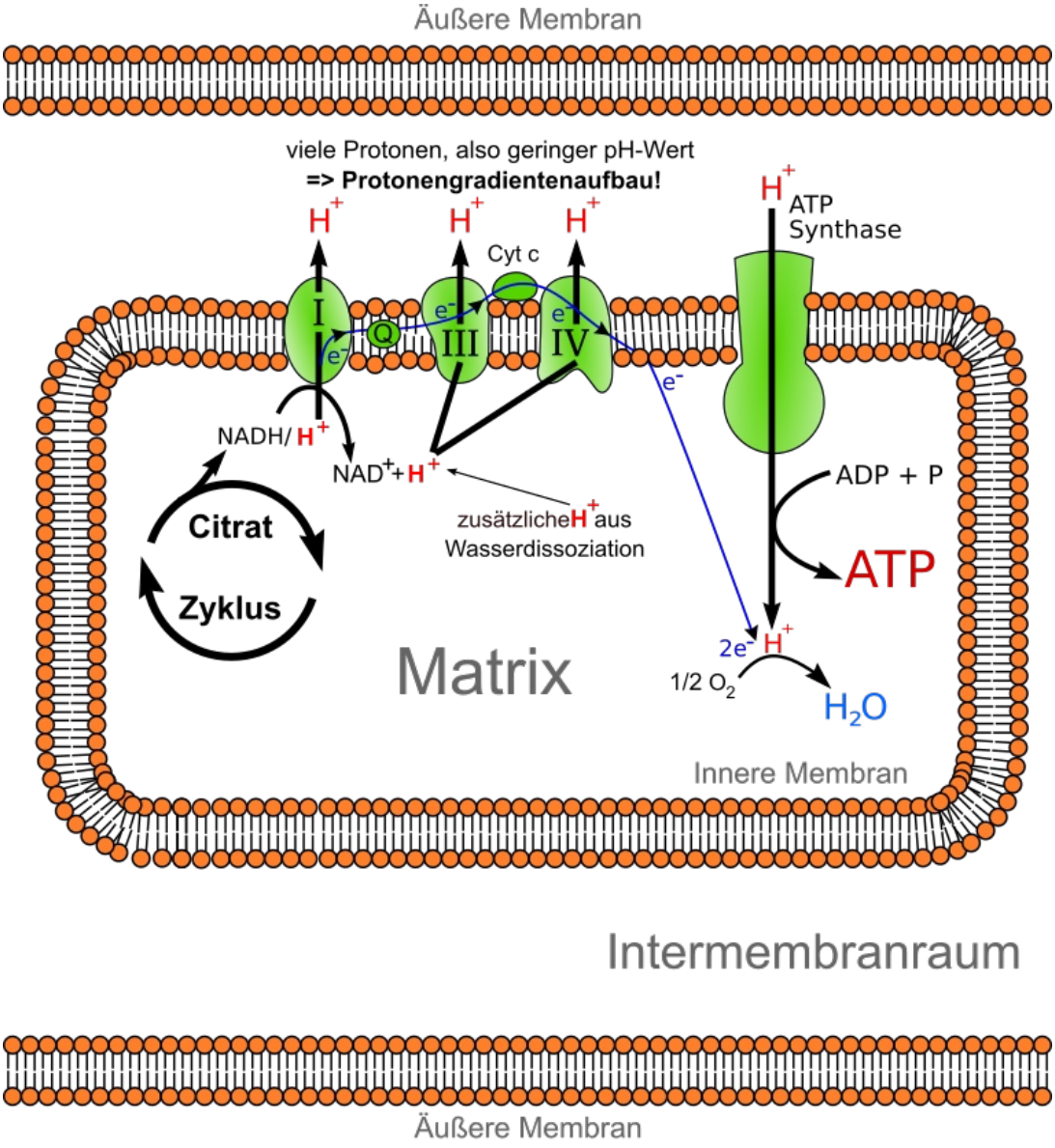
NADH/H^+ und $FADH_2$ werden dabei wieder zu NAD^+ und FAD regeneriert.

Genauer Ablauf:

1. NADH + H^+ und $FADH_2$ werden mit Hilfe von O_2 oxidiert und liefern jeweils 3mol bzw. 2mol ATP (also noch zusätzlich $10 \cdot 3 + 2 \cdot 2 = 34$ mol ATP)
2. Dabei wird schrittweise und langsam die Energie dieser Reaktion freigesetzt und zum Aufbau eines Protonengradienten genutzt.
3. Durch den Protonengradienten wird dann ATP gebildet.
4. Die ATP-Synthase liegt in der inneren Mitochondrienmembran, welche die Grenze zum Plasma des Mitochondrien darstellt.
5. Dabei werden Elektronen und Protonen von der inneren Seite (Matrix) nach Außen befördert. Auf der Außenseite baut sich der Gradient auf.
6. Die Elektronen werden zuerst vom Akzeptor FMN (Flavinmononucleotid) aufgenommen (Reduktion), da er eine höhere Elektronenaffinität als NADH/H^+ hat. Das Elektron wird dann auf ein Ubichinon übertragen, welches so reduziert wird. Dann schließen sich drei Cytochrom-Redoxsysteme an, welche Eisenionen enthalten. Letztlich werden die Elektronen auf Sauerstoffatome übertragen, sodass Oxidionen (O^{2-}-Ionen) entstehen.
7. Durch den ATP-Synthase-Komplex gelangen die Protonen wieder nach Innen. Dabei wird ATP gebildet.
8. Zum erneuten Aufbau des Protonengradienten müssen die Protonen im Inneren nun aber wieder entfernt werden. Dies geschieht durch die Bildung von Wasser. Dazu vereinigen sich die Protonen sich abschließend mit den Oxidionen, dabei entsteht Wasser.

Rein vom Energieumsatz läuft bei der Endoxidation eine Oxidation von Wasserstoff mit Sauerstoff (=Knallgasreaktion) zu Wasser ab. Im Gegensatz zur reinen Knallgasreaktion im Labor wird die Reaktionsenergie allerdings v.a. in Form von ATP frei! Diese Reaktion ist vergleichbar mit der Umkehrung der Photolyse von Wasser.

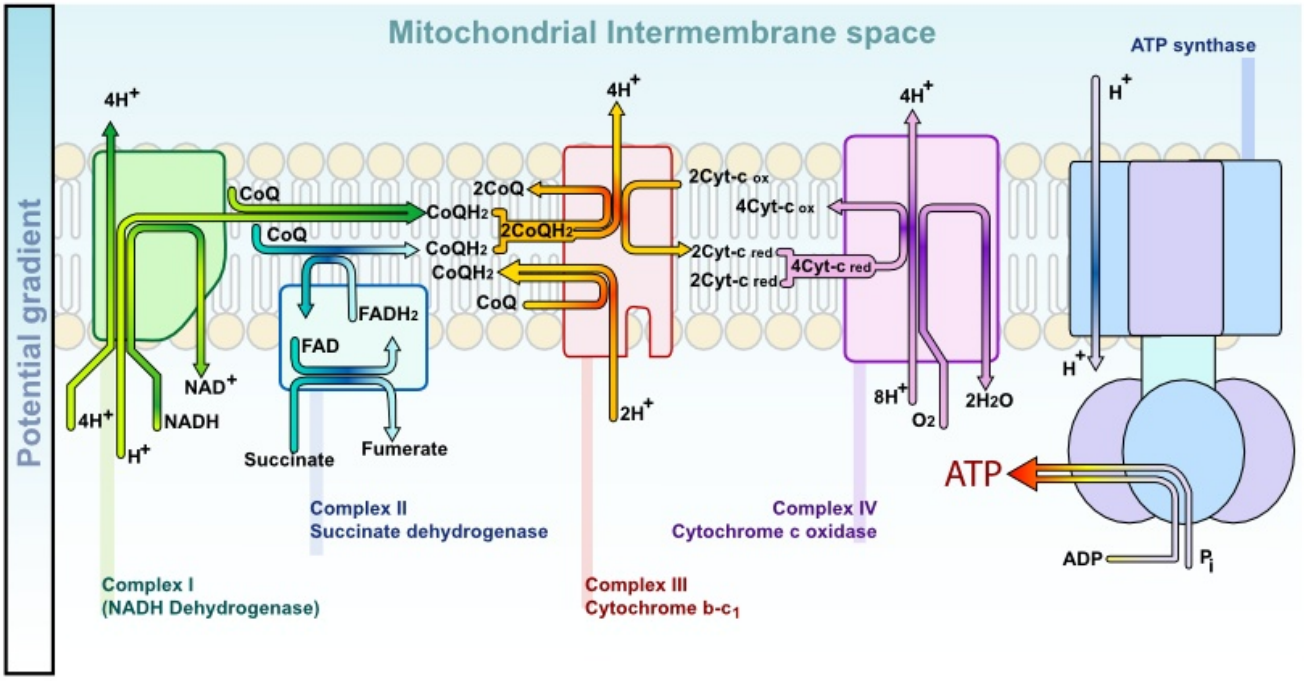
Schema der Endoxidation:



I = Flavinkomplexprotein
II = Cytochromkomplexprotein
III = Cytochromoxidaseprotein

Quelle Bild: Public Domain bearbeitet nach dem Bild von Wikicommonsuser Klaus Hofmeier - Danke;
https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Mitochondriale_Elektronentransportkette.svg

Übersicht über die Membranvorgänge der Endoxidation im Detail



Quelle Bild: Public domain by wikicommonsueser LadyofHats (Marina Ruiz) - muchas gracias;
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/ETC_electron_transport_chain.svg

Standardredoxpotentiale der beteiligten Stoffe:

Standardredoxpotential	Spannung
NAD^+ // NAD/H^+	-0,32V
FMN // $FMNH_2$	-0,30V
Fe^{3+} // Fe^{2+} (Komplex 1)	-0,30V
FAD // $FADH_2$	-0,22V
UQ // UQH_2	0,05V
Cytochrom b (mit Fe^{3+} // Fe^{2+})	0,08V
Cytochrom c (mit Fe^{3+} // Fe^{2+})	0,22V
Cytochrom a (mit Fe^{3+} // Fe^{2+})	0,55V
H_2O // O_2	0,82V

Zwischenbilanz der Endoxidation:

Bei der Oxidation der energiereichen Reduktionsäquivalente $NADH/H^+$ und $FADH_2$ mit Hilfe von Sauerstoff wurden nun die für den Glucoseabbau notwendigen NAD^+ und FAD regeneriert. Der Energiegewinn wurde in Form von ATP gespeichert

$$34ADP + 34P_i + 6O_2 + 10NADH/H^+ + 2FADH_2 \rightarrow 34ATP + 12H_2O + 10NAD^+ + 2FAD$$

=> Regeneration von NAD^+ und FAD => **Bildung von ATP**

Ablauf: **in Mitochondrienmembran**

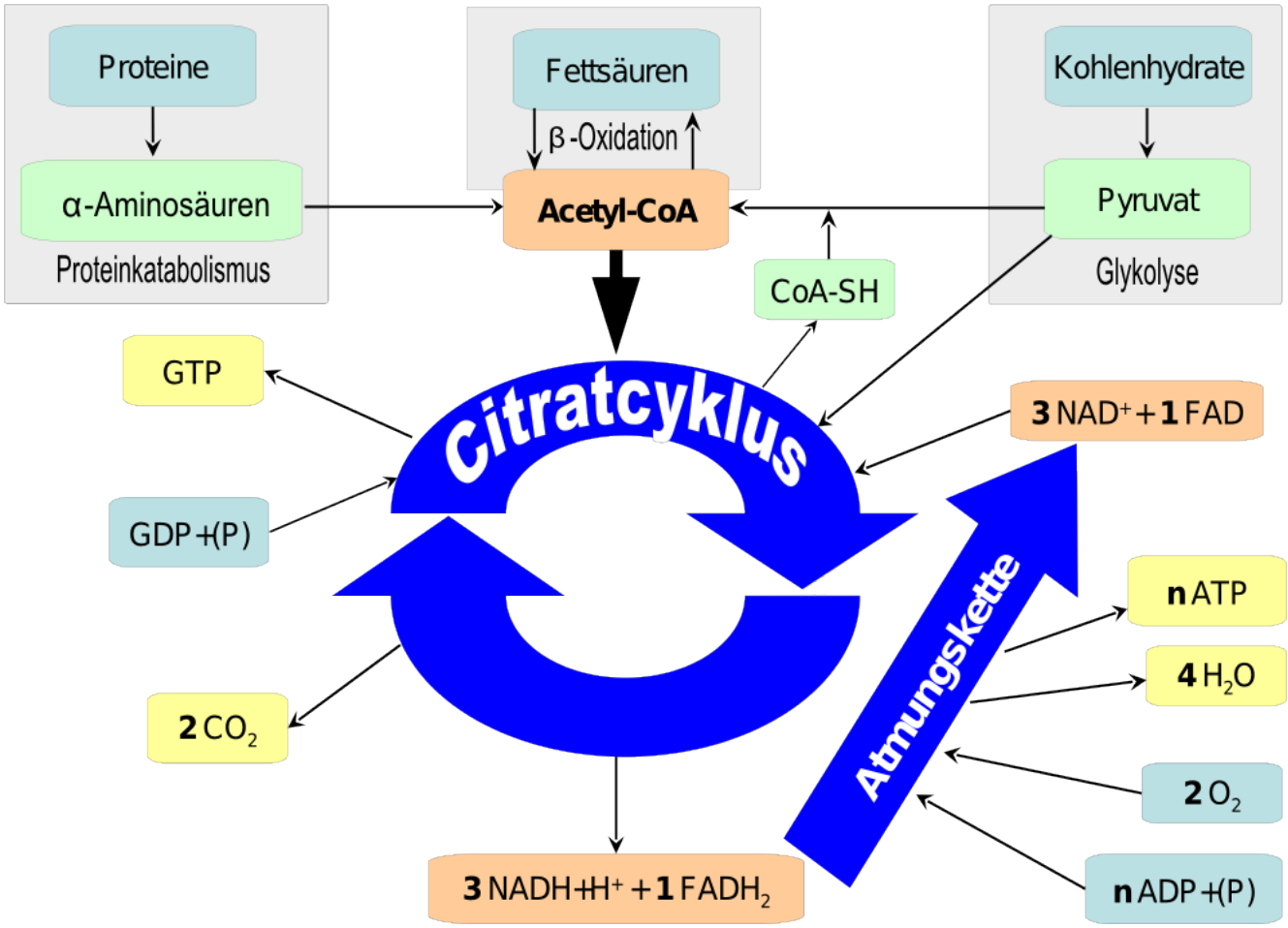
Gesamtbilanz des aeroben Abbaus von Glucose:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O + 38\ ADP + 38\ P \rightarrow 6CO_2 + 12H_2O + 38\ ATP$$

Anmerkung:
Die Einschleusung von $NADH/H^+$ aus dem Cytoplasma benötigt je 1 ATP => Ausbeute nur 32 ATP

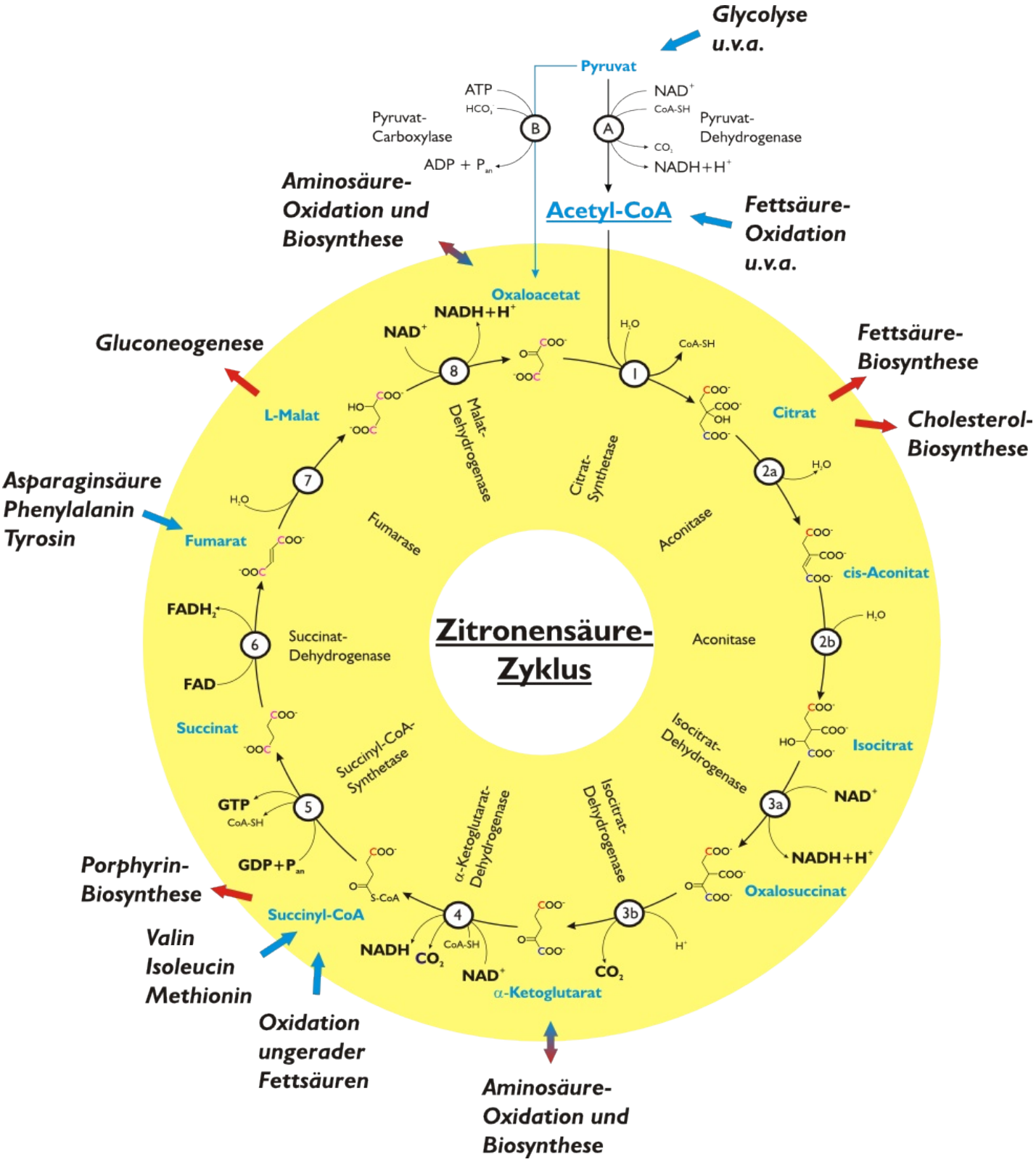
Zusatzinformationen:
https://de.wikipedia.org/wiki/Endoxidation

Übersicht Zitronensäurezyklus (= Citratzyklus)



Quelle Bild: Public Domain by Wikicommonsuser Pter Krimbacher - Danke; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Citratcyclus-Ueberblick.svg

Detaillierter Zitronensäurezyklus (= Citratzyklus)

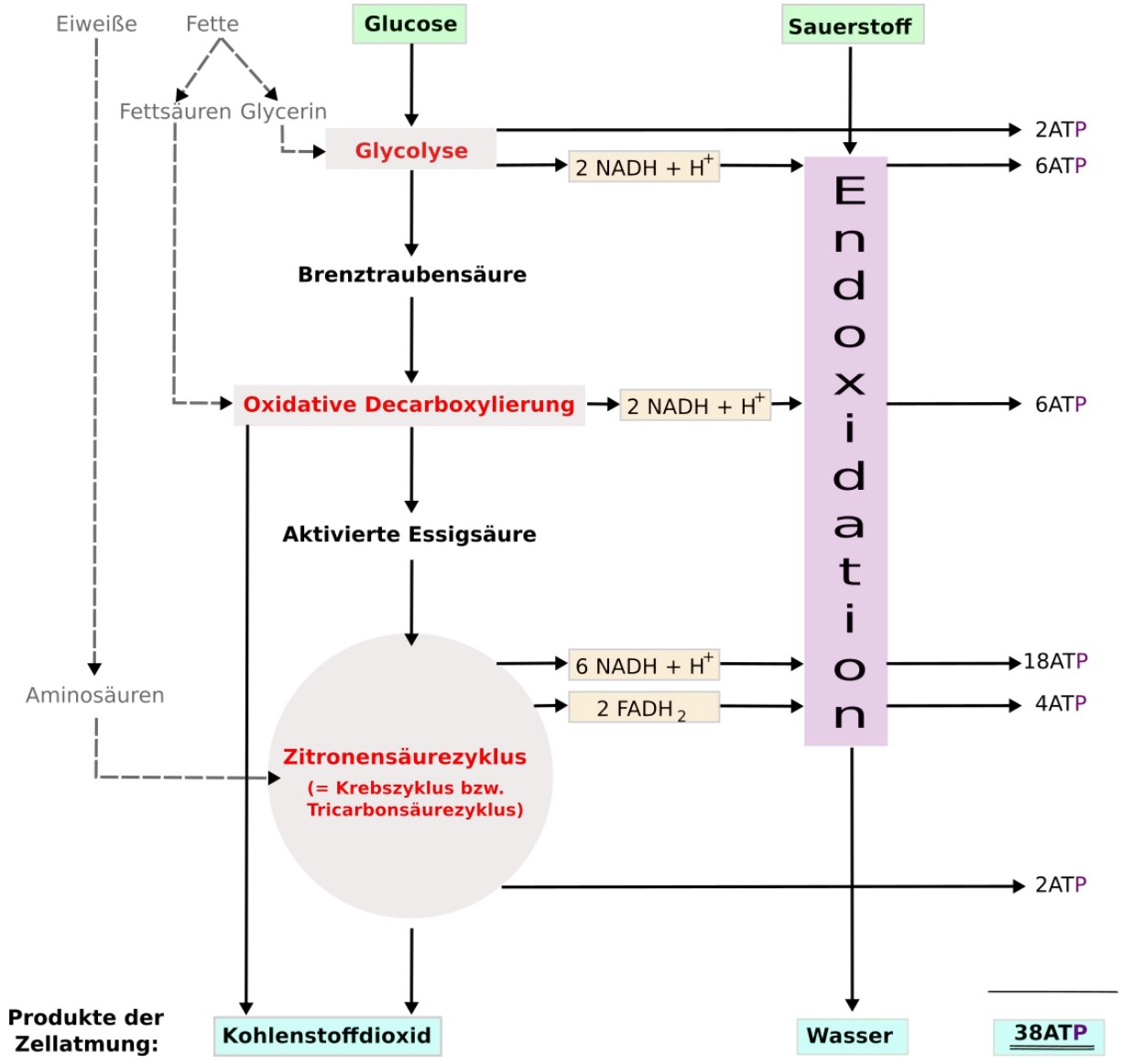


Quelle Bild: public domain von Wikicommonsuser Minutemen - https://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Citratcyclus.svg - danke

Zusammenfassung Zellatmung

Glucose wird mit der Nahrung aufgenommen (C_6-Körper). Diese wird zum Aldehyd oxidiert (PGA 2 mal C_3-Körper), dann zur Carbonsäure oxidiert (2malC_3-Körper) - erst PGS dann Brenztraubensäure (Anion = Pyruvat). Im Austausch mit Coenzym-A wird dann CO_2 abgespalten, dabei entsteht aktivierte Essigsäure (C_2-Körper), welche im Citratzyklus an Oxalessigsäure (C_4-Körper) bindet. Dabei entsteht ein C_6-Körper (Citronensäure), welcher nach und nach wieder zu einem C_4-Körper oxidiert wird. Dabei wird an 2 Stellen CO_2 abgespalten.

Energie wird in Form von $NADH+H^+$ und ATP an mehreren Stellen freigesetzt.



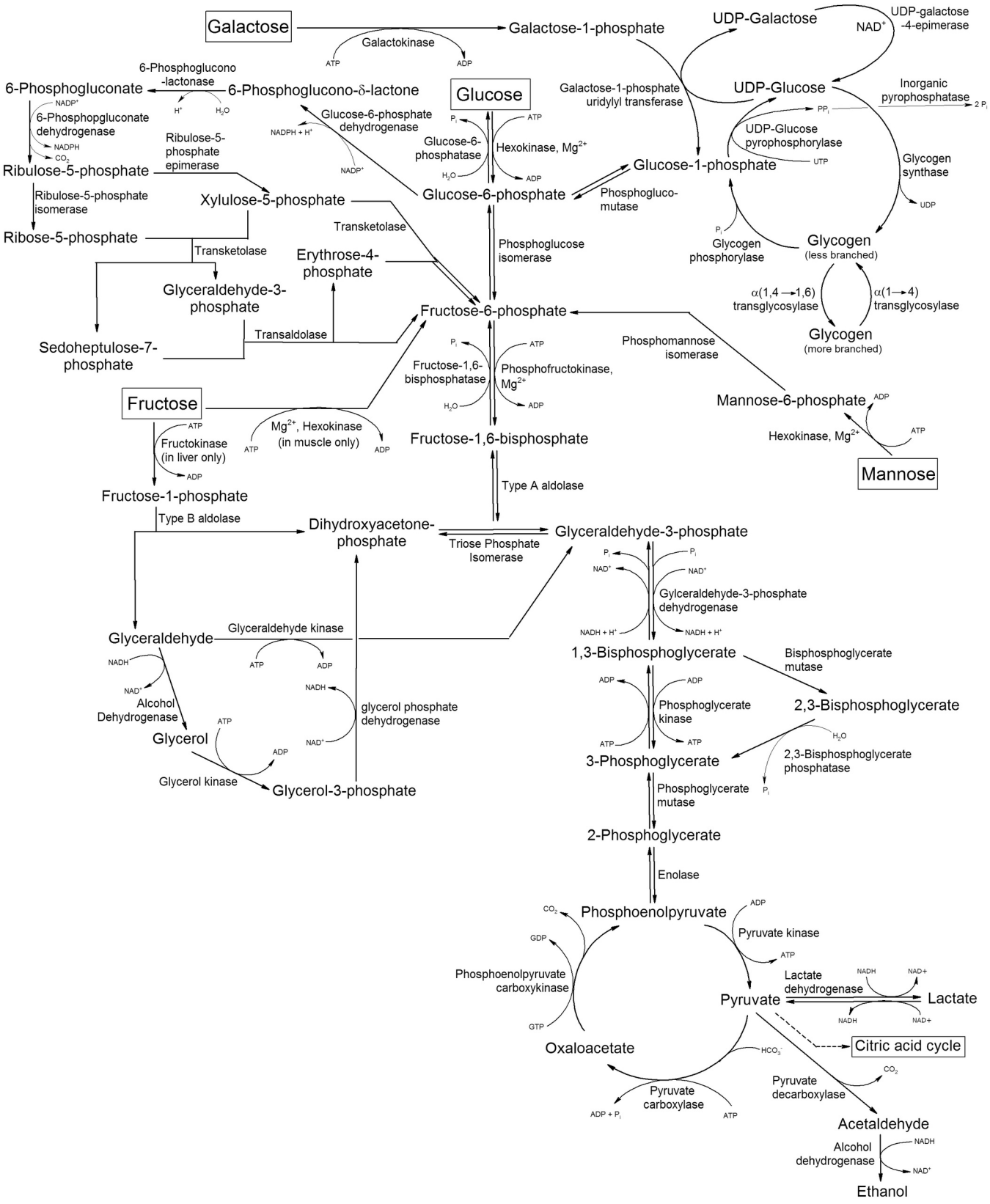
Ein Video mit einer kompletten Zusammenfassung findet ihr in meinem Kanal:
https://youtu.be/hRk4_HJtM18

Gesamtbilanz des aeroben Abbaus von Glucose:

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 6\ H_2O + 38\ ADP + 38\ P \dashrightarrow 6CO_2 + 12H_2O + 38\ ATP$$

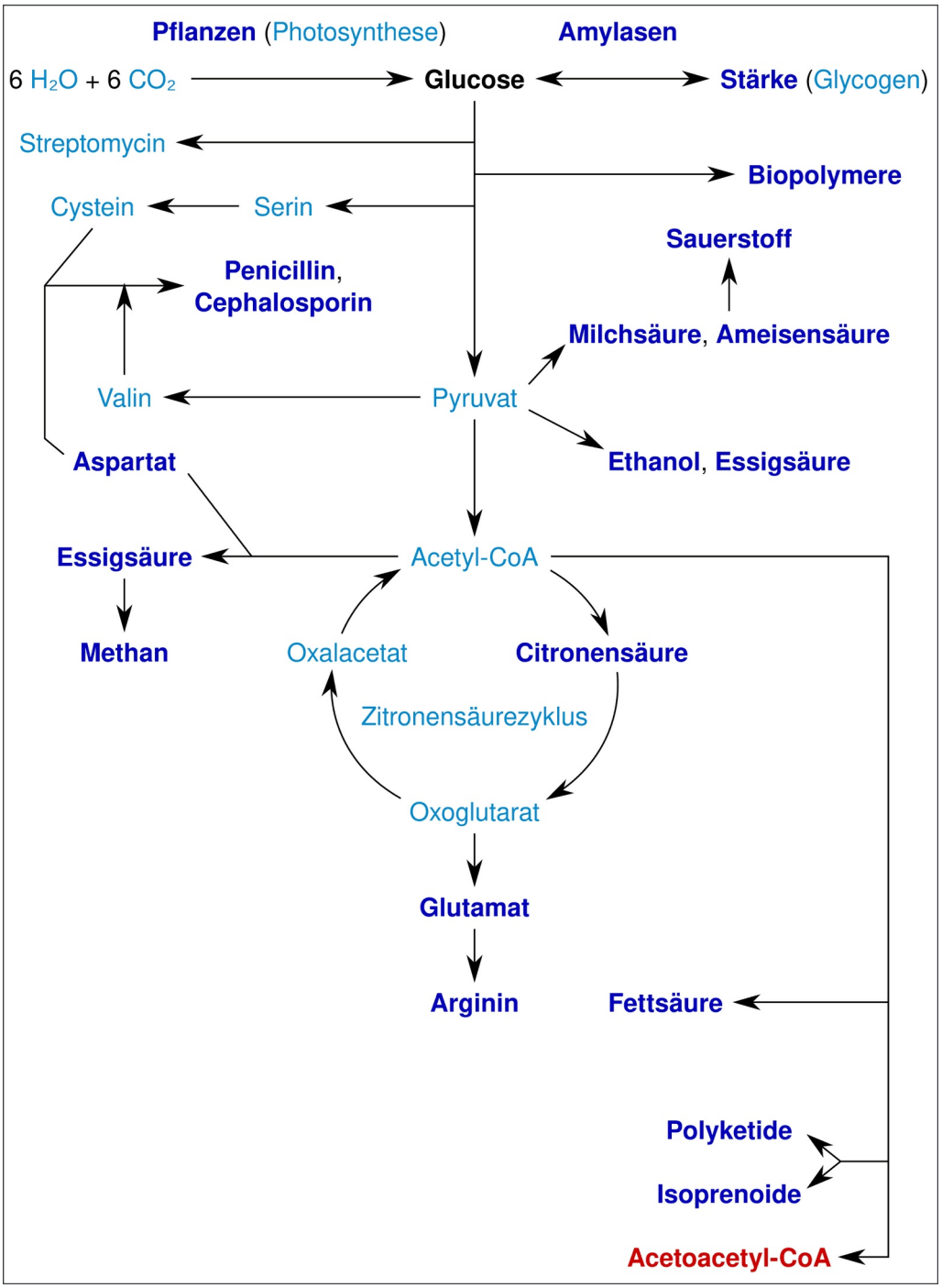
Achtung: der Wert von 38mol ATP variiert von Buch zu Buch ein wenig!

Stoffwechselwege in Zelle



Quelle Bild: **GNU Free Documentation License**, Version 1.2 and Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported by Wikicommonsuser LhcheM; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Metabolism_of_common_monosaccharides,_and_related_reactions.png – thanks you

Auswahl an Produkten, die biotechnologisch aus Glucose erstellt werden können



Quelle Bild: Public Domain by Wikicommonsuer Hk kng; https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Glucose-Produkte.svg - Danke