

NATURA Abiturtraining

Stoffwechsel Lösungen

Carla Baller
Hanna Eckebrecht
Horst Schneeweiß

Ernst Klett Verlag
Stuttgart Leipzig

1. Auflage

1 5 4 3 2 1 | 21 20 19 18 17

Alle Drucke dieser Auflage sind unverändert und können im Unterricht nebeneinander verwendet werden. Die letzte Zahl bezeichnet das Jahr des Druckes.

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Nutzung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages. Hinweis § 52 a UrhG: Weder das Werk noch seine Teile dürfen ohne eine solche Einwilligung eingescannt und in ein Netzwerk eingestellt werden. Dies gilt auch für Intranets von Schulen und sonstigen Bildungseinrichtungen. Fotomechanische oder andere Wiedergabeverfahren nur mit Genehmigung des Verlages.

© Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart 2017. Alle Rechte vorbehalten. www.klett.de

Autorinnen und Autoren: Carla Baller, Hanna Eckebrecht, Dr. Dr. Horst Schneeweiß

Redaktion: Dr. Detlef Eckebrecht DIDACTIC CONCEPTIONS

Mediengestaltung: Marlene Klenk-Boock

Layoutkonzeption und Gestaltung: Ernst Klett Verlag GmbH, Stuttgart

Illustrationen: Otto Nehren, Achern

Lösungen zu ISBN 978-3-12-049136-1

Fließgleichgewichte im Stoffwechsel (Seite 2)

- **1** Abbildung 1 zeigt ein Gefäß, das Wasser enthält und über einen Zulauf sowie einen Abfluss verfügt. Entsprechen die Mengen Wasser einander, die zu- bzw. abfließen, bleibt der Wasserstand im Gefäß gleich. Es herrscht ein Fließgleichgewicht. Für einen konstanten Zufluss muss allerdings das vorgeschaltete Gefäß stets über genug Wasser verfügen, was nur möglich ist, wenn hier selbst genug Wasser hineinfließt. Entsprechen Zu- und Abflussmenge einander nicht, steigt oder sinkt der Wasserspiegel in dem markierten Gefäß.
- **2** In Abbildung 2 entspricht die Aufnahme von Gras dem Wasserzufluss und die Abgabe von Kot dem Wasserabfluss. Zur Herstellung eines Fließgleichgewichtes müssen Aufnahme und Abgabe im richtigen Verhältnis stehen. Der Zufluss von Energie und Stoffen aus der Nahrung entspricht der Abgabe von Stoffen und Energie, zum Beispiel durch Kot und Körperwärme.
- **3** Durch einseitige Ernährung können nicht alle benötigten Stoffe aufgenommen werden. Die Reservoirs dieser Stoffe leeren sich, wenn die Stoffe trotzdem abgegeben oder umgesetzt werden. Langfristig führt dies immer zu einem Mangel im Lebewesen, da das Fließgleichgewicht nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Andererseits können sich im Überschuss aufgenommene Stoffe anreichern, wenn sie nicht hinreichend schnell im Stoffwechsel zu anderen Stoffen umgebaut werden können.
- **4** Das mittlere Gefäß entspricht dem Lebewesen, der Zufluss der Nahrungsaufnahme und der Abfluss der Ausscheidung (einschließlich der Kohlenstoffdioxid-Ausscheidung über die Atmung). Stoffliche Umwandlungen werden jedoch nicht dargestellt. Die größere Höhe des Zuflusses im Gegensatz zum Abfluss symbolisiert die energetische Nutzbarkeit der Ausgangsstoffe. In dem Modell ließe sich ein Wasserrad anbringen, das die energetische Nutzung visualisiert. Das Modell kann so allerdings nicht das Wachsen des Lebewesens darstellen.

ATP — der universelle Treibstoff in Lebewesen (Seite 3)

- **1** Das Strukturmodell zeigt die räumliche Anordnung von Komponenten, hier der Atome in der ATP-Synthase. Das Funktionsmodell zeigt den Antrieb der ATP-Synthese durch den Strom von Wasserstoff-Ionen.
- **2** Die Reaktionsfolge enthält zwei energetische Kopplungen. Substrat 1 wird energetisch zur ATP-Bildung genutzt, das in der Reaktion von Substrat 2 wiederum zu ADP und Phosphat reagiert und damit offenbar eine endergonische Reaktion ermöglicht.
- **3** Der relativ kleine ATP-Vorrat ist von großer Bedeutung, weil seine Nutzung spontane Muskelkontraktionen ermöglicht, ohne dass vorbereitende Reaktionen notwendig sind. In diesem kurzen Zeitraum seiner Nutzung können Reaktionen zur ATP-Regeneration gestartet werden. Außerdem wird die Durchblutung und damit die Versorgung mit Nährstoffen und Sauerstoff gefördert.

Energieversorgung und Low-Carb-Diät (Seite 4)

- **1** Die Schmelzenergie von Eis ist bekannt. Aus der Masse des Wassers im inneren Gefäß kann man die vom Lebewesen freigesetzte Energiemenge errechnen. Die äußere Eisschicht verhindert durch ihr Schmelzen die Störung durch Wärmeenergie aus der Umgebung der Versuchsanordnung.
- **2** Es erfolgen Wärmeabgaben als „Abwärme“ bei biochemischen Reaktionen. Außerdem gibt das Tier energetisch nutzbare Stoffe in den Ausscheidungen ab. Diese werden z. B. von Zersetzern (Destruenten) genutzt. Außerdem können durch den Stoffwechsel Speicher für energetisch nutzbare Stoffe im Körper befüllt oder teilweise entleert werden.

Energieumwandlungen in Lebewesen (Seite 5)

- **1** Abbildung 1 zeigt modellhaft die Energieumwandlung in Zellen. Chemische Energie in Form von energetisch nutzbaren Nährstoffen wird verstoffwechselt und die chemische Energie bei der Reaktion von ATP zu ADP+P zur Verfügung gestellt. Diese kann genutzt werden, um Spannungen in Molekülen zu erzeugen (z. B. im Rahmen der Muskelbewegung) und somit in mechanische Energie umgewandelt werden. ATP kann aber auch im Rahmen des aktiven Transportes genutzt werden, um Konzentrationsunterschiede herzustellen. Hierdurch kann beispielsweise der osmotische Druck erhöht werden. Konzentrationsunterschiede spielen aber auch eine große Rolle bei der Umwandlung und Weiterleitung von Nervensignalen (elektrische Energie). Energie kann auch (ggf. nur kurzzeitig) gespeichert werden, z. B. mithilfe von ATP, in einem aufgebauten Konzentrationsgefälle, in Molekülspannung oder Nährstoffen. Bei jeder dieser Umwandlungen von Energie entsteht auch thermische Energie, die in Form von Wärme abgegeben wird.
- **2** Individueller Lösungsweg. Möglich wäre etwa: Abbildung 1 zeigt eine adulte Amsel, die ihre Jungtiere füttert. Hierbei führt sie den Jungen Nährstoffe zu, bei deren Abbau chemische Energie bereitgestellt werden kann. Diese wird z. B. benötigt, um ATP herzustellen, das genutzt wird, um Motorproteine zur Konformationsänderung zu bringen, sodass sich Muskeln bewegen, die dafür sorgen, dass die Jungvögel den Schnabel aufsperrten. Für das Wachstum von Körperteilen sind viele Zellteilungen nötig. Es müssen ebenfalls Motorproteine unter ATP-Verbrauch bewegt werden, um die Spindelfasern während der Kernteilung auseinander zu bewegen. Die Jungtiere hören den Anflug der Eltern und reagieren darauf, indem sie die Schnäbel aufreißen. Hierfür muss der akustische Reiz wahrgenommen, in eine elektrische Erregung umgewandelt und diese bis zum Gehirn weitergeleitet werden. Hierfür sind Konzentrationsunterschiede an den Synapsen notwendig, die nur durch aktiven Transport durch die Zellmembran hergestellt werden können. Dies geschieht ebenfalls unter ATP-Verbrauch.
- **3** Tiere nehmen nicht pausenlos Nahrung auf. Die Möglichkeit, aus Nährstoffen gebildete Reservestoffe zu speichern, ermöglicht die kontinuierliche Freisetzung von Energie. Durch ATP oder Konzentrationsunterschiede steht Energie im Bedarfsfall auch sofort in der benötigten Form zur Verfügung. Das Speichern von Stoffen, z. B. Fette, ermöglicht bei Bedarf eine Energiefreisetzung.

Pflanzen als Energiewandler (Seite 6)

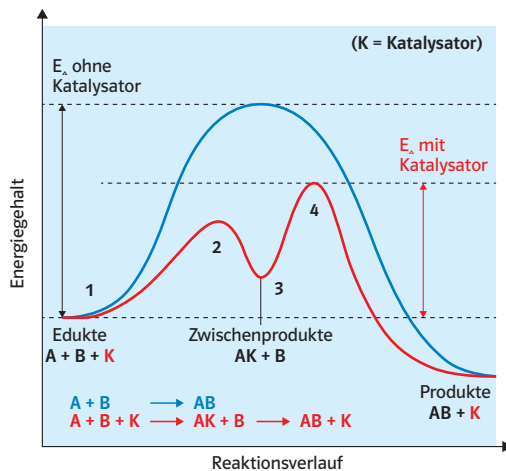
- 1 Zwei Thermosflasche wurden befüllt, eine mit keimenden Erbsen und eine mit gekochten Erbsen. Beide Thermosflaschen wurden mit Baumwolle verschlossen und mit einem Thermometer versehen. Einige Stunden nach Versuchsbeginn zeigt der Stand des Thermometers, dass die Temperatur bei den keimenden Erbsen höher ist als bei den gekochten.
- 2 Während der Keimung nutzt der Embryo den Nährstoffvorrat in der Erbse für seinen Energie- und Baustoffwechsel. Im Rahmen des Energiestoffwechsels stellt er ATP her. Dieses wird z. B. genutzt, um Konzentrationsunterschiede an Membranen durch aktiven Transport herzustellen. Diese Konzentrationsunterschiede können für den Aufbau vom osmotischen Druck beim Zellwachstum genutzt werden. Bei jeder dieser Energieumwandlungen wird ein Teil der Energie in thermische Energie umgewandelt. Diese verbreitet sich als Wärme im Organismus, wird aber auch von dem Organismus abgestrahlt.
- 3 In Abbildung 1 und 2 sind Schneeglöckchen in der Blüte zu sehen. Direkt an den Pflanzen fehlt der Schnee. Nicht nur bei der Keimung, sondern auch bei Wachstum und Fortbestehen der Pflanzen finden Energieumwandlungen bei Stoffwechselreaktionen statt. Dabei entsteht u. a. thermische Energie. Diese Wärme bewirkt, dass Schnee an Stängeln und Blättern der Schneeglöckchen schmilzt. Die Hypothese, die Schneeglöckchen hätten den Schnee beiseite geschoben, ist entsprechend falsch.
- 4 Individuelle Lösung, möglich wäre etwa: Das Entstehen thermischer Energie ist in allen Pflanzen unumgänglich und muss auch hier stattgefunden haben. Auch ist der Schnee nicht so hoch, dass die entstandene Wärme nicht ausgereicht hätte. Wahrscheinlich ist auf den Schneeglöckchen Neuschnee zu sehen. Denkbar wäre auch, dass nach dem letzten Schneefall die Temperaturen so stark abgefallen sind, dass auch die Wärme aus den Schneeglöckchen nicht in der Lage war, den Schnee zu schmelzen.

Muskelkontraktionen (Seite 7)

- 1 1 – E, 2 – C, 3 – F, 4 – B, 6 – A, 7 – D
- 2 Ohne ATP wäre eine Muskelbewegung nicht möglich und damit auch weder Bewegung noch Herzschlag und Atmung. ATP wird dabei aber nicht für die Bewegung der Filamente gegeneinander benötigt, sondern für die Ablösung des Myosinkopfes vom Actinfilament. Nach der Spaltung von ATP zu ADP und P kehrt das Myosinköpfchen in seinen energiereichen Ausgangszustand zurück, der Muskel ist entspannt. Nun kann der Muskel erneut kontrahieren. Ohne ATP befände sich der Muskel in einem Stadium der Daueranspannung.

Der Saccharose-Abbau (Seite 8)

- 1 Die glycosidische Bindung zwischen den beiden Zuckerbausteinen des Disaccharids wird durch Anlagerung von einer Hydroxygruppe und eines Wasserstoffatoms aus einem Wassermolekül gelöst. Es findet eine Hydrolyse statt.
- 2 siehe Abbildung



- 3 Die Aktivierungsenergie bewirkt bei den Edukten die Spaltung von Bindungen, sodass Produkte entstehen können. Durch die Anlagerung der Edukte an den Katalysator ist dazu ein geringerer Energiebetrag notwendig. Das Zwischenprodukt hat durch seine „Tal-Lage“ eine gewisse Stabilität. Die bei der exergonischen Reaktion frei werdende Energie ist in beiden Fällen gleich. Sie ist an der unterschiedlichen Lage der Edukte und Produkte in der Grafik ablesbar.

Stoffgruppen und funktionelle Gruppen im Stoffwechsel (Seite 9)

- 1 Durch die Abspaltung der Hydroxygruppe von der Carboxylgruppe der einen Aminosäure und dem Wasserstoff-Atom von der Aminogruppe der anderen Aminosäure entsteht eine Peptidbindung zwischen den Aminosäuren und Wasser. Es handelt sich um eine Kondensationsreaktion. Im unteren Teil ist die Oxidation von Methanol zu Methanal dargestellt.
- 2 Wasser als polares Lösungsmittel kann unpolare Stoffe nur sehr schlecht lösen. Dadurch ist ein Transport in der Zelle und in Transportsystemen wie dem Blutkreislauf kaum möglich. Er gelingt nur dann, wenn solche Stoffe mit einem polaren Stoff gekoppelt sind.
- 3 Kohlenhydrate und Proteine kommen in Lebewesen in sehr langkettigen Molekülen vor, Fette als Triglyceride. Diese Nährstoffe sind Bau- und Speicherstoffe von Lebewesen. Durch Hydrolysen können die Bausteine im Verdauungstrakt oder z. B. in Samen von Pflanzen verfügbar gemacht werden. Monosaccharide und Aminosäuren sowie Glycerin und Fettsäuren können Biomembranen passieren und dadurch in Zellen gelangen.

Reaktionstypen im Stoffwechsel (Seite 10)

- **1** Bei Redox-Reaktionen finden Elektronenübergänge statt. Kohlenstoff kommt zellulär in verschiedenen Oxidationsstufen vor. Bei Säure-Base-Reaktionen finden Übergänge von Wasserstoff-Ionen statt, Säuren können sie abgeben, Basen können sie aufnehmen. Kondensationsreaktionen bzw. Hydrolysen, (Verbindung unter Abgabe von kleinen Molekülen, hier H_2O) bzw. die Trennung unter Aufnahme kleiner Moleküle, spielen eine entscheidende Rolle beim Aufbau bzw. der Zerlegung von Nährstoffmolekülen wie Stärke und Proteine.
- **2** Abbildung 2 zeigt die Reduktion von Ethanal mithilfe eines Reduktionsäquivalents ($NADH + H^+$), in Abbildung 3 den Zusammenschluss von zwei Monosacchariden durch Kondensationsreaktion unter Wasserausschluss.
- **3** Nährstoffe sind große Moleküle, die durch Kondensationsreaktionen aus Bausteinen gebildet wurden und in der Verdauung durch Hydrolysen gespalten werden. Auch die Bildung und Spaltung von ATP geschieht unter Wassereinbau oder -abgabe.

Grundumsatz (Seite 11)

- **1** Als Grundumsatz wird die Energiemenge bezeichnet, die in völliger Ruhe bei einer Umgebungstemperatur von $25^\circ C$ zur Aufrechterhaltung der Körperfunktionen benötigt wird.
- **2** Die Temperatur des großen Kolbens fällt nach 300 Minuten auf $45^\circ C$, während der kleine Kolben auf $31^\circ C$ abkühlt. Bei gleicher Ausgangstemperatur und gleicher Umgebungstemperatur kühlt der kleine Kolben schneller ab, da die Oberfläche (Ort der Wärmeabgabe) im Verhältnis zum Volumen (Wärmespeicher) größer ist als bei dem großen Kolben.
- **3** Der Wärmehaushalt eines kleinen homoiothermen Tieres ist vergleichsweise ungünstig, da aufgrund des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses mehr Energie zur Verfügung gestellt werden muss. Das Blut zirkuliert schneller, dementsprechend ist die Herzfrequenz vergleichsweise hoch, da das Tier proportional mehr Energie benötigt, um die Körpertemperatur konstant zu halten.
- **4** Tier A: große Maus, Tier B: kleine Maus und Tier C: Frosch
Bei dieser Untersuchung wird die Kohlenstoffdioxidabgabe als indirektes Maß für die Stoffwechselvorgänge genutzt. Gleichwarme (homoiotherme) Tiere können ihre Körpertemperatur konstant halten. Die Kohlenstoffdioxidabgabe nimmt bei der großen und kleinen Maus von $10^\circ C$ bis $20^\circ C$ Umgebungstemperatur ab, da immer weniger Energie zum Erreichen der Körpertemperatur notwendig ist. Die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur kostet viel Energie, somit müssen die Werte der ersten beiden Spalten der großen und kleinen Maus zugeordnet werden. Das Verhältnis von Körpervolumen und Oberfläche ist bei der großen Maus bei kühleren Temperaturen günstiger, sodass die CO_2 -Abgabe bei steigender Umgebungstemperatur langsamer abfällt als bei der kleinen Maus.
Der Frosch gehört zu den wechselwarmen, poikilothermen Tieren. Er benötigt weniger Energie als homoiotherme Tiere. Die CO_2 -Freisetzung ist demnach geringer. Je höher die Außentemperatur ist, desto mehr steigt die Körpertemperatur des Frosches an. Die Stoffwechselvorgänge laufen dann schneller ab und er setzt mehr CO_2 frei (RGT-Regel).

Thermoregulation bei der Hummel (Seite 12)

- **1** Durch Kontraktion der Flugmuskulatur wird Wärme erzeugt. Die Körperflüssigkeit (Hämolymphe) transportiert die Wärme in den Hinterleib (Abdomen) der Hummel. Ein Teil der Wärme wird durch ein Gegenstromprinzip zurück in den Brustbereich (Thorax) geleitet. Um vor Überhitzung zu schützen und um die Brut zu erwärmen, wird die Wärme über thermische Fenster abgegeben. Ein weiterer Mechanismus zum Kühlen ist das Abgeben von Flüssigkeit, die durch Verdunstung Kälte erzeugt.
- **2** Der Sauerstoffgehalt im Gefäß sinkt anfangs langsamer, da die Hummel ihre Atmung noch in der Ruhephase ausführt. Mit stärkeren bzw. häufigeren Muskelkontraktionen wird Wärme erzeugt, die Körpertemperatur steigt. Die Energie für die Kontraktionen wird in Form von ATP von der Zellatmung bereitgestellt.
- **3** Der Begriff „poikilotherm“ ist nur teilweise zutreffend, da die Hummel zu einem gewissen Grad in der Lage ist, die Körpertemperatur selbst zu regulieren.

Energiehaushalt (Seite 13)

- **1** Die Energieaufnahme erfolgt über die Nahrung. In den Mitochondrien wird ATP als energetisch nutzbarer Stoff bereitgestellt. Die Hydrolyse von ATP liefert die Energie für alle lebenswichtigen Vorgänge, wie z.B. Wachstum, Bewegung, Biosynthese, zum Stofftransport und zur Thermoregulation. Ein Teil der potenziell nutzbaren Energie wird jedoch häufig ungenutzt über die Exkremente wieder abgegeben.
- **2** Die Stoffwechselintensität lässt sich indirekt durch den Stoffumsatz bestimmen. Bei der Zellatmung wird Sauerstoff aufgenommen und Kohlenstoffdioxid abgegeben, um in den Mitochondrien Wasserstoff zu oxidieren, der von den Reduktionsäquivalenten, aus der Glykolyse und dem Citronensäurezyklus stammt. Somit kann aus der Messung des Sauerstoffverbrauchs auf den Energieumsatz geschlossen werden.
- **3** Der Elefant würde bei einem Energieumsatz proportional zu dem einer Maus innerhalb kürzester Zeit an Überhitzung sterben, da bei der Zellatmung viel zu viel Wärme produziert werden würde.
- **4** Abb. 3: Nach der Nahrungsaufnahme steigt der Sauerstoffverbrauch zunächst rapide an. Je mehr Nahrung eine Scholle zu sich nimmt, desto länger dauert die Phase des erhöhten Sauerstoffverbrauchs. Dies ist damit zu erklären, dass auch für die Verdauungsprozesse Energie aufgewendet werden muss: Die aufgenommene Nahrung muss durch Muskelarbeit durch den Darm transportiert werden. Ein weiterer Energieaufwand ist notwendig, um enzymatisch Kohlenhydrate zu zerkleinern, die Peptidbindungen der Proteine zu trennen und die Esterbindungen der Lipide zu lösen. Anschließend muss Energie für die Resorption aufgewendet werden, da viele Transportprozesse aktiv unter ATP-Verbrauch ablaufen.

Abb. 4: Einzeller, Poikilotherme und Homoiotherme zeigen innerhalb der Gruppen eine Erhöhung der Stoffwechselrate bei zunehmender Größe. Den niedrigsten Energieumsatz zeigen Einzeller. Selbst bei gleicher Masse wie bei einem poikilothermen Vielzeller ist der Energieumsatz geringer. Die Oberfläche (Ort der Wärmeabgabe) kann somit nicht allein ausschlaggebend für die höhere Stoffwechselrate sein. Viele Prozesse sind von inneren Strukturen abhängig. Die Vergrößerung der inneren Oberfläche (z. B. bei den Zellmembranen) begünstigt beispielsweise Diffusionsvorgänge. Die Anzahl der Mitochondrien beeinflusst ebenfalls die Stoffwechselrate, da mehr Energie bereitgestellt werden kann. Vielzellige Organismen haben dadurch einen beschleunigten Stoffwechsel.

Die Lachswanderung aus Stoffwechselferspektive (Seite 14)

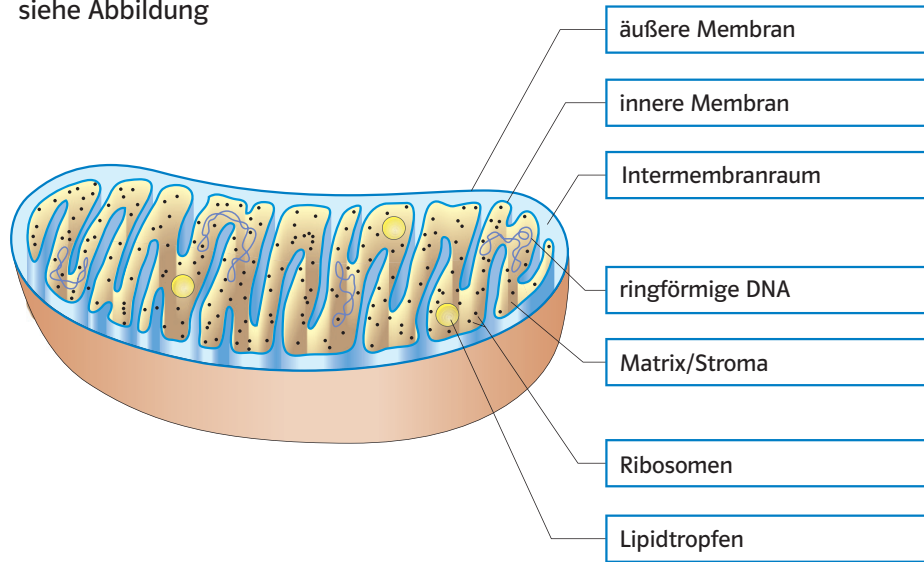
- **1** Die Lachse legen eine weite Strecke zurück. Für die Fortbewegung müssen die Muskelzellen viel ATP produzieren. Im Verlauf der Wanderung schwimmen die Fische gegen die Strömung. Dabei müssen sie zahlreiche Hindernisse überwinden, wie z. B. Stromschnellen oder Wasserfälle. Diese Prozesse erfordern einen besonders hohen Energieaufwand.
- **2** Der Lachs verbraucht im ersten Stadium seine Fettreserven und setzt Lipide um. Im zweiten Stadium werden für die Energiebereitstellung Proteine zerlegt. Für den Laichvorgang wird die letzte Reserve, das Glykogen im Stoffwechsel, umgesetzt.
- **3** Im Meer besitzen die Fische ein helleres Muskelgewebe, durchzogen von Fettgewebe, das sich aus Roter Muskulatur und Weißer Muskulatur zusammensetzt. Während der Laichwanderung werden erst die Fettreserven verbraucht, sodass das Fischfleisch ohne die eingelagerten Fettreserven dunkler erscheint. Im Verlauf der Wanderung (Stadium 2) wird körpereigene Muskulatur zersetzt und in Form von Proteinen verstoffwechselt. Fett und die Weiße Muskulatur verschwinden langsam, das Muskelgewebe erscheint dunkelrot.

Resorption im Dünndarm (Seite 15)

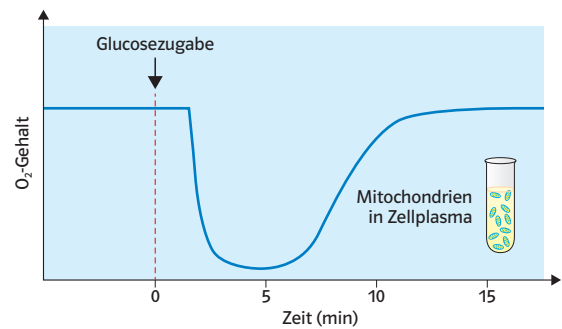
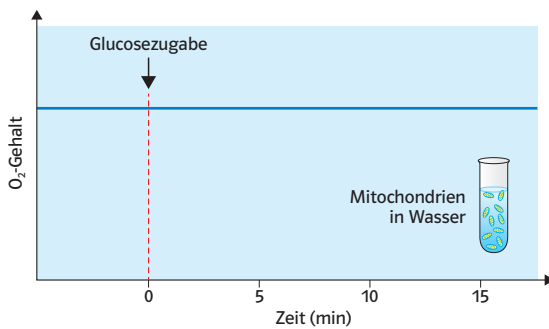
- **1** Je größer die Oberfläche ist, desto mehr Diffusionsvorgänge finden statt. Somit wird vor allem durch die Oberflächenvergrößerung, die die Mikrovilli hervorrufen, eine starke Erhöhung der Diffusion erzielt, da die Kontaktfläche auf ca. 200 m² vergrößert ist. Der Konzentrationsunterschied wird im Dünndarmbereich durch zwei Vorgänge stets auf hohem Niveau gehalten. Erstens führen die Darmkontraktionen stets neuen Darminhalt, der eine hohe Konzentration der diffundierenden Stoffe enthält, an die Darmwand heran. Außerdem transportiert das Blut aufgenommene Nährstoffbausteine ständig aus der Darmregion ab und hält so deren Konzentration niedrig.
- **2** Der Transport des Darminhalts erfolgt durch peristaltische Bewegungen. Der Ringmuskulatur kontrahiert wellenförmig in Richtung Darmausgang. Die Ringmuskulatur bewirkt durch die Segmentationsbewegung die Weiterleitung und eine Durchmischung des Darminhalts. Die abwechselnde Kontraktion der Längsmuskulatur führt zur Pendelbewegung. Hierdurch wird eine Längsverschiebung der Darmwand gegen den Darminhalt erzeugt, sodass die Darmzotten immer wieder in Kontakt mit resorbierbaren Stoffen kommen.

Orte der Zellatmung (Seite 16)

- 1 siehe Abbildung



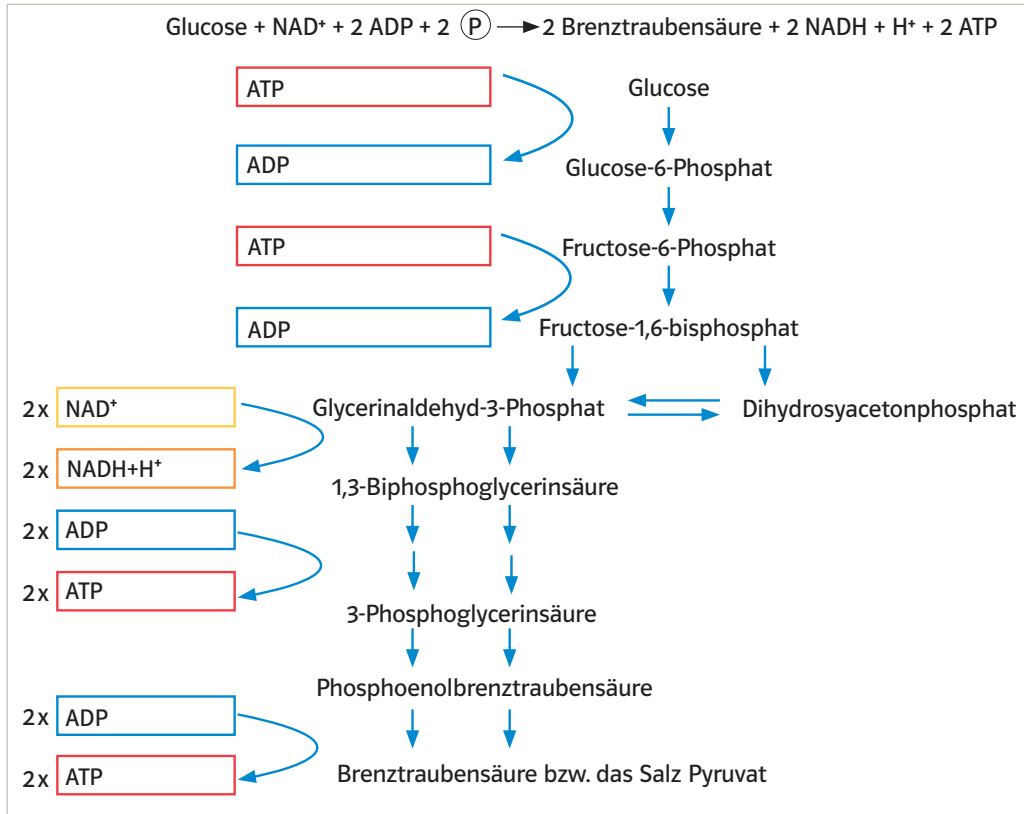
- 2 Mögliche Fragestellung: Läuft die Zellatmung vollständig in den Mitochondrien ab?
- 3 siehe Abbildung



Für die Zellatmung wird Sauerstoff benötigt. Im ersten Versuch findet keine Zellatmung statt, da die Glucose nicht in Brenztraubensäure umgesetzt wird. Bei dem zweiten Versuch wird zusätzlich zu den Mitochondrien noch Zellplasma hinzugefügt. Da das Zellplasma der Ort der Glykolyse ist, läuft die Zellatmung ab. Somit sinkt auch der Sauerstoffgehalt der Lösung und die Kurve fällt.

Energiebilanz der Glykolyse (Seite 17)

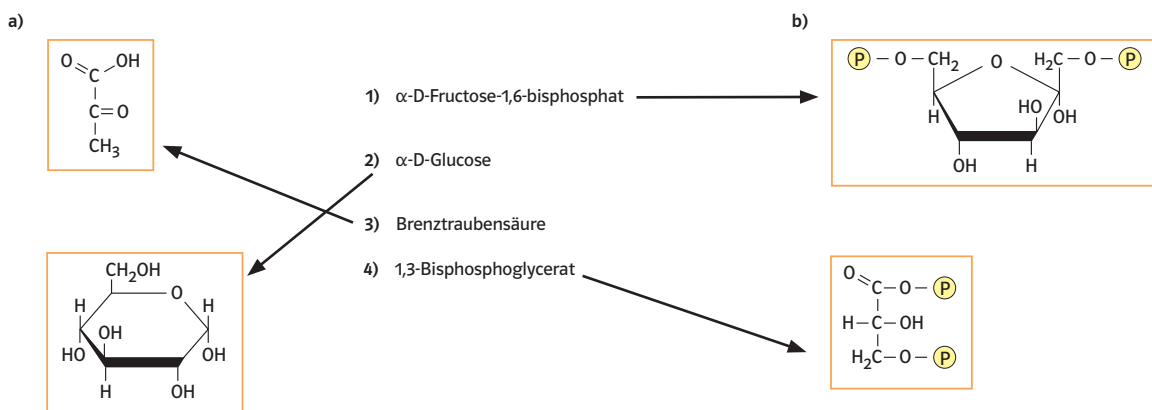
- 1 siehe Abbildung



- 2 Energiebilanz: Bei dem Abbau eines Moleküls Glucose zu Brenztraubensäure entstehen zwei Moleküle ATP und zwei Moleküle NADH + H⁺.

Glykolyse und Formen der Gärung (Seite 18)

- 1 siehe Abbildung



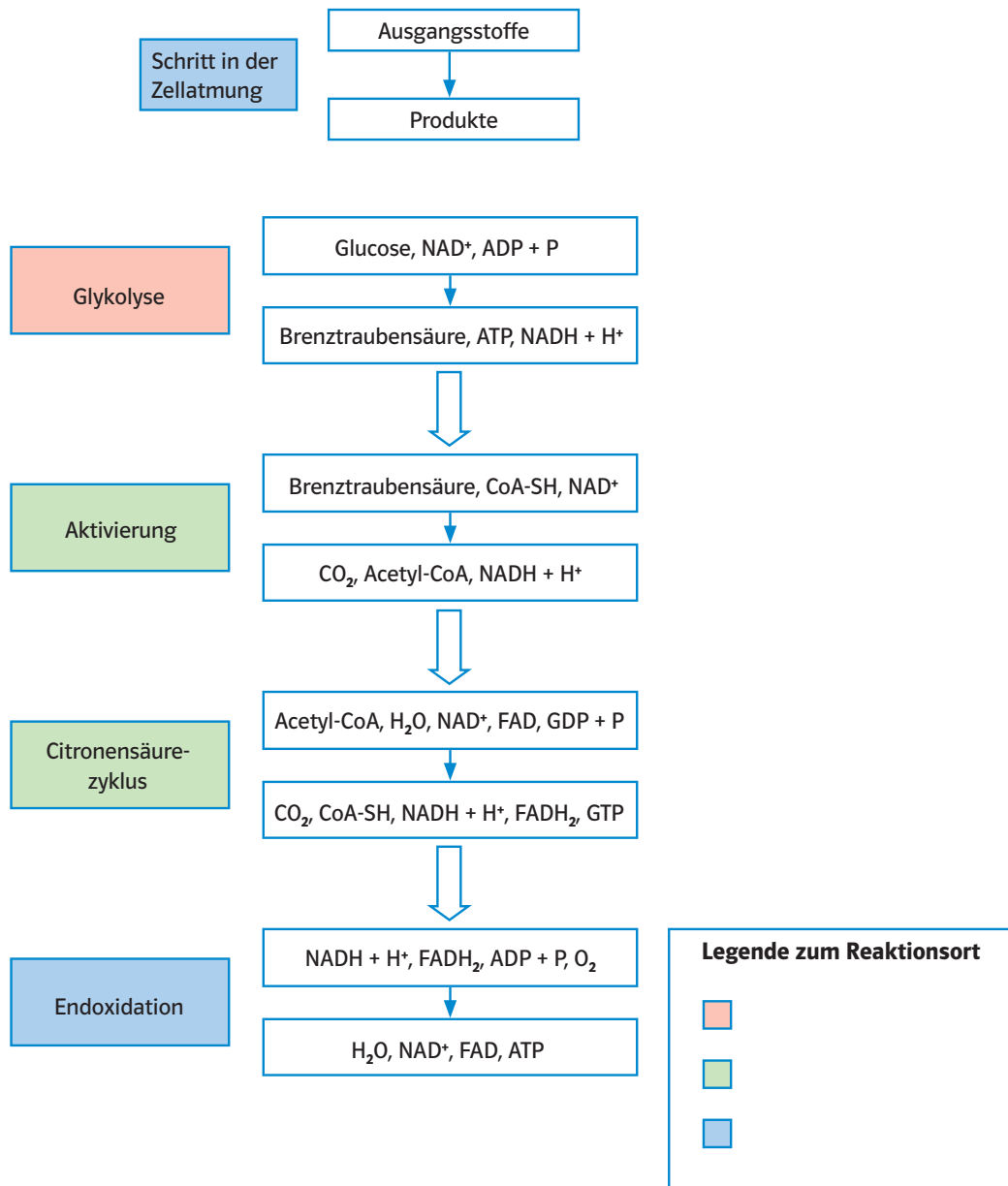
- 2 Einteilungsbeispiel siehe Tabelle

	Milchsäuregärung	alkoholische Gärung
Ausgangsstoff	Glucose bzw. Brenztraubensäure	Glucose bzw. Brenztraubensäure
CO ₂ -Abgabe	ja	nein
ATP-Bilanz	2 mol	2 mol
Wasserstoff-Akzeptor	Brenztraubensäure	Acetaldehyd
Endprodukt	Milchsäure	Ethanol

- **3** In der Atmungskette wird $\text{NADH} + \text{H}^+$ zu NAD^+ oxidiert. Wird plötzlich der Sauerstoff entzogen, läuft diese Reaktion jedoch nicht ab, sodass es kurzzeitig zur Anhäufung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ kommt. Beginnt die Gärung, wird $\text{NADH} + \text{H}^+$ wieder oxidiert und damit das angestaute $\text{NADH} + \text{H}^+$ wieder abgebaut.

Teilprozesse der Zellatmung (Seite 19)

- **1** siehe Abbildung



- **2** Die Glykolyse findet im Zellplasma statt, die Aktivierung sowie der Citronensäurezyklus in der Mitochondrienmatrix und Reaktionsort der Endoxidation ist die innere Mitochondrienmembran.

Energieversorgung und Low-Carb-Diät (Seite 20)

- **1** 1: Acetyl-CoA überträgt seine Acetylgruppe (C_2 -Körper) auf Oxalessigsäure.
2: Citronensäure wird zu Isocitronensäure umgewandelt.
3: Bei der Oxidation von Isocitronensäure wird NAD^+ zu $NADH + H^+$ reduziert. Kohlenstoffdioxid wird abgespalten (decarboxyliert).
4: Kohlenstoffdioxid wird abgespalten. NAD^+ wird reduziert. Das Coenzym A wird angeknüpft.
5: Der CoA-Rest wird durch einen Phosphorsäurerest ersetzt. Dieser wird auf GDP übertragen.
6: FAD wird zu $FADH_2$ reduziert.
7: Es erfolgt eine Anlagerung von Wasser. Durch die Umlagerung entsteht Äpfelsäure.
8: Äpfelsäure wird oxidiert. NAD^+ wird zu $NADH + H^+$ reduziert.
- **2** Mehrfach auftretende Reaktionsschritte sind die Übertragung von Wasserstoff auf NAD^+ , die Addition von Wasser und die Abspaltung von Kohlenstoffdioxid.
- **3** Durch Desaminierung entstehen aus Aminosäuren organische Säuren, die auch im Citronensäurezyklus vorkommen und bei Reaktionen mit Wasserstoffempfängern Reduktionsäquivalente ergeben. Somit können sie zur ATP-Bildung und damit zur Energieversorgung beitragen, indem sie in den Zyklus eingebracht werden.
- **4** Besteht die Ernährung hauptsächlich aus Proteinen, werden hohe Anforderungen an die Entgiftungsleistung der Leber gestellt. Vor allem bei vorgeschädigter Leber kann es zur Überforderung mit entsprechenden Beeinträchtigungen kommen, da Ammoniak als Zellgift wirkt.

Stoffwechselprozesse bei der Erzeugung von Licht (Seite 21)

- **1** Leuchtkäfer nutzen das Licht als Kommunikationsmittel. Durch das Blinken erkennen sich Männchen und Weibchen einer Art und finden zueinander. Bestimmte Weibchen imitieren das Blinken, um Männchen anderer Arten anzulocken und sie dann zu fressen.
- **2** Da in Ansatz 1 Zellplasma und Mitochondrien fehlen, kann keine Zellatmung stattfinden. Für die leichte Lichtintensität sorgt das bereits vorhandene ATP. Die Reaktion stoppt, sobald ATP verbraucht ist.
Im Gegensatz dazu wird in Ansatz 2 stetig neues ATP erzeugt, sodass eine große Leuchtkraft entsteht. Es wird deutlich, dass für die Reaktion Zellplasma, Mitochondrien, Luciferin und Luciferase nötig sind.
Im Ansatz 3 befindet sich Zellplasma. Durch Glykolyse kann im geringen Maße ATP synthetisiert werden, sodass hier nur eine geringe Lichtintensität auftritt.
In dem Ansatz 4 sind zwar Mitochondrien, jedoch fehlt Zellplasma. Da keine Glykolyse stattfinden kann, fehlen der Atmungskette in den Mitochondrien die Ausgangsstoffe, um ATP zu produzieren. Es findet kaum Lichtreaktion statt, nur das bereits vorhandene ATP kann genutzt werden.

- **3** Die Nachbarzellen der Fotocyten geben Sauerstoff ab, sodass in den Mitochondrien der Fotocyten ATP produziert werden kann. Das Enzym Luciferase wandelt nun unter ATP-Verbrauch Luciferin zu dem Zwischenprodukt 1 um. Das Zwischenprodukt 1 wird dann von Sauerstoff oxidiert. Wird der Sauerstoff von der Atmungskette verbraucht, bricht die Reaktion an dieser Stelle ab. Gibt die Nachbarzelle Stickstoffmonooxid an die Fotocyten ab, wird die Atmungskette in den Mitochondrien reversibel blockiert. Gelangt nun wiederum Sauerstoff zu den Peroxisomen, wird das Zwischenprodukt 2 zum Zwischenprodukt 3 umgewandelt. Licht wird abgegeben und es entsteht das Endprodukt. Durch das Licht wird die Wirkung des Stickstoffmonooxids blockiert, die Prozesse der Atmungskette laufen wieder ab und es wird neues ATP synthetisiert. Nun wird der Sauerstoff verbraucht, sodass das Zwischenprodukt 1 nicht mehr oxidiert werden kann und kein Licht mehr entsteht.

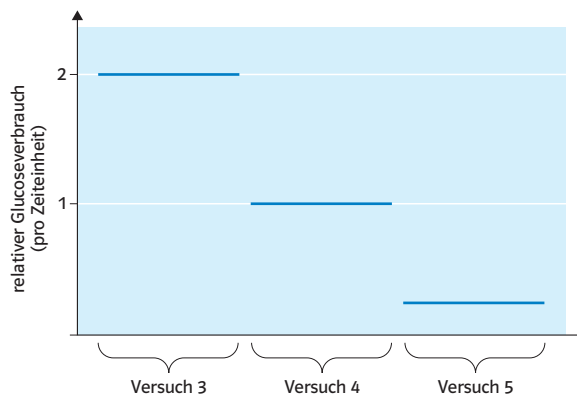
Giftmord durch Eingriffe in die Atmungskette (Seite 22)

- **1** Der Tod muss zwischen 12.00 und 12:30 Uhr eingetreten sein. Da nach dem Ableben durch die Zellatmung keine Wärme mehr produziert wird, kühlt der Körper bis zum Erreichen der Umgebungstemperatur ab.
- **2** Vor Eintritt der Totenstarre liegen Actin- und Myosinfilamente in den Muskelfasern noch getrennt voneinander vor. Solange genügend ATP vorhanden ist, kann dieser Zustand aufrechterhalten werden. Sobald die Zellatmung kein ATP mehr produziert, werden keine Calcium-Ionen mehr zurückgepumpt, die Myosinköpfechen binden an den Actinfilamenten. Sie lassen sich aufgrund des Mangels an ATP nicht mehr lösen, die Totenstarre tritt ein.
- **3** Da die Cytochrom-c-Oxidase durch das Gift irreversibel gehemmt wird, können Elektronen, die durch den Abbau organischer Substanzen gewonnen werden, nicht mehr auf den Sauerstoff als Endakzeptor übertragen werden. Die Atmungskette wird an dieser Stelle blockiert, sodass keine Energie mithilfe von ATP mehr bereitgestellt werden kann.
- **4** Dem Hämoglobin des Blutes wird kein Sauerstoff mehr entzogen, da die Cytochrom-c-Oxidase gehemmt wird. Der Sauerstoff verbleibt im Blut. Sauerstoffreiches Blut erscheint heller als sauerstoffarmes, somit erscheint die Gesichtsfarbe rosig.

Stoffwechselprozesse in einem abgeschlossenen System (Seite 23)

- **1** Versuch 1: Da die Pflanzen Fotosynthese betreiben und dabei Sauerstoff abgeben sowie Kohlenstoffdioxid verbrauchen, steht ihnen gleichzeitig genügend Sauerstoff für die Zellatmung zur Verfügung. Bei der Zellatmung wiederum wird Kohlenstoffdioxid abgegeben und Sauerstoff benötigt. Daher wird dieses Mikro-Ökosystem einige Zeit bestehen. Da die Pflanze auch wächst, sinkt durch die Kohlenstoffdioxid-Fixierung langsam die Fotosyntheserate.
Versuch 2: Die Pflanzen produzieren bei der Fotosynthese Sauerstoff, den die Schnecken zur Zellatmung benötigen. Das Kohlenstoffdioxid, das von der Schnecke abgegeben wird, wird durch die Pflanze bei der Fotosynthese aufgenommen. Dieses Mini-Ökosystem sollte einen längeren Bestand haben, es sei denn, die Schnecke übt einen zu großen Fraßdruck aus.

- **2** Bedingungen der Versuche 3, 4 und 5 sollten einen positiven Einfluss auf das Wachstum der Pflanzen haben, da Kohlenstoffdioxid produziert wird, das die Pflanzen für die Photosynthese benötigen (ähnlich einer CO_2 -Düngung). Von dauerhaftem Bestand ist jedoch keine Versuchs-Konstellation, da früher oder später das Substrat der Hefezellen (Glucose-Lösung) aufgebraucht wird. In Versuch 4 sterben die Hefezellen vorzeitig ab. Die Pflanzen allerdings sind weiterhin einige Zeit durch Kohlenstoffdioxid freisetzende Mikroorganismen im Boden lebensfähig (siehe Versuch 1).
- **3** siehe Abbildung



Versuch 3: Unter anaeroben Verhältnissen betreiben die Hefezellen Gärung. Die Energieausbeute beim anaeroben Abbau ist wesentlich geringer als beim aeroben Abbau. Dies bedingt einen höheren Glucoseverbrauch.

Versuch 4: Durch die hohe Glucose-Konzentration der Lösung wird in relativ kurzer Zeit viel Ethanol produziert. Alkohol ist ein Zellgift, sodass die Hefezellen ab einer bestimmten Alkoholkonzentration absterben.

Versuch 5: Da den Hefezellen genügend Sauerstoff zur Verfügung steht, betreiben die Zellen Zellatmung. Die Energieausbeute ist beim aeroben Abbau wesentlich höher als beim anaeroben Abbau. Dies bedingt einen geringeren Glucoseverbrauch pro Zeiteinheit.

Wärmefreisetzung im Braunen Fettgewebe (Seite 24)

- **1** Durch die Stoffwechselaktivität halten die Fettschwanzmakis eine relativ konstante Körpertemperatur von 37°C . Die Körpertemperatur der Tiere ist nachts etwas höher, da es zu dieser Zeit aktiv ist. Während des Winterschlafs folgt die Kurve der Körpertemperatur leicht verzögert der Kurve der Außentemperatur. Die Stoffwechselaktivität des Mausmakis ist zu dieser Zeit stark „heruntergefahren“, sodass kaum Wärme freigesetzt wird.
- **2** Die Körpertemperatur des Makis ist während der Versuchsdauer bis auf eine Ausnahme konstant. Sie liegt bei ca. 23°C , entspricht also der Umgebungstemperatur. Der Sauerstoffverbrauch verläuft ebenfalls konstant, steigt allerdings nach drei Tagen, ähnlich dem Verlauf der Körpertemperatur, kurzzeitig an. Zum Zeitpunkt des Anstiegs werden die gebildeten Fettsäuren zur Reduktion von NAD^+ zu $\text{NADH} + \text{H}^+$ genutzt. Die frei werdenden Elektronen durchlaufen die Atmungskette und werden schließlich auf Sauerstoff übertragen. Somit lässt sich der steigende Sauerstoffbedarf erklären. Wasserstoff-Ionen-Pumpen erzeugen einen Konzentrationsunterschied,

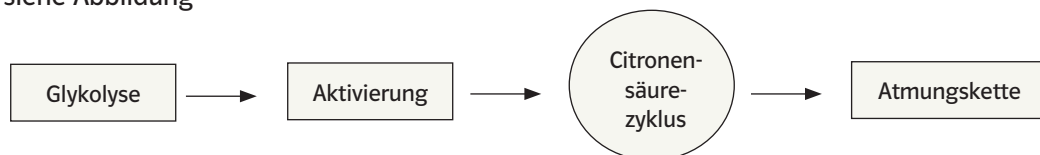
der normalerweise zur ATP-Synthese genutzt wird. Im vorliegenden Fall aktivieren aber Fettsäuren die UCP-1-Kanäle, durch die die Wasserstoff-Ionen bevorzugt diffundieren, ohne dass ATP gebildet wird. Durch diese Entkopplung wird Wärme freigesetzt.

Energiebedarf bei der Jagd (Seite 25)

- 1 Zu Beginn der Jagd wird der Vorrat an ATP innerhalb der Muskelfaser ebenso wie der Vorrat an Kreatinphosphat aufgebraucht. Die Versorgung der Zellen mit Sauerstoff reicht jedoch im weiteren Verlauf für den aeroben Abbau der Glucose nicht mehr aus. In der Glykolyse wird nun Glucose bis zur Brenztraubensäure abgebaut und anschließend zu Milchsäure umgewandelt (Milchsäuregärung). Die Sauerstoffaufnahme steigt dabei sehr stark an und erreicht ab einem bestimmten Zeitpunkt eine gleichbleibende Höhe. Der Sauerstoffbedarf liegt ab diesem Punkt also höher als das Aufnahmevermögen. Die Stoffwechselleistung kann demnach nur so lange auf gleicher Höhe gehalten werden, wie die Muskulatur aerob arbeiten kann.
- 2 ATP-Produktion durch Glykolyse erfolgt viel schneller als ATP-Produktion der Mitochondrien, sodass die Muskulatur schneller die benötigte ATP-Menge erhält. Der Nachteil liegt darin, dass die Glykolyse nicht so effizient abläuft, da die Glucose nur bis zur Milchsäure oxidiert wird und der Vorgang nur für kurze Zeit andauern kann, da eine hohe Milchsäure-Konzentration sonst zu Gewebeschäden führen kann.
- 3 Nach der Jagd wird vermehrt Sauerstoff aufgenommen, da die Sauerstoffschuld vom Beginn der Jagd ausgeglichen werden muss. Milchsäure wird nun wieder zu Brenztraubensäure oxidiert bzw. zu Glykogen resynthetisiert. Zunächst findet ein Abbau der Milchsäure statt. Dies kann in den Muskelfasern selbst oder in den Leberzellen stattfinden. Glucose wird neu gebildet und dann in die Blutbahn abgegeben, sodass der Blutzuckerspiegel wieder dem des Ruhewertes entspricht. Weiterhin erfolgt eine Neusynthese von Kreatinphosphat bzw. ATP in der Muskelzelle selbst.

Energiegewinnung in der Muskelfaser (Seite 26)

- 1 siehe Abbildung



- 2 In der Muskelzelle wird Glykogen zunächst durch Hydrolyse in Glucose zerlegt. Die Glucose kann anschließend aerob oder anaerob weiter abgebaut werden. Hierbei werden zunächst zwei Moleküle ATP pro Glucosemolekül in der Glykolyse frei. Steht nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung, wird die Brenztraubensäure weiter zur Milchsäure abgebaut. Ist Sauerstoff vorhanden, wird der Citronensäurezyklus und die Atmungskette durchlaufen, wobei die Glucose letztendlich vollständig zu Wasser und Kohlenstoffdioxid abgebaut wird. Durch den Citronensäurezyklus werden dabei zwei Moleküle ATP synthetisiert, durch die Atmungskette werden 34 Moleküle ATP für die Muskelkontraktion bereitgestellt. Kreatinphosphat kann aber auch direkt durch die Kreatinkinase eine Phosphatgruppe auf ADP übertragen.

- **3** Zunächst wird das noch vorhandene ATP der Zelle zur Muskelkontraktion genutzt. Anschließend sorgt Kreatinphosphat kurzzeitig für die Bereitstellung weiterer ATP-Moleküle. Da bei einem Langstreckenlauf über einen längeren Zeitraum ATP für die Muskelkontraktion bereitgestellt werden muss, ist anzunehmen, dass im weiteren Verlauf vorwiegend der aerobe Weg zur Energiebereitstellung genutzt wird. Dieser Prozess nimmt zwar mehr Zeit in Anspruch, ist aber in der Energieausbeute effektiver. Für einen Sprint von bis zu 1 ½ min, bei dem kurzfristig Energie bereitgestellt werden muss, sollte der anaerobe Abbauweg vornehmlich zum Einsatz kommen, da hier in relativ kurzer Zeit ATP bereitgestellt werden kann.

Trainingsauswirkungen (Seite 27)

- **1** Person 1 ist eine untrainierte Person, da die Milchsäurewerte schneller ansteigen. Person 2 steht für die Stoffwechselreaktionen mehr Sauerstoff zur Verfügung, da die Muskelfasern durch dichtere und quer vernetzende Blutkapillaren besser durchblutet werden. Somit befindet sich bei Person 2 weniger Milchsäure im Muskel.
- **2** Wird der Stoffwechsel über einen bestimmten Wert hinaus erhöht, sinkt der pH-Wert im Muskel ab, da sich Milchsäure ansammelt. Milchsäure entsteht bei dem anaeroben Abbau von Glucose. Der Sauerstofftransport ist ab diesem Zeitpunkt gleichbleibend, wie auch die Durchblutung. Somit wirkt der Sauerstofftransport bzw. die Sauerstoffabgabe als begrenzender Faktor und damit das Herz-Kreislaufsystem. Sind mehr Blutkapillaren vorhanden, sollte der Blutfluss langsamer laufen, sodass für den Stofftransport (Diffusion von Sauerstoff) mehr Zeit bleibt. Die Membranoberflächen sind größer und die Diffusionswege vom Sauerstoff sind kürzer. Der Muskel wird also besser mit Sauerstoff und mit Nährstoffen versorgt. Wenn der Anteil an Roter Muskulatur hoch ist, ist auch die Anzahl der Mitochondrien hoch. Dadurch kann mehr ATP durch Zellatmung bereitgestellt werden.
- **3** siehe Tabelle

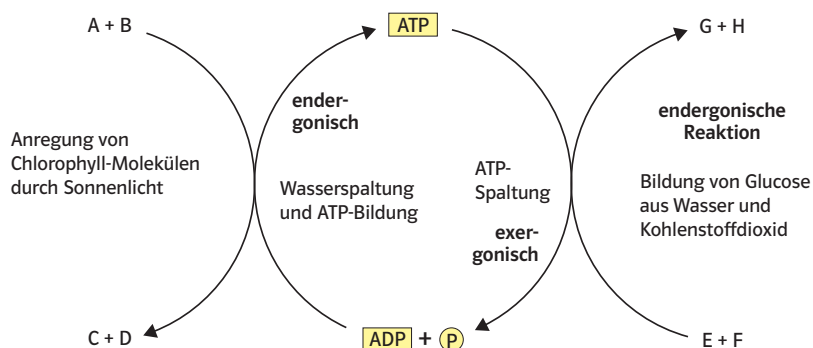
	Rote Muskelfaser	Weißer Muskelfaser
eher wenige Mitochondrien		x
viele Mitochondrien	x	
schnell kontrahierend		x
langsam kontrahierend	x	
geringere Kraftentwicklung	x	
hohe Kraftentwicklung		x
Ermüdbarkeit gering	x	
Ermüdbarkeit schnell		x
viele Enzyme zur anaeroben Energiebereitstellung		x
viele Enzyme zur aeroben Energiebereitstellung	x	

Fructoseintoleranz (Seite 28)

- **1** Glucose: Die Glucosemoleküle werden zusammen mit Natrium-Ionen durch die SGLT-1-Carrier aus dem Darmlumen in die Darmzellen transportiert. Dabei müssen die Glucosemoleküle entgegen dem Konzentrationsunterschied transportiert werden. Die Natrium-Ionen diffundieren dagegen entlang des Konzentrationsgefälles. Der Glucose-transport erfolgt als Symport. Die Natrium-Ionen müssen entgegen dem Konzentrationsunterschied unter Energieaufwand aus der Zelle des Darmepithels gepumpt werden, damit der Glucosetransport aufrechterhalten werden kann. Es handelt sich also um einen aktiven Transport, der ATP benötigt.
Fructose: Beim Fructosetransport handelt es sich um eine erleichterte Diffusion, da die Konzentration innerhalb der Zelle geringer ist als im Darmlumen. Die Fructosemoleküle diffundieren ohne Energieaufwand durch den GLUT 5-Carrier.
- **2** Da größere Mengen an Fructose vom Dünndarm nicht resorbiert werden, wird die Fructose von Darmbakterien anaerob zersetzt. Die Endprodukte dieser Abbauprozesse führen zu Symptomen, wie z. B. Blähungen.
- **3** Die Aldolase B spaltet Fructose-1-Phosphat in Dihydroxyacetonphosphat und Glycerinaldehyd. Bei einem Enzymdefekt läuft dieser Schritt nicht ab. Fructose-1-Phosphat reichert sich an. Je mehr Fructose-1-Phosphat vorhanden ist, desto weniger Fructose wird von der Kethohexokinase umgesetzt (Abb. 3). Des Weiteren hemmt die Anreicherung von Fructose-1-Phosphat auch noch andere Enzyme im Stoffwechsel, sodass weder Glucose synthetisiert wird, noch die Glykolyse ablaufen kann (siehe Text). Als Ergebnis entsteht ein Mangel an Glucose und es kann nicht genügend ATP bereitgestellt werden.

Bau- und Energiestoffwechsel von Tieren und Pflanzen (Seite 29)

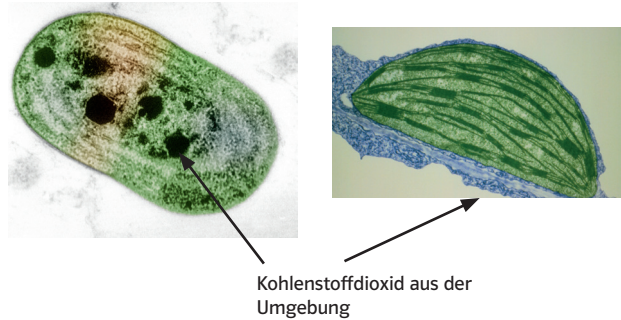
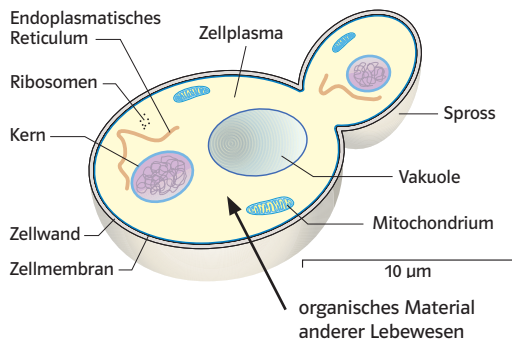
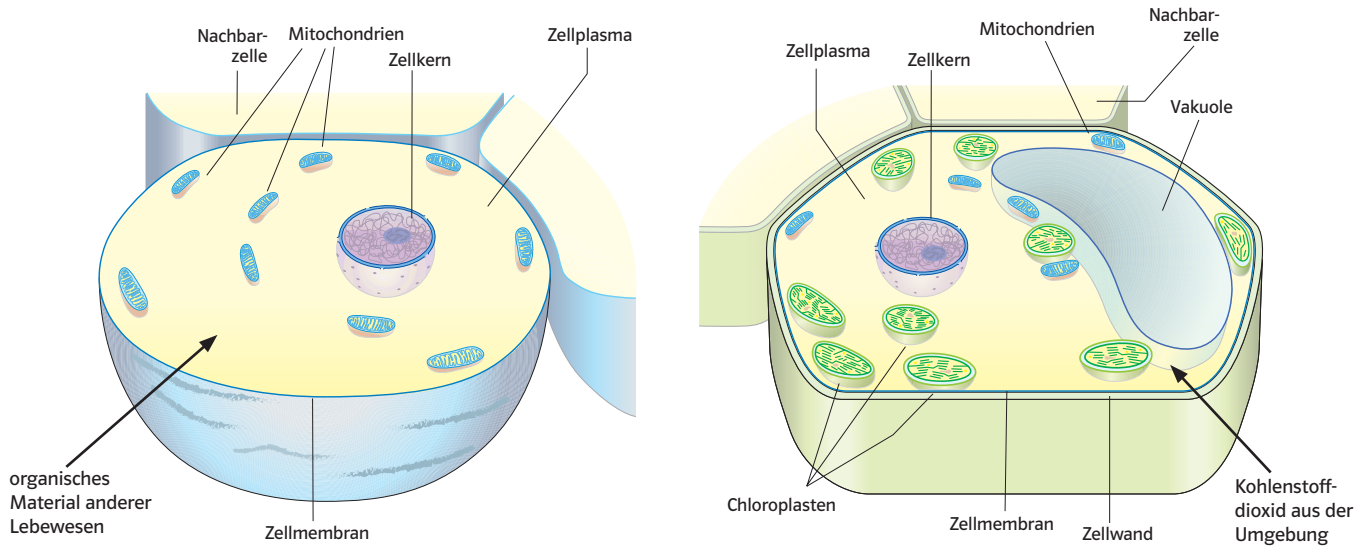
- **1** Mögliche Darstellungen sind die energetische Kopplung bei der Glucose-Produktion in der Fotosynthese (s. Abb.) oder die Fotosynthese als Ganzes gekoppelt mit den übrigen Lebensprozessen.



- **2** Nach heterotrophen und autotrophen Lebewesen zu unterscheiden, ist ökologisch sinnvoll, da das Leben auf der Erde auf der Biomasseproduktion autotropher Lebewesen beruht.
- **3** Mistelpflanzen sind einerseits autotroph, weil sie Fotosynthese betreiben. Andererseits sind sie heterotroph, weil sie zusätzlich Biomasse ihrer Wirtspflanzenart nutzen. Polypen von Korallen nutzen Nährstoffe von autotrophen, Fotosynthese betreibenden Algen, die in die Zellen aufgenommen wurden. Sie sind als tierische Lebewesen heterotroph.

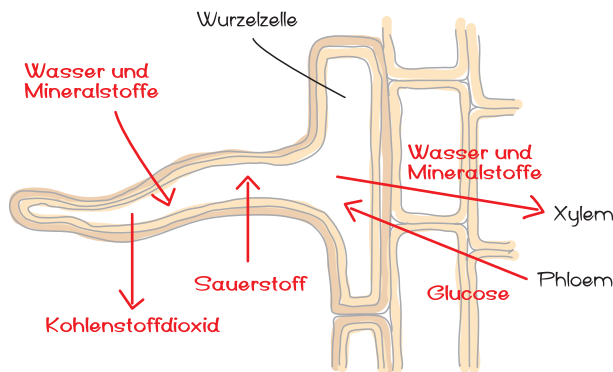
Bau- und Energiestoffwechsel auto- und heterotropher Zellen (Seite 30)

- 1 siehe Abbildung



- 2 Die Membranstapel, die sich innerhalb von Chloroplasten und den Zellen von Cyanobakterien befinden (Abb. 4), geben einen zellbiologischen Hinweis auf die Herkunft der Chloroplasten. Außerdem gibt es viele Übereinstimmungen im Stoffwechsel dieser autotrophen Lebewesen.

- 3 siehe Abbildung



- 4 Um mithilfe der Fotosynthese hergestelltes organisches Material (Glucose) zur Energiebereitstellung nutzen zu können, weisen pflanzliche Zellen Mitochondrien auf. Diese verbrauchen dabei Sauerstoff wie die Mitochondrien heterotropher Zellen.

Wasserhaushalt von Pflanzen (Seite 31)

- **1** Die Wurzel nimmt Wasser aus der Umgebung auf, es tritt in das Xylem und wird dort nach oben befördert. Im Bereich der Blätter tritt das Wasser in den Raum der Zellwände des Palisaden- und des Schwammgewebes. An der großen Grenzfläche dieses Gewebes zur Luft verdunstet Wasser, da die relative Luftfeuchtigkeit in der Umgebung meist geringer als 100% ist. Als Wasserdampf gelangt es über die Spaltöffnungen nach außen.
- **2** Das Wasserangebot ist im Zellwandbereich und in den Zellzwischenräumen meist höher als in der Außenluft. Zudem sorgt das Sonnenlicht für höhere Temperaturen im Bereich eines Blattes. Diese Konstellation bewirkt, dass Wasser im Schwammgewebe eines Blattes gasförmig wird und abgegeben wird. Dadurch entsteht im Xylem ein Unterdruck, der Transpirationssog befördert Wasser aus dem Wurzel- in den Blattbereich einer Pflanze.
- **3** Die Anziehungskraft zwischen Wassermolekülen (Kohäsion) und die Anziehung zwischen Wasser und Xylemwand (Adhäsion) wirken in der Wassersäule. Sie erreicht eine Höhe von mehr als 100 Metern. Durch den verdunstungsbedingten Sog wird die Schwerkraft überwunden. Die Wassersäule reißt bei großer Höhe, der Sog kann das Wasser nicht mehr nach oben transportieren.
- **4** Kohlenstoffdioxid wird in den Chloroplasten der Blätter bei der Fotosynthese verbraucht. Die Kohlenstoffdioxid-Konzentration ist dann in den Zellen eines Blattes niedriger als in der Außenluft. Deswegen gelangt Kohlenstoffdioxid durch die Spaltöffnungen durch Diffusion in ein Blatt.
- **5** Weil das Phloem rindennah liegt, das Xylem im Holz eines Stammes, geht die Schwellung auf den Transport von Zucker aus den grünen Blättern Richtung Wurzel zurück. Der Teil der Rinde unterhalb der Ringelung ist nicht geschwollen, weil im Phloem kein Druck nach oben wirkt.

Ferntransport von Fotosyntheseprodukten in Pflanzen (Seite 32)

- **1** Im ersten Jahr wird die Wurzelknolle als Speicher mit Glucoseüberschüssen aus den Blättern gefüllt. Im folgenden Frühjahr werden diese Vorräte hoch zur Sprossspitze transportiert und dort zur Knospen- bzw. Blattbildung genutzt.
- **2** Junge Blätter einer Kürbispflanze benötigen für ihr Wachstum nicht nur den durch Fotosynthese in ihren eigenen Chloroplasten erzeugten Zucker, vielmehr auch Zucker bereits ausgewachsener Blätter (an der intensiven Schwarzfärbung in Abb. 2 zu erkennen). Ausgewachsene Blätter sind Quellen von Zucker, an der weitgehend fehlenden Schwarzfärbung der größeren Blattspreite in Abb. 2 zu erkennen.
- **3** Die Radioaktivität nimmt zunächst in dem Wurzelgewebe zu, das sich in der linken Kammer befindet, weil Wurzeln Wasser zusammen mit darin gelösten Mineralstoffen aufnehmen. Radioaktiv markierte Stickstoffverbindungen werden durch das Gewebe auch in den rechten Teil der Wurzel gelangen und von dort in das Wasser der rechten Kammer, weil die Wurzel vor dem Versuch vom Stängel der Pflanze abgetrennt wurde.
- **4** In allen pflanzlichen Geweben, die lebende Zellen enthalten, würden radioaktiv markierte Stickstoffverbindungen nachzuweisen sein, weil lebende Zellen Wasser brauchen und zudem Stickstoff für die Proteinbiosynthese aufnehmen. Bei den markierten Zellen handelt es sich einerseits um grüne, Fotosynthese betreibende Zellen, andererseits um nicht grüne Zellen, z. B. der Wurzeln, des Stammes und der Zweige.

- **5** Werfen Bäume des Ahorns im Herbst ihre Blätter ab, haben sie zuvor die darin enthaltenen wieder verwertbaren Stoffe entnommen und in ihren Wurzeln zwischengespeichert. Im Frühjahr werden diese Stoffe mobilisiert und über das Xylem zusammen mit aufgenommenem Wasser hoch zu den Blattknospen befördert. Deren Zellen entnehmen die Stoffe dem Wasser, sie benötigen sie für das Wachstum.

Versuche zur Fotosynthese (Seite 33)

- **1** Im mittleren Versuch wird Wasser verwendet, dessen Kohlenstoffdioxid zuvor durch Abkochen ausgetrieben wurde. Die Pflanze stellt keinen Sauerstoff her, ohne Kohlenstoffdioxid findet keine Fotosynthese statt. Mithilfe des rechts dargestellten Versuchs, der Glimmspanprobe, kann nachgewiesen werden, dass grünes pflanzliches Gewebe mit Licht Sauerstoff produziert und teilweise abgibt.
- **2** Die mit blauer Folie abgeklebte Blattfläche erzeugt durch Lichtmangel keine bzw. sehr wenig Glucose in der Fotosynthese. Die Zellen leben von evtl. in den Zellen vorhandenen Stärkevorräten. Der Stärkenachweis ist nach einiger Zeit nur in den nicht abgeklebten Bereichen des Blattes positiv.
- **3** Ohne Licht würden In den Versuchen in Abb. 1 keine Luftblasen aufsteigen. Nach einem Stärkenachweis (Abb. 2) würden auf der Blattspreite keine Unterschiede zwischen abgeklebten und nicht abgeklebten Blattbereichen zu erkennen sein.

Untersuchungen an Chlorophyll-Lösungen (Seite 34)

- **1** Im oberen Teil des Schirms erkennt man alle Farben des Spektrums des sichtbaren Lichts. Unten erscheint grünes, gelbes und teilweise rotes Licht, blaues und rotes Licht fehlt dort jeweils teilweise.
- **2** Beim Zerreiben gelangt Lösungsmittel in die Zellen und Organellen, die beschädigt werden. Frei im Lösungsmittel vorhandene Chlorophyll-Moleküle können Licht absorbieren. Innermolekulare Anregungen von Elektronen können stattfinden, auch wenn nicht alle Komponenten für die Lichtreaktion entsprechend angeordnet vorliegen. Statt chemischer Energie wird Wärmeenergie frei, wenn das Chlorophyll in den Ausgangszustand zurückfällt.
- **3** Beim Vergleich der beiden Absorptionsspektren von Abbildung 4 fällt auf, dass die Alge *Navicula* keine „Grünlücke“ wie die Samenpflanze aufweist. Das Absorptionsspektrum von *Navicula* wird von mehreren Pigmenten verursacht, ähnlich dem der Samenpflanze. Der Unterschied entsteht dadurch, dass die Alge Pigmente enthält, die Licht derjenigen Wellenlänge verschlucken, die wir als grün empfinden.

Chromatographische Trennung von Fotosynthesepigmenten (Seite 35)

- **1** Durch die stationäre Trägerschicht steigt das Laufmittel als flüssige Phase auf. Dabei reißt es Moleküle aus der Probe mit, die aufgrund der eigenen Größe, Masse und Form unterschiedlich gut durch die Lücken im Trägermaterial passen und mit diesen evtl. auch bremsende Wechselwirkungen haben kann. Dadurch bewegen sich die verschiedenen Molekülsorten aus der Probe unterschiedlich schnell im Laufmittelstrom mit, Moleküle des gleichen Stoffes aber gleich schnell. Dadurch sammeln sich gleiche Moleküle aus der Probe in unterschiedlichen Banden.
- **2** R_f -Werte der Pigmente in Abb. 2:

β -Carotin	0,88
Pheophytin	0,43
Chlorophyll a	0,41
Chlorophyll b	0,29
Lutein	0,26
Neoxanthin	0,11
- **3** Fotosynthese-Pigmente erscheinen uns verschiedenfarbig, weil sie verschiedene Wellenlängen des für uns sichtbaren Lichtes absorbieren, die für die Fotosynthese genutzt werden können. Die unterschiedlichen Absorptionsspektren, die bei den verschiedenen Fotosynthesepigmenten experimentell nachgewiesen werden, bedeuten biologisch, dass ein breiteres Spektrum an Wellenlängen energetisch für die Fotosynthese nutzbar ist.
- **4** Die Umfärbung von Blättern im Herbst erfolgt überwiegend dadurch, dass sich die Konzentrationen der unterschiedlichen Pigmente verändern. Je nach den Anteilen ergeben sich die verschiedenen Farben.

Blaues und rotes Licht starten die Fotosynthese in Chloroplasten (Seite 36)

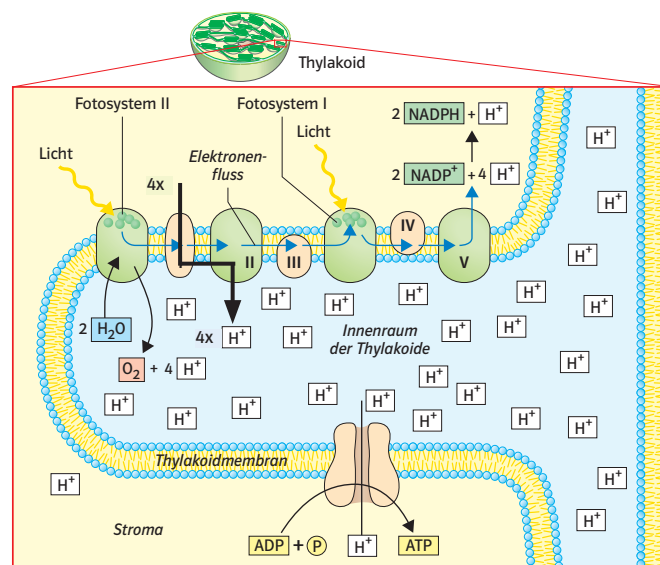
- **1** Licht regt das Fotosystem an, dadurch wird ein Elektron an einen Akzeptor abgegeben (Oxidation). Das Fotosystem erhält Elektronen aus einem Wassermolekül (Reduktion). Dabei entsteht erst atomarer und daraus dann molekularer Sauerstoff.
- **2** Wird das Chlorophyll des Fotosystems I durch Licht angeregt, befördert es Elektronen, die das Chlorophyll P 700 von der Elektronentransportkette übernimmt, auf ein höheres Energieniveau. Von diesem Niveau aus können die Elektronen auf das Molekül NADP^+ übertragen werden, das durch Elektronenaufnahme reduziert wird und durch Anlagerung von H^+ in $\text{NADPH} + \text{H}^+$ umgewandelt wird.
- **3** Die Höhendifferenz im Brunnenmodell entspricht dem Energieniveau-Unterschied bei den Zuständen der Elektronen während der Fotoreaktion. Im Brunnenmodell gelingt durch die beiden Stufen der Aushub, bei der Fotosynthese durch die beiden Aktivierungen von Fotosystemen die Übertragung von Elektronen aus dem Wasser auf das NADP^+ .

Zwei Fotosysteme wirken zusammen: Emmerson-Effekt (Seite 37)

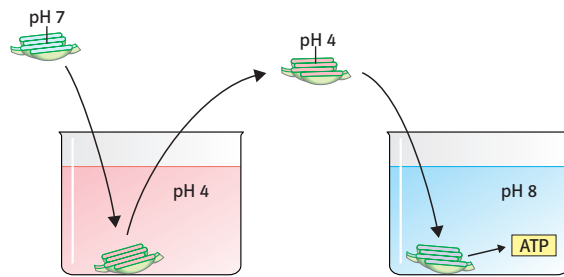
- 1 Bei der getrennten Bestrahlung mit den beiden Wellenlängen 680 und 700 nm tritt etwa die gleiche Fotosyntheserate auf. Bestrahlt man mit beiden Wellenlängen gleichzeitig, so steigt die Fotosyntheserate auf mehr als das Doppelte an.
- 2 Durch die doppelte Anregung werden beide Fotosysteme aktiviert, die zusammen zu einer effektiveren Bildung von Reduktionsäquivalenten führen (s. Abb. 2)
- 3 Für Bakterien mit anoxygener Fotosynthese reicht ein Fotosystem aus, weil Elektronendonatoren mit weniger Energie oxidiert werden können. Dazu reicht die Energie aus einmaliger Lichtanregung eines Fotosystems. Cyanobakterien nutzen wie Chloroplasten Wasser als Elektronendonator.
- 4 Da in den Blättern ständig die Zellatmung abläuft, aber in Abhängigkeit von der Intensität und Wellenlänge des eingestrahlten Lichts unterschiedlich stark die Fotosynthese, erhält man einen Kurvenverlauf, der teilweise auch unterhalb der 0-Linie verlaufen kann.

Die Produkte der Fotoreaktion (Seite 38)

- 1 siehe Abbildung; im Innenraum der Thylakoide kommt es durch Belichtung zu einer Erhöhung der Wasserstoff-Ionen-Konzentration, also zu einem Sinken des pH-Wertes.



- 2 Das Enzym ATP-Synthase befindet sich in der Membran der Thylakoide. Über dieses Tunnelprotein fließen Wasserstoff-Ionen (H^+) aus dem Thylakoid-Innenraum in das Stroma der Chloroplasten ab. Die in dem Konzentrationsgefälle gespeicherte chemiosmotische Energie wird von der Synthase genutzt, um die energiebedürftige (endergone) Synthese von ATP aus ADP und Phosphat anzutreiben.
- 3 Durch experimentelle Ansäuerung des Innenraums aus Chloroplasten heraus isolierten Thylakoiden entsteht ein Wasserstoff-Ionenkonzentrationsunterschied, wenn die Thylakoide in eine alkalische Flüssigkeit ($pH=8$) überführt werden. Ähnlich wie solche getrennten Ladungsträger von einer Batterie energetisch genutzt werden, wenn es zu einem Fluss von Ladungsträgern kommt, nutzen Chloroplasten sie mithilfe des Tunnelproteins ATP-Synthase zur Synthese von ATP. Über dieses Protein fließen die Wasserstoff-Ionen in den Außenraum ab, die frei werdende Energie wird zur Synthese von ATP aus ADP und Phosphat genutzt (siehe Abbildung).



- 4 Im Licht nehmen Thylakoide über ihre Membran Wasserstoff-Ionen auf. Diesen Prozess bezeichnete JAGENDORF metaphorisch als „Fressen von Säure“. Möglicherweise tat er dies nicht nur, weil sich Thylakoide im Licht Wasserstoff-Ionen einverleiben und dem Stroma der Chloroplasten entziehen, sondern vielleicht auch, weil diese Ansäuerung es den Chloroplasten erlaubt, ATP zu erzeugen, mit dessen Hilfe in der Synthesereaktion der Fotosynthese Glucose erzeugt wird, die der Ernährung dient.

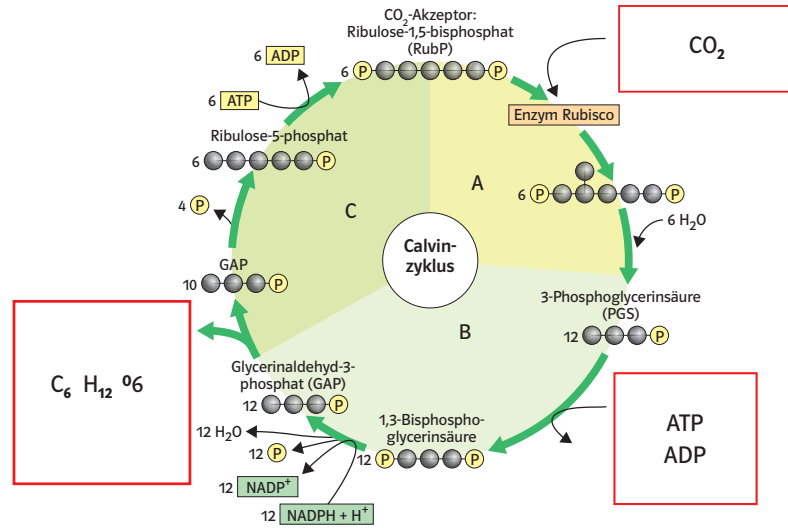
Synthesereaktion, der zweite Teil der Fotosynthese (Seite 39)

- 1 Nach sehr kurzer Zeit ist 3-Phosphoglycerinsäure (3-PGS) nachweisbar, Ribulose 1,5-Bisphosphat (RabP) ist das Akzepturmolekül für Kohlenstoffdioxid. Glucose ist das Endprodukt.
- 2 Die Konzentrationen der Zwischenprodukte des Calvinzyklus nehmen im Dunkeln stark ab. In der Induktionsphase der Fotosynthese wird zunächst Kohlenstoffdioxid gebunden und die Konzentrationen der Zwischenprodukte erhöht, um eine hohe Stoffwechselrate zu erzielen.
- 3 Von GAP-Molekülen dienen die meisten der Regeneration des Kohlenstoffdioxid-Akzeptors in den Chloroplasten, wenige GAP-Moleküle können den Zyklus verlassen, ohne dass der Calvinzyklus zum Erliegen kommt. Durch die Verteilung der Stoffe in Kompartimenten kann jeweils eine bedarfsgerechte Konzentration herbeigeführt werden. Glucose kann durch Stärkebildung dem Prozess entzogen werden.

Bilanz der fotosynthetischen Synthesereaktionen (Seite 40)

○ 1 siehe Abbildung

● 2



A Fixierung von Kohlenstoffdioxid, B Bildung von Glucose,
C Regeneration des Kohlenstoffdioxid-Akzeptors.

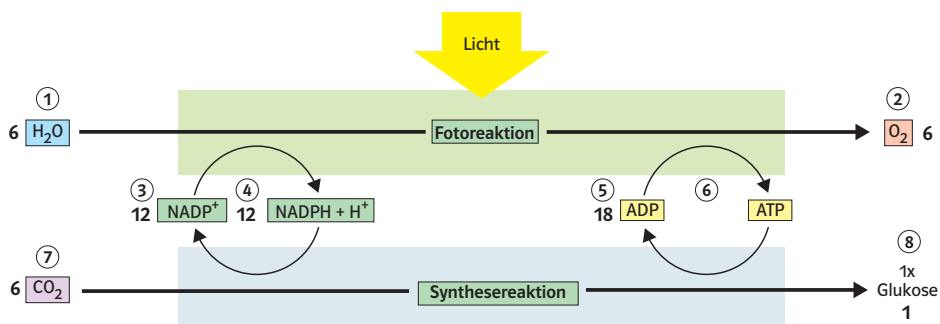
● 3 siehe Tabelle

Calvinzyklus	Citronensäurezyklus
Ein Akzeptor bindet Kohlenstoffdioxid zur Veränderung.	Ein Akzeptor bindet einen C ₂ -Körper zur Veränderung.
Der Akzeptor wird in einem Zyklus regeneriert.	Der Akzeptor wird in ein einem Zyklus regeneriert.
Den Zyklus verlässt das Produkt Glucose.	Den Zyklus verlassen die Produkte Reduktionsäquivalente und GTP.

Fotosynthese im Überblick (Seite 41)

● 1 In der Fotoreaktion werden Reduktionsäquivalente (NADPH+H⁺), ATP und Sauerstoff gebildet. ATP dient in der Synthesereaktion zur Aktivierung von C₃-Körpern, die dann mithilfe der Reduktionsäquivalente reduziert werden, sodass der Kohlenstoff aus dem fixierten Kohlenstoffdioxid über viele Zwischenschritte ein Kohlenhydrat entstehen kann. Der Sauerstoff wird frei.

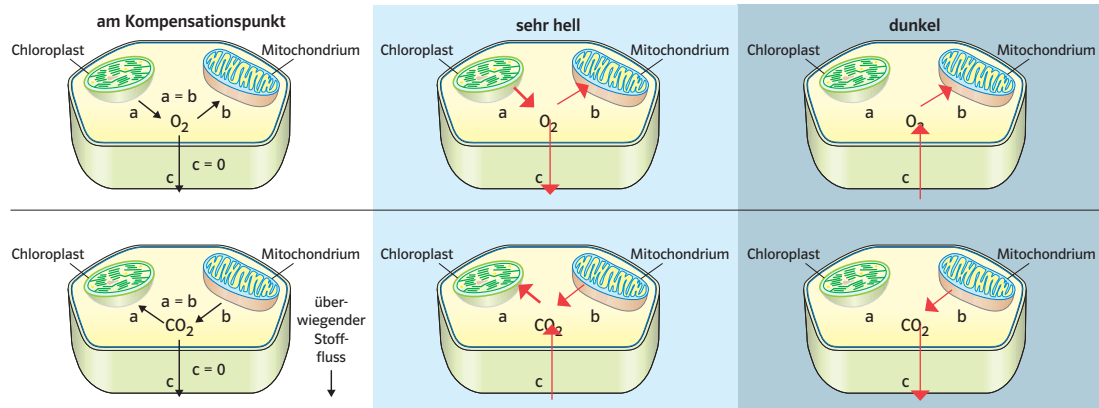
○ 2 siehe Abbildung



● 3 Fehlt das Gas Kohlenstoffdioxid, kommt der Calvinzyklus zum Erliegen. Reduzierte NADPH + H⁺-Moleküle können ihren Wasserstoff nicht mehr abgeben. Die Lichtreaktion steht still, weil der Elektronenakzeptor (NADP⁺) fehlt.

Kompensationspunkte der Fotosynthese (Seite 42)

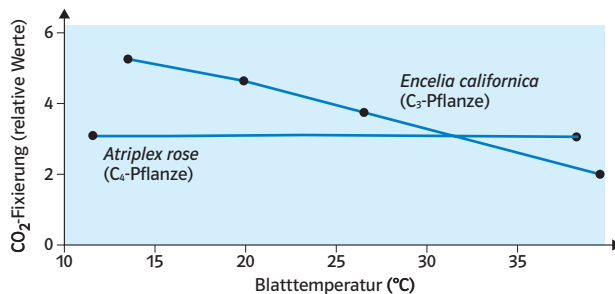
- 1 Der Kohlenstoffdioxid-Kompensationspunkt ist definiert durch diejenige Kohlenstoffdioxidkonzentration, die sich in einem Blatt einstellt, wenn die Produktion von Kohlenstoffdioxid durch die Zellatmung der Mitochondrien und der Fixierung von Kohlenstoffdioxid durch die Fotosynthese der Chloroplasten in gleichem AusmaÙe stattfinden.
- 2 siehe Abbildung



- 3 Schattenpflanzen haben im Laufe der Evolution Eigenschaften entwickelt, mit denen sie an Standorten mit geringer Lichtintensität wachsen können. Demzufolge können sie schon schwaches Licht für ihre Fotosynthese nutzen. Lichtpflanzen hingegen nutzen erst höhere Intensitäten, um mit der Fotosynthese zu beginnen. Ihr Lichtsättigungspunkt liegt aber wesentlich höher als bei Schattenpflanzen, sodass dieser fotosynthetische Nachteil für die Biomasseproduktion mehr als ausgeglichen wird. Sie können Fotosynthese bei sehr hohen Lichtintensitäten betreiben, bei denen Schattenpflanzen längst ihren Lichtsättigungspunkt überschritten hätten.
- 4 Bei Frühblühern hat sich das Laubdach über ihnen noch nicht geschlossen, sodass sie nicht an Schwachlicht angepasst sein müssen. Durch die Jahreszeit haben sie aber nicht die maximale Lichtintensität zur Verfügung, wie sie für Lichtpflanzen optimal wäre.
- 5 Bakterielle Fotosynthese am Kompensationspunkt hätte verhindert, dass Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben worden wäre, weil die Cyanobakterien dann den von ihnen selbst produzierten Sauerstoff selber wieder verbraucht hätten.

Fotosynthese und Umweltfaktoren (Seite 43)

- 1 Bei geringen Lichtintensitäten überwiegt in grünen Zellen die Kohlenstoffdioxid-Produktion durch Zellatmung in den Mitochondrien gegenüber dem fotosynthetischen Kohlenstoffdioxid-Verbrauch in den Chloroplasten, bis die Lichtintensität so hoch ist, dass sich beide Größen die Waage halten: Die Lichtintensität, bei der es zu keiner Veränderung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration im fotosynthetisch aktiven Gewebe kommt, (weil die von Chloroplasten aufgenommene Kohlenstoffdioxid-Menge und die von Mitochondrien abgegebene gleich sind) wird Lichtkompensationspunkt genannt. Steigt die Lichtintensität weiter an, steigt die Fotosyntheseaktivität. Im linear ansteigenden Bereich der Kurve stellt das Licht den die Fotosynthese limitierenden Faktor dar. Bei sehr hohen Lichtintensitäten mangelt es an Kohlenstoffdioxid, die Kurve verläuft waagrecht, eine Sättigung des Prozesses ist erreicht. Der limitierende Faktor bei sehr hohen Lichtintensitäten ist das im Chloroplasten verfügbare Kohlenstoffdioxid.
- 2 Da dem hemmenden Effekt auf die Fotosynthese, die steigende Temperatur, experimentell durch eine Erhöhung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration begegnet werden kann, liegt nahe anzunehmen, dass die Kohlenstoffdioxid-Fixierung durch das Enzym Rubisco bei steigenden Temperaturen gehemmt wird und die Fotosynthese limitiert.
- 3 In Gewächshäusern steigen die Temperaturen an, wenn die Lichtintensität der Sonne zunimmt. Gleichzeitig nimmt die Kohlenstoffdioxid-Fixierung durch das Enzym Rubisco bei steigenden Temperaturen ab. Die Pflanzen können dazu gebracht werden, hohe Lichtintensitäten besser zur Biomasseproduktion zu nutzen, indem die Kohlenstoffdioxid-Konzentration im Gewächshaus künstlich erhöht wird, wie Abb. 2 belegt.
- 4 Der Schluss auf die begrenzte Kapazität des Enzyms Rubisco beim Binden von Kohlenstoffdioxid kann gezogen werden, weil experimentell das Abknicken der Kurve bei hohen Lichtintensitäten durch Erhöhung der Kohlenstoffdioxid-Konzentration verhindert werden kann.
- 5 siehe Abbildung



- 6 Bei hohen Lichtintensitäten und Temperaturen sind C₄-Pflanzen den C₃-Pflanzen mit Blick auf die Fotosyntheseleistungen überlegen. Es handelt sich um eine evolutionsbiologische Anpasstheit an die Umweltbedingungen im globalen Süden. Bei niedrigeren Lichtintensitäten und Temperaturen, wie sie in den sog. gemäßigten Klimazonen anzutreffen sind, zeigen C₃-Pflanzen ihre Stärke: Sie weisen eine höhere Fotosyntheseleistung auf als C₄-Pflanzen. Dies kann als eine evolutionsbiologische Anpasstheit an die niedrigeren Lichtintensitäten und Temperaturen im Norden interpretiert werden.

Lichtnutzung durch die Lupine (Seite 44)

- 1 Der überwiegende Teil des Sonnenlichtes kann von grünen pflanzlichen Geweben nicht für die Fotosynthese genutzt werden, weil dessen Wellenlängen zu kurz oder zu lang sind. Die verbleibenden Wellenlängen lösen fotosynthetische Aktivität aus oder werden reflektiert. Fast 80 % des genutzten Lichtanteils von 24 % dienen der Aufrechterhaltung des Stoffwechsels. Der verbleibende Rest dient dem Aufbau von Biomasse.
- 2 Die rechte Blattoberfläche (b in Abb. 2) zeigt Zellen mit linsenförmiger Oberseite in mehr oder weniger regelmäßiger Anordnung. Bei b) handelt es sich um die dem Licht zugewandten Seite des Blattes. Die gut lichtdurchlässigen Zellen fungieren wie Linsen einer Kamera: Sie fokussieren das Licht, sodass die Menge des fotosynthetisch genutzten Lichtes hoch ist.
- 3 Bei schwachem Licht sind die Chloroplasten fotosynthetisch-aktiver Zellen an der dem Licht zugewandten Seite eines Blattes gleichmäßig verteilt: Durch diese Anordnung kann die Zelle viel des Lichtes absorbieren. Werden Zellen mit sehr starkem Licht bestrahlt, bewegen sie ihre Chloroplasten an die seitlichen Zellwände. Die Chloroplasten beschatten einander. So verhindern pflanzliche Zellen ein Übermaß an absorbiertem Licht, das zellschädigend wirken könnte.
- 4 Die Lupine stellt ihre Blattflächen mithilfe von Nachfolgebewegungen senkrecht zum Sonnenlicht. Für Pflanzenarten trockener Zonen stellt dies einen Vorteil dar, weil sie am frühen Morgen und späten Nachmittag ihre Fotosyntheseaktivität hoch halten können. Es sind diejenigen Zeiten, in denen der Stress durch Wasserverlust für die Pflanzen am geringsten ist.

Fotorespiration bei Pflanzen (Seite 45)

- 1 Das Enzym Rubisco, der Kohlenstoffdioxidakzeptor des Calvinzyklus, kann mit Sauerstoff reagieren, nachdem es Kohlenstoffdioxid gebunden hat. Es hängt von der Sauerstoffkonzentration ab, ob es zu einem Netto-Kohlenstoffverlust durch die sog. Fotorespiration kommt. Ist sie hoch, reagiert der größere Teil der Enzyme mit Sauerstoff, netto tritt ein Kohlenstoffverlust ein. Hält sich bei mittlerer Sauerstoffkonzentration hingegen die Zahl der Reaktionen mit Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid die Waage, ist kein Netto-Kohlenstoffverlust zu beobachten, der Kohlenstoffgehalt bleibt gleich.
- 2 Einerseits ist es nachvollziehbar, den Sauerstoffverbrauch von pflanzlichen Zellen nachts als „Dunkelatmung“ zu bezeichnen und sie der Lichtatmung gegenüberzustellen. Andererseits befördert dieses Begriffspaar Vorstellungen, im Licht würde die Zellatmung zum Erliegen kommen. Dies ist aus fachlicher Perspektive nicht haltbar. Vielmehr wird die Lichtatmung an- und abgeschaltet, die Zellatmung bleibt mehr oder weniger immer angeschaltet. Der Begriff „Lichtatmung“ ist fachlich also akzeptabel, der Begriff „Dunkelatmung“ hingegen nicht, weil er fachlich nicht korrekte Vorstellungen fördern könnte.
- 3 Das Enzym Rubisco hat eine Affinität zu Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid. Aus diesem Grunde konkurrieren die beiden Gase um den Kohlenstoff-Akzeptor. In der Atmosphäre befinden sich mit 21 Volumenprozent weit mehr Sauerstoff als Kohlenstoffdioxid (0,042 Volumenprozent). Wird das Sauerstoff-/Kohlenstoffdioxid-Verhältnis in fotosynthetisch-aktiven Geweben verändert, überwiegt der eine oder andere Reaktionsweg.

- **4** Mögliche Hypothesen sind z. B.:
 - Vielleicht sind die Bedingungen des hohen Sauerstoffgehalts in der Atmosphäre evolutionsbiologisch so jung, dass eine entsprechende Selektion passender Mutanten noch nicht stattgefunden hat.
 - Man kann annehmen, dass die Komplexität des fotosynthetischen Apparates bereits zu groß gewesen ist, um eine Selektion gegen die Sauerstoffaffinität von Rubisco zu begünstigen, sodass zufällige Abwandlungen des Enzyms sich nachteilig auswirkten. Deswegen konnte das Problem der Sauerstoffaffinität dieses Schlüsselenzyms – aus ökologischer Perspektive – der gesamten Biologie nicht ursächlich gelöst werden.
 - Vielleicht bewährten sich in der Evolution Mechanismen zum Ausgleich der ungünstig hohen Affinität von Rubisco zu Sauerstoff. C_4 -Pflanzen trennen die Bindung des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids und die Fixierung des Kohlenstoffdioxids durch das Enzym Rubisco räumlich voneinander, und halten einerseits diejenigen Zellen, in denen der Calvinzyklus stattfindet, mehr oder weniger frei von Sauerstoff, andererseits erhöhen sie dort die Kohlenstoffdioxid-Konzentration.

- **5** Algen als C_3 -Pflanzen, die im Wasser leben, zeigen die höchste Biomasseproduktivität. Dies liegt am Bauplantyp der Algen, die im Wasser offensichtlich sehr günstige ökologische Bedingungen haben. Anzunehmen ist, dass die konstanteren Bedingungen im Wasser insbesondere ein- und wenigzellige Algen begünstigen, die ein günstiges Oberflächen-/Volumen-Verhältnis haben, das ihnen eine optimale Aufnahme von Stoffen aus dem Wasser ermöglicht. C_3 -Landpflanzen weisen diese anatomischen Vorteile nicht auf. Bei ihnen werden die geringsten Biomassezuwächse gemessen, wobei diese Aussage nicht einfach generalisiert werden kann: Mais (C_4 -Pflanze) und Zuckerrüben (C_3 -Pflanze) weisen mit jährlichen Ernten von 26 und 22 Tonnen (Trockengewicht/Hektar) eine ähnlich hohe Biomasseproduktivität auf, wie Abb. 3 belegt.

Kohlenstoffdioxid-Bindung bei C_4 -Pflanzen (Seite 46)

- **1** Der Kohlenstoffdioxid-Akzeptor-Komplex aus dem Enzym PEP-Carboxylase und seinem Substrat Phosphoenolbrenztraubensäure (PEP, C_3 -Körper) hat offenbar keine Affinität zu Sauerstoff. Deswegen kann diese erste Kohlenstoffdioxid-Fixierung ungestört in den Mesophyllzellen der Blätter stattfinden. Der resultierende C_4 -Körper (Äpfelsäure) wird in die Leitbündelscheidenzellen transportiert. Hier findet die Decarboxylierung statt, das Kohlenstoffdioxid kann durch das Enzym Rubisco des Calvinzyklus fixiert werden (zweite Kohlenstoffdioxid-Fixierung), ohne Verluste durch Photorespiration, weil in den Bündelscheidenzellen kaum Sauerstoff vorhanden ist.

- **2** Abbildung 2 zeigt, dass die C_4 -Pflanzen bei atmosphärischen Kohlenstoffdioxid-Konzentrationen (ca. 0,042 Volumenprozent) etwa die doppelte Menge an Kohlenstoffdioxid binden können als C_3 -Pflanzen. Das liegt an dem effektiven Kohlenstoffdioxid-Akzeptor PEP und der Fähigkeit der C_4 -Pflanzen, den Calvinzyklus mit Rubisco bei weitgehender Sauerstofffreiheit durchzuführen.

- **3** An Abb. 1 zum Maisblatt erkennt man Bündelscheidenzellen, die einerseits in einzelliger Lage die Leitbündel umfassen und andererseits meist mit Mesophyllzellen in Kontakt stehen. Beide Zelltypen weisen Chloroplasten auf. Diese Anatomie weist auf den Stoffwechselweg mit zweimaliger Kohlenstoffdioxid-Fixierung hin, wobei das sauerstoffempfindliche Enzym Rubisco in den beinahe sauerstofffreien Bündelscheidenzellen den Calvinzyklus mit der zweiten Kohlenstoffdioxid-Fixierung startet. In den sauerstoffhaltigen Mesophyllzellen wird die erste Kohlenstoffdioxid-Fixierung mit einem Enzym durchgeführt, das keine Affinität zu Sauerstoff hat. Beim Buchenblatt stehen praktisch alle chloroplastenhaltigen Zellen im Blatt mit der Sauerstoffatmosphäre in Verbindung.

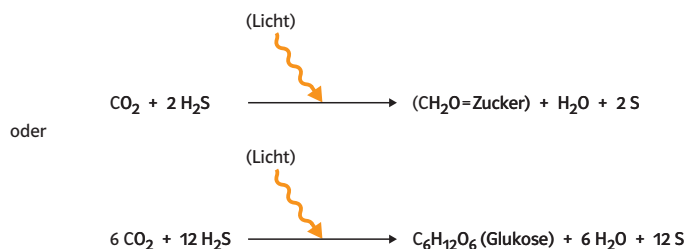
Kohlenstoffdioxid-Fixierung bei CAM-Pflanzen (Seite 47)

- 1 CAM-Pflanzen fixieren nachts bei geöffneten Stomata Kohlenstoffdioxid (Abb. 3), indem sie den C_3 -Körper PEP mit Kohlenstoffdioxid enzymatisch zu Oxalessigsäure (C_4 -Körper) verknüpfen. Oxalessigsäure wandeln sie in Apfelsäure (C_4 -Körper) um und lagern diese in der Vakuole ab. Tagsüber können die Stomata geschlossen bleiben, weil sie Kohlenstoffdioxid freigeben. Das freigesetzte Kohlenstoffdioxid wird im Calvinzyklus benötigt. Die hohen Lichtintensitäten können tagsüber optimal genutzt werden, weil Fotoreaktion und Synthesereaktion der Fotosynthese ohne großen Wasserverlust gleichzeitig ablaufen (Abb. 3B). CAM-Pflanzen trennen die (primäre) Fixierung von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid und die sekundäre Fixierung von Kohlenstoffdioxid im Calvinzyklus zeitlich (Abb. 2). Fotoreaktion und Synthesereaktion können deswegen unter extremen ökologischen Bedingungen in den Chloroplasten von CAM-Pflanzen gleichzeitig ablaufen.
- 2 Auch wenn das erste nachweisbare Produkt der primären Kohlenstoffdioxid-Fixierung von CAM-Pflanzenarten mit Oxalessigsäure ein C_4 -Körper ist – wie bei den C_4 -Pflanzen – erscheint es dennoch biologisch sinnvoll, C_4 - und CAM-Pflanzen zu unterscheiden. C_4 -Pflanzen haben das Problem der Lichtatmung durch Trennung der primären und sekundären Fixierung von Kohlenstoffdioxid im Calvinzyklus gelöst. Hingegen haben CAM-Pflanzen den Wasserverlust durch zeitliche Trennung von primärer und sekundärer Kohlenstoffdioxid-Fixierung im Calvinzyklus minimiert.
- 3 Vermutlich würden heutige Biologen und Biologinnen sagen, dass sie ihre Versuchsorganismen im Labor nicht essen würden. Heute werden solche Nachweismethoden anders – also nicht mithilfe des Schmeckens – durchgeführt, weil es eine Reihe von alternativen Nachweismethoden gibt. Andere sensorische Überprüfungen sind allerdings in der Wissenschaft weit verbreitet, z.B. die Begutachtung per Augenschein oder mithilfe des Hörens oder Tastens. Unklar ist zudem, warum der Biologe BENJAMIN HEYNE vor rund 200 Jahren von den Blättern seiner Brutblätter abends und morgens gekostet hat. Möglicherweise ist er dem Effekt zufällig nur durch Schmecken auf die Schliche gekommen, dann wäre es ein die Erkenntnis fördernder Zufall gewesen.

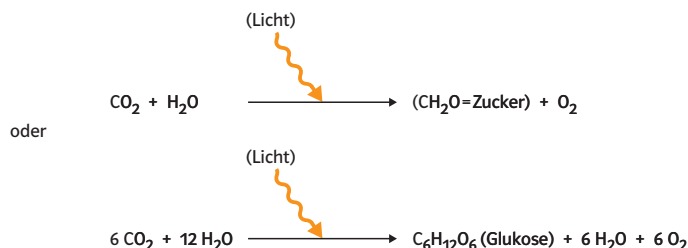
Fotosynthese mit und ohne Sauerstoffproduktion (Seite 48)

- 1 siehe Abbildung

Anoxygene Fotosynthese der Schwefelbakterien:



Oxygene Fotosynthese der Cyanobakterien und Chloroplasten:



- **2** Mithilfe der oxygenen Fotosynthese haben sich Zellen die anorganische Verbindung Wasser als Elektronendonator verfügbar gemacht, das auf der Erde in beinahe unendlichem Maße vorhanden ist. Andere anorganische Elektronendonatoren (z. B. Schwefelwasserstoff) sind demgegenüber begrenzt vorhanden. Zellen, die es nutzen, werden dadurch eingeschränkt. Das bei oxygenen Fotosynthese entstehende und global verfügbare Gas Sauerstoff dient bei der Zellatmung zur ATP-Gewinnung durch Oxydation von Nährstoffen (z. B. Glucose), die ökologisch alle auf pflanzlich erzeugte zurückzuführen sind. Diese energetische Nutzung hat die Verbreitung der oxygenen Fotosynthese indirekt beschleunigt.

- **3** VAN NIELS konnte aufgrund seiner Experimente mit Schwefelbakterien den Schluss ziehen, dass der Sauerstoff bei oxygenen Fotosynthese aus dem Wasser stammt, weil er annahm, dass sein Reaktionsschema (Abb. 1) prinzipiell auf alle fotosynthetischen Vorgänge zuträfe. Dann gilt, dass der elementare Schwefel bei anoxygenen Schwefelbakterien aus dem Gas Schwefelwasserstoff stammt, weil in diesem Zusammenhang kein anderes schwefelhaltiges Molekül existiert, und analog dazu, dass das Gas Sauerstoff bei oxygenen Fotosynthese aus dem Wasser, nicht aus dem Kohlenstoffdioxid stammt.