

Stoffwechsel

5

Stoff- und Energieaustausch bei Tieren

S. 89 5.1 Die Konstanz des inneren Milieus ist für unsere Zellen lebenswichtig

A1 Nennen Sie Anforderungen an eine biologische Grenzfläche, die einen intensiven Stoffaustausch ermöglichen soll.

Biologische Austauschflächen müssen möglichst groß und dünn sein und dennoch eine gewisse Stabilität aufweisen. Sie müssen für die auszutauschenden Teilchen gut durchlässig sein. Zum Stoffaustausch muss die Austauschfläche feucht sein (zum Energieaustausch nicht).

A2 Erklären Sie die Bedeutung der Homöostase für den menschlichen Körper.

Als Homöostase bezeichnet man die für Zellen lebenswichtige Konstanz des inneren Milieus. In diesem Zustand laufen alle Vorgänge in den Zellen optimal ab. Störungen der Homöostase beeinträchtigen diese Vorgänge und können so zu Schwierigkeiten führen. Deshalb gibt es für die Homöostase eine Vielfalt von Regelsystemen.

S. 90 5.2 Der Energiebedarf großer Tiere ist relativ niedrig

A1

a. Erklären Sie die in Abb. 2 dargestellten Zusammenhänge.

b. Erklären Sie folgende Aussage: Je größer ein Tier, desto schwieriger ist die Wärmeableitung.

a. Kleine Säugetiere haben bezogen auf ihre Körpermasse einen höheren Energieumsatz und damit eine höhere Stoffwechselrate als große Säugetiere. Dies wird durch die Daten in Abb. 2 veranschaulicht: Kleine Säugetiere haben bezogen auf die Körpermasse einen höheren Sauerstoffverbrauch als große. Dies erklärt die steigende Anzahl der Atemzüge und die steigende Herzfrequenz. Dementsprechend verhalten sich diese Stoffwechselgrößen bei großen Säugetieren umgekehrt.

b. Die Größe der Oberfläche der Säugetiere steht in direkter Beziehung zum Wärmeverlust des Körpers und bestimmt damit die Stoffwechselintensität. Der Grundumsatz der Säugetiere ist an ihr Oberflächen-Volumen-Verhältnis angepasst. In großvolumigen Körpern wird relativ mehr Wärme produziert als über die vergleichsweise kleinere Oberfläche abgestrahlt wird.

A2 Der Reisende Gulliver, eine Romanfigur, war im Verhältnis 12:1 größer als die Liliputaner. Diese rechneten aus, dass in seinen Körper 1728 Liliputaner passen müssten, und deshalb bekam er 1728-mal so viel Nahrung zugeteilt. Beurteilen Sie, ob diese Zuteilung als bedarfsgerecht angesehen werden kann.

Die Rechnung ist zwar richtig: Gulliver hat das Volumen von $12^3 = 1728$ Liliputanern, aber die Nahrung ist nicht bedarfsgerecht. Gemäß der Maus-Elefant-Kurve nimmt der Grundumsatz mit steigender Körpermasse ab. Grund ist das Oberflächen-Volumen-Verhältnis, wodurch ein großer Körper mit seiner Umgebung schlechter Wärmeenergie austauschen kann als ein kleiner Körper. Gulliver hätte demnach erheblich weniger Nahrung gebraucht, und zwar grob geschätzt $12^2 = 144$ -mal so viel wie ein Liliputaner, entsprechend dem Oberflächen-Volumen-Verhältnis.

S. 93 5.3 Tiere brauchen energiereiche Nährstoffe und Wärmeenergie

A1 Erklären Sie den Unterschied zwischen Baustoffen und Betriebsstoffen. Zu den Betriebsstoffen gehören die energiereichen Nährstoffe wie Kohlenhydrate und Fette. Diese werden im sogenannten Betriebsstoffwechsel abgebaut und liefern Energie für Stoffwechselprozesse und Wärme. Im Gegensatz zu den Betriebsstoffen dienen die Baustoffe nicht als Energielieferant. Der Körper nutzt die Baustoffe für das Wachstum. Viele Nährstoffe dienen sowohl als Baustoff als auch als Betriebsstoff.

A2 Menschen sind als Säugetiere endotherm. Erläutern Sie die Regulation der Körpertemperatur sowohl von innen als auch durch das Verhalten.

Wir regulieren unsere Körpertemperatur teils durch aktives Erwärmen (z. B. durch entstehende Wärme aus dem Stoffwechsel, Muskelzittern bei Kälte) oder Kühlen (z. B. Schwitzen) von innen heraus, in erheblichem Maß aber auch durch Verhalten: Aufsuchen warmer bzw. kühler Räume, Sonne oder Schatten; Kleidungswechsel; Aufwärmen an der Heizung oder durch ein heißes Getränk; Abkühlen im Schwimmbad, im Wind oder durch ein kühles Getränk.

S. 96 5.4 Verdauung zerlegt Makromoleküle in wasserlösliche Bausteine

A1 Vergleicht man die relativen Darmlängen von Säugetieren (also das Verhältnis der Körperlänge zur Darmlänge), kann man folgende Beobachtungen machen: Der Maulwurf hat einen doppelt so langen Darm wie ein Wolf, aber nur einen halb so langen Darm wie ein Rind. Erklären Sie diese Beobachtungen.

Pflanzen- und Allesfresser haben in der Regel im Verhältnis zur Körpergröße einen längeren Verdauungskanal als Fleischfresser. Pflanzliche Nahrung ist wegen der darin enthaltenen Zellwände schwerer verdaulich als Fleisch. In einem längeren Verdauungskanal stehen für die Verdauung mehr Zeit und für die Nährstoffresorption mehr Oberfläche zur Verfügung.

A2 Erläutern Sie die Bedeutung der Kompartimentierung bei der Verdauung an unterschiedlichen Beispielen.

Durch die Kompartimentierung laufen im Verdauungstrakt ganz unterschiedliche Prozesse gleichzeitig bei unterschiedlichen pH-Werten und mit unterschiedlichen Enzymen ab. So können wir zur gleichen Zeit neue Nahrung im Mund zerkleinern und einspeicheln, etwas zurückliegende im Magen zersetzen und noch frühere im Dünndarm in ihre molekularen Bausteine zerlegen.

S. 98 5.5 Im Körper können Energiereserven gespeichert werden

A1 Erläutern Sie die Vorteile der unterschiedlichen Energiespeicher des Menschen in Abb. 1.

Freie Glucose im Blutplasma ist schnell verfügbar, reicht aber nur für einen sehr kurzen Zeitraum aus. Glykogen aus Muskel und Leber kann schnell mobilisiert werden, reicht aber unter Belastung auch nur für einen kurzen Zeitraum. Sind die ersten beiden Energiespeicher erschöpft, kann der Körper auf Proteine als Energiereserve zurückgreifen. Diese werden zur Energiegewinnung in Zucker umgewandelt, sodass weiter das Speicherfett verwertet werden kann. Die Speicherfette des Fettgewebes sind sehr energiereich und reichen für einen langen Zeitraum. Um diese Energie zu mobilisieren, werden aber Kohlenhydrate benötigt.

A2 Beschreiben Sie den Weg der vom Körper aufgenommenen chemischen Energie anhand von Abb. 3.

Der Körper nimmt die Energie als chemische Energie über die Nahrung auf. Ein Teil wird in Form von Kot wieder abgegeben, der größere Teil wird vom Darm resorbiert. Diese Energie wird im Körper für drei unterschiedliche Formen von physiologischer Arbeit genutzt: äußere Arbeit, innere Arbeit (Homöostase) und Biosynthesen. Dabei wird die chemische Energie z.T. in mechanische Energie und Wärmeenergie umgewandelt. In diesen drei Energieformen kann der Körper wieder Energie abgeben. Beispiele sind Fortbewegung (mechanische Energie), Wärmeerhaltung und Absonderungen in Form von Harn, Schleim und Schuppen (chemische Energie). Durch das Wachstum wird chemische Energie im Gewebe angereichert. Nach dem Tod steht diese chemische Energie anderen Lebewesen wieder zur Verfügung.

S. 101 **5.6** Ein Kreislaufsystem ermöglicht allen Zellen und Organen den Stoffaustausch

A1

a. Beschreiben Sie den Weg des Blutes anhand von Abb. 1. Beginnen und enden Sie bei der Aorta.

b. Nennen Sie die Hauptbestandteile des Blutes und ordnen Sie diesen ihre Funktion zu.

a. Aorta → Körperarterien → Kapillarnetze → Körpervenen (und Hohlvenen) → rechte Vorkammer → rechte Hauptkammer → Lungenarterien → Kapillarnetz der Lunge → Lungenvenen → linke Vorkammer → linke Hauptkammer → Aorta

b. Blutplasma: Transport der Blutzellen und gelöster Stoffe

Rote Blutzellen (Erythrocyten): Transport von Sauerstoff

Weißer Blutzellen (Leukocyten): Teil der Immunabwehr

Blutplättchen (Thrombocyten): Blutgerinnung und Wundverschluss

A2 Beurteilen Sie folgende Aussage: „Der Kühlkreislauf eines Motors ist mit dem Körperkreislauf vergleichbar.“

Der Körperkreislauf hat neben vielen weiteren Aufgaben auch die eines Kühlkreislaufs, indem er die Wärmeenergie im Körper verteilt und über Austauschflächen an die Umgebung abgibt, so wie es ein Kühlkreislauf macht. Beide arbeiten mit einer Pumpe auf der Basis einer umgewälzten Flüssigkeit. Die Pumpleistung und die Austauschflächen werden in beiden Fällen dem Bedarf angepasst.

S. 104 **5.7** Der Gasaustausch liefert Sauerstoff für die Zellatmung und beseitigt CO₂

A1

Stellen Sie den Gasaustausch im Kreislaufsystem anhand von Abb. 1 in einem Flussdiagramm dar. Beginnen und enden Sie in der Lunge.

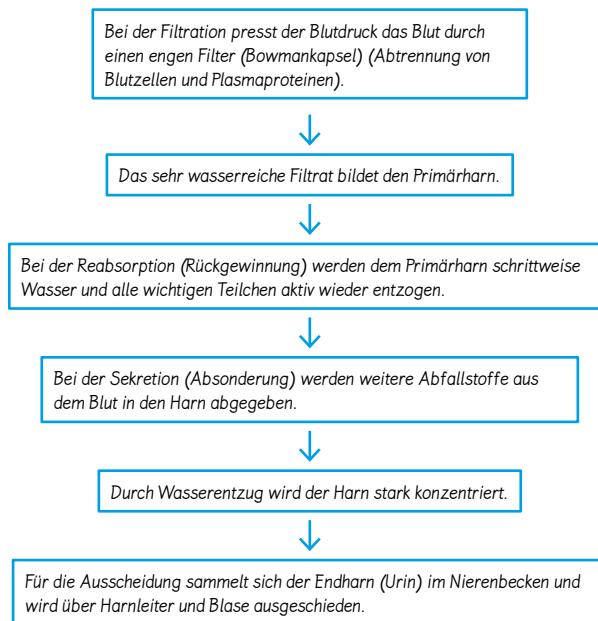
In den Lungenkapillaren: Aufnahme von Sauerstoff aus den Alveolen durch Hämoglobin in den Roten Blutzellen → Transport der mit Sauerstoff beladenen Roten Blutzellen durch Lungenvenen und Körperarterien zum Gewebe → In den Körperkapillaren: Abgabe von Sauerstoff vom Hämoglobin an die Gewebezellen → In den Körperkapillaren: Aufnahme von CO₂ durch die Roten Blutzellen unter Bildung von HCO₃⁻ im Blutplasma → Transport von sauerstoffarmem und CO₂-haltigem Blut durch Körpervenen und Lungenarterien zur Lunge → In den Lungenkapillaren: Bildung von CO₂ aus HCO₃⁻ im Blutplasma und Abgabe von CO₂ durch die Roten Blutzellen an die Alveolen

A2

- a.** Begründen Sie die höhere O_2 -Affinität des Myoglobins im Vergleich zum Hämoglobin.
- b.** Erklären Sie den sehr hohen Myoglobingehalt in den Muskeln von Walen mit ihrer Lebensweise.
- a.** Myoglobin befindet sich in den Muskelzellen. Seine O_2 -Bindungskurve liegt deutlich weiter links, seine O_2 -Affinität ist also höher als die des Hämoglobins. Folglich kann es dem Hämoglobin den transportierten Sauerstoff leicht entziehen. Dies ist notwendig, damit der Sauerstoff in ausreichender Menge vom Blut in das Muskelgewebe übertragen werden kann.
- b.** In Muskeln, die auf eine hohe aerobe Energiegewinnung angewiesen sind, dient Myoglobin als zusätzlicher Sauerstoffspeicher. Bei geringen Partialdrücken kann Sauerstoff leicht von Hämoglobin auf Myoglobin übertragen werden. Die Muskeln von Meeressäugern haben einen hohen Myoglobingehalt, da diese Tiere bei jedem Tauchgang möglichst viel Sauerstoff mitnehmen müssen. Wale können wegen des hohen Umgebungsdrucks im Wasser in größeren Tiefen und wegen des Auftriebs keine Luft in ihren Lungen speichern. Sie sind daher auf andere Sauerstoffvorräte angewiesen. Myoglobin stellt diesen zusätzlichen Sauerstoffspeicher dar.

S. 107 **5.8 Die Niere filtert Blut und holt aus dem Filtrat alles Nötige zurück****A1**

Stellen Sie die Exkretion in der Niere in einem Flussdiagramm dar.

**A2**

Erklären Sie, warum das Trinken größerer Mengen Meerwasser für Schiffbrüchige tödlich ist, obwohl maximal konzentrierter Urin eine höhere Stoffkonzentration aufweist als das Meerwasser.

Der von der menschlichen Niere erzeugte Urin ist höher konzentriert als das Meerwasser. Folglich kann auch beim Trinken von Meerwasser ein geringer Wasserüberschuss im Körper erhalten werden. Da der Körper jedoch den zusätzlichen Wasserverlust durch Verdunstung und Atemluft nicht ausgleichen kann, steigt die Salzkonzentration so weit an, dass es zur osmotischen Schädigung der Körperzellen kommt.

S. 109 **5.9** Muskelfasern verkürzen sich, indem Proteine aneinander entlanggleiten**A1**

- a.** Beschreiben Sie mithilfe von Abb. 2 den Ablauf der Muskelkontraktion unter Berücksichtigung der notwendigen Fachbegriffe.
- b.** Beschreiben Sie die Veränderung des Myosinkopfes unter Berücksichtigung der Energie.
- a.** Die Gleitfilamenttheorie der Muskelkontraktion: Im Sarkomer sind Actinfilamente und Myosinfilamente parallel angeordnet, wobei die Myosinköpfe als „Zugseil“ dienen. Bei der Kontraktion bieten die Actinfilamente den Myosinköpfen Bindungsstellen. Bei der Kontraktion gleiten die Proteinfilamente aneinander entlang, wodurch sich das Sarkomer insgesamt verkürzt, indem die Z-Scheiben näher zur Mitte des Sarkomers gezogen werden. Die erforderliche Energie liefert das ATP. Der Myosinkopf, an den ADP und Phosphat gebunden sind, heftet sich am Actin an. Dies löst einen Kraftschlag aus, es bildet sich der Actin-Myosin-Komplex. ADP und Phosphat lösen sich ab, wodurch der Myosinkopf von selbst eine Kippbewegung durchführt, die ihn entspannt. Dies zieht das Actin näher zur Sarkomer-Mitte. Die im ATP steckende Energie wird also nicht direkt für den Kraftschlag gebraucht, sondern dafür, das Actin zu spannen. Nun dockt ein ATP-Molekül am entspannten Myosinkopf an, wodurch dieser sich vom Actin löst. Das Ablösen des Myosinkopfes vom Actin erfordert keine Energie, aber dennoch ATP. ATP wirkt also als „Weichmacher“ der Muskulatur. Das Myosin spaltet das gebundene ATP-Molekül in ADP und P und nutzt die dabei freigesetzte Energie, um den Kopf erneut zu spannen. Dies ist der Energie verbrauchende Schritt. Reguliert wird die Muskelkontraktion über den Calciumspiegel im Cytoplasma.
- b.** Der nicht an Actin gebundene, mit ATP beladene Myosinkopf wird durch Spaltung des ATP in ADP + P „gespannt“ (Konformationsänderung unter Energiezufuhr). Sobald er an Actin bindet, wird ADP + P freigesetzt und der Kopf „entspannt“ (Kraftschlag: Konformationsänderung ohne Energiezufuhr). Nun wird erneut ATP gebunden und der Kopf löst sich.

A2

Wenige Stunden nach dem Tod eines Wirbeltieres tritt die Totenstarre ein.

- a.** Erklären Sie, warum alle Muskeln starr und hart werden.
- b.** Begründen Sie, warum die Totenstarre bei gehetztem Wild bereits nach sehr kurzer Zeit einsetzt.
- a.** Nach dem Tod geht in den Muskelzellen der ATP-Vorrat rasch zur Neige. Dann werden die Myosinköpfe nicht mehr abgelöst und es folgt die Totenstarre.
- b.** Beim gehetzten Wild sind alle ATP-Vorräte in den Muskelzellen verbraucht. Die Totenstarre setzt viel schneller ein, da kein ATP mehr vorhanden ist, um die Myosinköpfe abzulösen.

Kombiniere!

A1 Viele Ausdauersportler (→ Abb. 1) betreiben Höhentraining, um die Zahl ihrer Roten Blutzellen (Erythrocyten) zu steigern. In großen Höhen ist der Luftdruck niedriger und damit auch der Sauerstoffpartialdruck der Luft geringer. Um sich trotzdem mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen, produziert der Körper vermehrt Erythrocyten und verbessert so die Sauerstoffaufnahme des Blutes in der „dünnen Luft“. Bei anschließenden Wettkämpfen in tieferen Lagen profitiert der Sportler weiterhin von der verbesserten Sauerstoffversorgung seines Körpers. Er ist leistungsfähiger und ausdauernder. Die Zahl der Roten Blutzellen wird über ein Glykoprotein der Niere reguliert, das Erythropoietin (EPO). Abb. 2 zeigt, wie EPO auf das Knochenmark wirkt und dort die Bildung der Erythrocyten beeinflusst. Die Tour de France (→ Abb. 1) ist wiederholt in die Schlagzeilen geraten, weil Radrennfahrer und sogar Gewinner zugeben mussten, Dopingmittel eingenommen zu haben. Dabei spielte vor allem die verbotene Einnahme von EPO eine Rolle.

- a. Erklären Sie, welchen Sinn das Höhentraining von Ausdauersportlern hat.
- b. Stellen Sie eine begründete Hypothese zum Risiko beim Doping mit EPO auf.
- c. Bewerten Sie, inwieweit mithilfe von Doping erzielte sportliche Erfolge zu würdigen sind.
 - a. Im Hochgebirge sind aufgrund der großen Höhe Gesamtluftdruck und damit auch Sauerstoffpartialdruck erheblich niedriger als auf Meereshöhe. Die Folge ist ein Sauerstoffmangel im Blut, der von der Niere erkannt wird. Die Folge ist eine Ausschüttung von EPO durch die Niere, was die Bildung von Erythrocyten durch das Knochenmark anregt. Höhentraining verursacht also eine relative Zunahme der Roten Blutzellen. Dadurch wird eine höhere Transportkapazität für Sauerstoff und eine bessere Sauerstoffversorgung der Muskeln ermöglicht, was sich dann positiv auf die Wettkämpfe in tiefer gelegenen Regionen auswirkt.
 - b. Das Dopingmittel (Hormon und) EPO erhöht die Anzahl der Erythrocyten, ohne das Plasmavolumen zu erhöhen. Der erhöhte Anteil der festen Blutbestandteile verschlechtert die Fließeigenschaften des Blutes. Die übermäßige Einnahme von EPO kann aufgrund der starken Mehrbildung von Erythrocyten zu einer Thrombose (Verklumpung des Blutes) und zum Kreislaufversagen führen.
 - c. individuelle Schülerleistung, z. B. mit folgenden Aspekten:
 - Die mithilfe von Doping erzielten sportlichen Erfolge sollte man kritisch bewerten, da ...
 - ... der Sportler diese Leistung ohne Doping nicht erzielt hätte.
 - ... andere, evtl. saubere Sportler um den Sieg betrogen werden.
 - ... der Erfolg auf die Effektivität des Dopingmittels und nicht auf das Training des Sportlers zurückzuführen ist.

A2 Die Bedeutung des Hämoglobins für den Sauerstofftransport ist auf Seite 103 dargestellt. Der S-förmige Verlauf der Sauerstoffbindungskurve ergibt sich durch die sich ändernde O_2 -Affinität bei unterschiedlichen Partialdrücken. Bei hohem O_2 -Partialdruck in der Lunge nimmt das Blut den Sauerstoff aus der Lunge auf und gibt ihn in Gewebe mit geringem O_2 -Partialdruck wieder ab. Die O_2 -Affinität spielt auch eine entscheidende Rolle bei der Versorgung des Fetus im Mutterleib. Dort übernimmt der mütterliche Kreislauf über die Plazenta die Versorgung des Fetus. Das Hämoglobin des Fetus (fetales Hämoglobin) hat aufgrund von Sequenzunterschieden eine andere O_2 -Affinität als das der Mutter (→ Abb. 3).

- a. Beschreiben Sie das Diagramm in Abb. 3.
- b. Erläutern Sie die biologische Bedeutung der unterschiedlichen O_2 -Affinitäten anhand der beiden O_2 -Bindungskurven.
 - a. Dargestellt ist die Sauerstoffaffinität in Abhängigkeit vom Partialdruck für adultes Hämoglobin der Mutter (Hb_A) und fetales Hämoglobin (Hb_F). Beide Kurven zeigen einen typischen sigmoiden Verlauf. Die Kurve für das fetale Hämoglobin (Hb_F) ist im Vergleich zur Kurve des adulten Hämoglobins nach links verschoben. Die O_2 -Sättigung wird also bereits bei geringeren Partialdrücken erreicht.

b. Hb_F bindet Sauerstoff bei niedrigeren Sauerstoffpartialdrücken als Hb_A . Die Bedeutung liegt in einer besseren Sauerstoffversorgung des Fetus, der sonst aufgrund der Partialdruckverhältnisse bei der Konkurrenz um Sauerstoff nicht ausreichend versorgt werden würde. Der Sauerstoff hat also die Tendenz, von mütterlichem zu fetalem Hämoglobin zu wandern, da er hier bei gleichem Sauerstoffpartialdruck stärker gebunden wird.

A3 Eine CO-Vergiftung wird durch Einatmen von Kohlenstoffmonooxid (CO) hervorgerufen. Dieses hochgiftige Gas entsteht anstelle von CO_2 , wenn Verbrennungsvorgänge durch schlechte Belüftung unvollständig verlaufen. CO ist farb- und geruchlos und weist einen ähnlichen chemischen Aufbau wie O_2 (Sauerstoff) auf. Wird zu viel CO eingeatmet, kann nicht genügend O_2 in die Gewebe des Körpers transportiert werden. Plötzliche Bewusstlosigkeit und Tod sind die Folgen.

a. Erläutern Sie anhand von Abb. 4 die Gefährlichkeit von Kohlenstoffmonooxid.

b. Formulieren Sie eine begründete Hypothese zur Behandlung einer akuten CO-Vergiftung.

a. Hämoglobin ist für den Transport von Sauerstoff verantwortlich. Wird Kohlenstoffmonooxid eingeatmet, bindet dieses mit einer deutlich höheren Affinität als Sauerstoff an das Hämoglobin. Dieses Hämoglobin kann dann keinen Sauerstoff mehr binden, wodurch der Sauerstoffgehalt im Blut absinkt. Dadurch wird der Körper nicht mehr ausreichend mit Sauerstoff versorgt.

b. Kohlenstoffmonooxid kann durch einen hohen Sauerstoffpartialdruck der Einatemluft vom Hämoglobin verdrängt werden. Folglich sollte eine Behandlung vorwiegend aus der Verabreichung von reinem Sauerstoff über eine Atemmaske oder über einen Schlauch in der Luftröhre bestehen, bis das Kohlenstoffmonooxid vollständig vom Hämoglobin verdrängt worden ist.

6

Zellatmung — Energie aus Nährstoffen

S. 112 **6.1** Zellen brauchen organische Moleküle als Baustoffe und Energiequelle**A1**

a. Erklären Sie anhand von Abb. 1, warum ein Organismus bei Gärungsprozessen weniger Energie gewinnen kann als bei der Zellatmung.

b. Entwickeln Sie ein Experiment, an dem man erkennen kann, dass im Ethanol noch viel Energie enthalten ist.

a. Bei Gärungsprozessen wird Energie ausschließlich in der Glykolyse gewonnen. In der Zellatmung schließen sich noch Pyruvatoxidation, Citratzyklus und Atmungskette als Teilprozesse an, in denen Energie in Form von ATP gewonnen wird.

b. Man kann eine kleine Menge Ethanol in einer Abdampfschale verbrennen. Die Brennbarkeit und die dabei frei werdende Wärme zeigen deutlich den Energiegehalt von Ethanol an.

A2

Erklären Sie, warum die Zellatmung nur bei ausreichender Sauerstoffversorgung ablaufen kann.

Der schrittweise Abbau der Glucose in der Zellatmung ist mit einer kontrollierten Verbrennungsreaktion zu beschreiben. Für eine Verbrennung benötigt man einen Brennstoff (Glucose) und Sauerstoff als Reaktionspartner. Ohne ausreichend Sauerstoff kann die Glucose nicht verbrannt werden, in der Zelle laufen dann Gärungsreaktionen ab.

S. 114 **6.2** Die Zellatmung stellt durch schrittweisen Abbau von Glucose Energie bereit**A1**

Erklären Sie, wie das NAD^+ als Elektronenüberträger funktioniert.

In der Zelle werden Elektronen (e^-) meist zusammen mit Protonen (H^+) als einzelne Wasserstoffatome (H) transportiert. Das NAD^+ nimmt hier zwei Elektronen von einem Donator und ein Proton auf und bindet diese fest an sich. Ein weiteres Proton wird locker gebunden. Bei der Elektronenübertragung auf andere Moleküle werden die Protonen wieder frei.

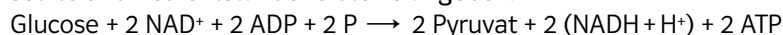
A2

Erläutern Sie, wie die Zelle es schafft, die Brisanz der chemischen Knallgasreaktion zu entschärfen.

Bei der Knallgasreaktion wird die Energie explosionsartig in einem Schritt freigesetzt. Bei der Zellatmung dagegen wird diese Oxidationsreaktion in viele biochemische Teilschritte zerlegt. Die dabei freigesetzten energiereichen Elektronen werden von NAD^+ oder FAD zwischengespeichert und in die Atmungskette eingeschleust und landen schließlich energiearm beim Sauerstoff. Ein Teil der ursprünglichen Energie geht bei jedem Zwischenschritt als Wärme verloren. Der andere Teil liegt am Schluss portioniert in Form von ATP-Molekülen vor.

S. 116 **6.3** Glucose wird im Cytoplasma oxidativ zu Pyruvat abgebaut**A1**

Formulieren Sie für die Glykolyse ein Reaktionsschema, indem Sie eingetzte und neu entstandene Stoffe angeben.

**A2**

Begründen Sie, warum im Rahmen der Glykolyse zunächst Energie investiert werden muss, bevor ATP gewonnen werden kann.

Die Glucose muss zunächst durch enzymatische Anbindung eines Phosphatrests in einen reaktionsfähigen Zustand versetzt werden (Aktivierung). Dieser Aktivierungszustand verhindert gleichzeitig den Rücktransport ins Blut. Das Anheften

eines Phosphatrests (ATP-Verbrauch) wird notwendig, um die Energie für die weiteren Reaktionsschritte zur Verfügung zu stellen.

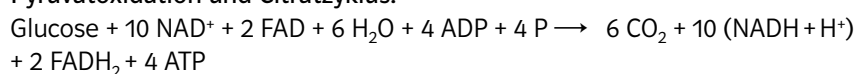
S. 116 **6.4** Pyruvat wird in den Mitochondrien oxidativ zu Kohlenstoffdioxid abgebaut

A1 Glykolyse und Citratzyklus laufen in unterschiedlichen Kompartimenten der Zelle ab. Nennen Sie Vor- und Nachteile.

Vorteile der Kompartimentierung: Die Bereitstellung der Basisenergie (durch anaerobe Glykolyse) wird unabhängig von den Stoffwechselvernetzungen des Citratzyklus sichergestellt.

Nachteile: Es kommt unter Umständen zu Energieverlusten beim Transport von Stoffwechselzwischenprodukten wie NADH über die Mitochondrienmembran.

A2 Formulieren Sie eine Bilanzgleichung für den Glucoseabbau durch Glykolyse, Pyruvatoxidation und Citratzyklus.



S. 120 **6.5** Die Atmungskette nutzt die freigesetzte Energie zur ATP-Bildung

A1 Bei der Zellatmung entstehen CO_2 und H_2O als Endprodukte. Geben Sie an, welche der beiden Verbindungen den eingeatmeten Sauerstoff enthält, und begründen Sie Ihre Aussage.

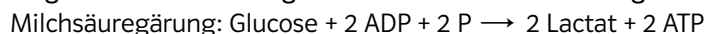
Der eingeatmete Sauerstoff wird in der Atmungskette der Mitochondrien zu Wasser reduziert. Der Sauerstoff im CO_2 entstammt den abgebauten Nährstoffen.

A2 Die Oxidation von FADH_2 führt im Gegensatz zur Oxidation von $\text{NADH} + \text{H}^+$ nicht zur Bildung von drei, sondern nur von zwei Molekülen ATP. Erklären Sie diesen Sachverhalt auch anhand der Abb. 2 und 4.

In der Atmungskette gibt $\text{NADH} + \text{H}^+$ seine beiden Elektronen an der inneren Mitochondrienmembran an den Komplex I ab und wird dabei zu NAD^+ oxidiert. Über die Komplexe III und IV werden diese Elektronen auf Sauerstoff übertragen, wobei Wasser entsteht. Von jedem dieser drei Redoxkomplexe werden 2 Protonen aus der Mitochondrienmatrix in den Intermembranraum gepumpt, woraus der Protonengradient resultiert. Beim Protonenrückfluss in die Matrix durch das Enzym ATP-Synthase wird ATP gebildet. Das Redoxpotenzial von $\text{NADH} + \text{H}^+$ ist negativer als das von FADH_2 . Die Elektronen von FADH_2 werden über den Komplex II in die Atmungskette eingeschleust. Sie durchlaufen also nur die Komplexe III und IV, wodurch der sich bildende Protonengradient geringer ist. Folglich wird über das FADH_2 weniger ATP gebildet.

S. 121 **6.6** Gärung liefert bei Sauerstoffmangel Energie

A1 Formulieren Sie für die Gärungsreaktionen die Reaktionsschemata und vergleichen Sie die Energiebilanzen mit dem vollständigen Glucoseabbau.



Über Gärungsprozesse können Organismen deutlich weniger Energie aus der Glucose gewinnen. Deshalb sind Gärungsreaktionen auch nur bei Sauerstoffmangel eine Alternative zum vollständigen Glucoseabbau, der nur in Anwesenheit von Sauerstoff stattfindet.

A2 Erklären Sie die Bedeutung der Gärungsreaktionen für Organismen.

Die Bedeutung der Gärung liegt darin, NAD^+ aus NADH zu regenerieren und so für die Glykolyse erneut bereitzustellen. Unter Sauerstoffmangel kann NADH nicht in der Atmungskette zu NAD^+ reoxidiert werden und würde sich ohne Gärung anhäufen.

S. 122 **6.7** Der Citratzyklus ist die zentrale Drehscheibe des Zellstoffwechsels**A1** Begründen Sie, warum sich auch bei reiner Protein- und Kohlenhydrat-ernährung Fettpolster entwickeln können.

Acetyl-CoA ist ein zentrales Molekül des Stoffwechsels, das sowohl beim Abbau von Fetten als auch beim Protein- und Kohlenhydratabbau als Zwischenprodukt entsteht. Umgekehrt kann unser Körper aus Acetyl-CoA Fette aufbauen, aber keine Kohlenhydrate. Deshalb bilden sich bei übermäßiger Zufuhr von Proteinen und Kohlenhydraten Fettpolster.

A2 In Sauerstoffmangel-Situationen können in Organismen die toxischen Stoffwechselendprodukte Milchsäure oder Ethanol entstehen. Erklären Sie, warum die vernetzten Stoffwechselprozesse auch einen Schutz vor diesen darstellen, wenn nach einer Sauerstoffmangel-Situation wieder ausreichend Sauerstoff vorhanden ist.

Die Vernetzung der Stoffwechselprozesse stellt einen Schutz vor toxischen Stoffwechselprodukten aus Sauerstoffmangelsituationen dar, da fast alle Teilprozesse auch in umgekehrter Richtung ablaufen können und die Zwischenprodukte so wieder in den aeroben Abbauweg eingeschleust werden können.

S. 123 **6.8** Die Zellatmung wird durch Rückkopplung fein reguliert**A1** Erläutern Sie den biologischen Sinn der Regulation der Glykolyse durch die Phosphofructokinase.

Die Glykolyse wird durch sein sich anhäufendes Endprodukt ATP automatisch abgeschaltet und kommt bei dessen Mangel von selbst wieder in Gang. Die Regulation der Glykolyse über das Schlüsselenzym Phosphofructokinase ermöglicht eine schnelle Reaktion auf kleinste Schwankungen von Stoffkonzentrationen in den Zellen und damit einen sehr effektiven Energiestoffwechsel.

A2 Erläutern Sie, welchen Vorteil die Hemmung durch Rückkopplung im Vergleich zu einer kompetitiven Hemmung (→ 4.7) bietet.

Bei einer kompetitiven Hemmung tritt der Inhibitor (Hemmstoff) mit dem Substrat in einen „Wettbewerb“ um die Bindung am aktiven Zentrum. Seine Hemmwirkung nimmt daher mit zunehmender Substratkonzentration wieder ab, bei gleichbleibender Maximalgeschwindigkeit der Enzymreaktion. Bei der negativen Rückkopplung bindet ein Inhibitor am allosterischen Zentrum des Enzyms und verändert dadurch das aktive Zentrum so, dass keine Anlagerung des Substrats mehr möglich ist. Dadurch wird ein Rückstau im System und somit ein unnötiger Material- und Energieverbrauch verhindert (Beispiel: Phosphofructokinase).

Kombiniere!

A1 Das Taximodell soll die Funktion des NAD^+ als Elektronentransporter (→ Abb. 2, S. 114) veranschaulichen. Beurteilen Sie die Aussagekraft dieses Modells. NAD^+ transportiert Elektronen von einem Ort zum anderen, so wie ein Taxi seine Fahrgäste vom Ausgangsort zum Zielort bringt. Der Ausgangsort kann z. B. eine Teilreaktion der Glykolyse sein. Hier nimmt NAD^+ seine „Gäste“, zwei Elektronen (e^-) und ein Proton (H^+) auf, das zweite Proton „fährt“ locker gebunden auf dem Dachgepäckträger mit. In Form von $\text{NADH} + \text{H}^+$ werden sie zum Zielort, z. B. der Reduktion von Pyruvat zu Lactat, transportiert. Dort steigen die „Gäste“ aus, die beiden Elektronen und die Protonen werden wieder abgespalten. Das „ NAD^+ -Taxi“ ist nun wieder frei und kann erneut „Fahrgäste“ aufnehmen. Das Taximodell stellt anschaulich die Transportfunktion für Elektronen durch NAD^+ dar. Es werden alle Komponenten (NAD^+ , 2e^- und 2H^+) erfasst und die Abläufe korrekt dargestellt. Das Modell ermöglicht eine Vorstellung der Elektronentransportfunktion ohne die Formeldarstellungen des NAD^+ zu betrachten.

A2 Hefepilze der Gattung *Saccharomyces* werden bei der Getränkezubereitung (Bier, Wein) zur Erzeugung von Ethanol eingesetzt. Auch beim Backen nutzt man Hefen: die CO_2 -Bläschen lassen den Teig aufgehen. Der Alkohol verdampft beim Backprozess. Hefen sind fakultative Anaerobier, d. h. sie betreiben in Gegenwart von Sauerstoff Zellatmung und schalten nur unter sauerstoffarmen Bedingungen auf Gärung um. Dieser Vorgang wurde zuerst von dem französischen Biologen und Chemiker Louis Pasteur beschrieben. In einer Versuchsreihe wurde die Glucosekonzentration einer Hefesuspension unter aeroben und anaeroben Bedingungen über einen Zeitraum von 25 Minuten quantitativ bestimmt (→ Abb. 2).

- a. Erläutern Sie die Vorteile, die Hefepilze als fakultative Anaerobier haben.
- b. Formulieren Sie die Fragestellung, die mit der Versuchsreihe von Louis Pasteur untersucht wird.
- c. Erklären Sie die in Abb. 2 dargestellten Versuchsergebnisse.
- d. Zur Vermehrung von Hefe werden gut durchlüftete Fermenter verwendet, der Bierbrauprozess jedoch verläuft unter Luftabschluss. Begründen Sie dieses Vorgehen.
 - a. Hefe kann als „fakultativer Anaerobier“ zwischen Zellatmung und alkoholischer Gärung wechseln. Dies ist abhängig vom Sauerstoffangebot.
 - b. Pasteur hat mit seinem Versuchsansatz zwei Fragestellungen parallel überprüft:
 1. Unterscheidet sich der Glucoseverbrauch einer Hefesuspension für einen festgelegten Zeitraum unter aeroben und anaeroben Bedingungen?
 2. Ändert sich die Temperatur einer Hefesuspension für einen festgelegten Zeitraum unter aeroben und anaeroben Bedingungen?
 - c. Unter anaeroben Bedingungen nimmt die Glucosekonzentration im gleichen Zeitraum stärker ab als unter aeroben. Das liegt daran, dass die Hefe bei Anwesenheit von Sauerstoff mehr Energie pro Mol Glucose gewinnen kann. Die Temperatur steigt unter anaeroben Bedingungen langsamer, weil die Hefe anaerob durch Gärung nur wenig ATP für den Stoffwechsel bereitstellen kann. Aerob betreibt sie mit weniger Glucose intensiver Stoffwechsel, was einen größeren Temperaturanstieg zur Folge hat.
 - d. Wenn Sauerstoff vorhanden ist, nutzen die Hefezellen den effektiveren Stoffwechselweg der Zellatmung zur Energiegewinnung. Dies ermöglicht eine raschere Vermehrung. Da beim Brauprozess kein Sauerstoff vorhanden ist, schaltet die Hefe als „fakultativer Anaerobier“ auf die alkoholische Gärung um.

A3 Der Kenianer David Lekuta Rudisha siegte bei den Olympischen Spielen 2012 in London mit der Weltrekordzeit von 1 : 40,91 Minuten über die 800-Meter-Distanz. Um Rekordzeiten in einem Mittelstreckenlauf zu erreichen, muss der Körper über die gesamte Dauer viel schnell verfügbare Energie für die Muskelarbeit bereitstellen. In der Skelettmuskulatur findet man zusätzlich die Speicherverbindung Kreatinphosphat (→ Abb. 3). Abb. 4 zeigt die Energiebereitstellung während eines 800-m-Laufs.

a. Beschreiben Sie anhand von Abb. 4 die Energiebereitstellung in der Beinmuskulatur beim 800-m-Lauf.

b. Leiten Sie aus Abb. 3 die Funktion des Kreatinphosphats ab und erläutern Sie dessen Rolle bei der Energiebereitstellung.

c. Formulieren Sie eine begründete Hypothese für die während des Laufs auftretende Milchsäuregärung im Muskel.

a. Zu Beginn der körperlichen Belastung werden die ATP-Reserven im Muskel rasch aufgebraucht: Der ATP-Zerfall liefert die Energie für die Muskelarbeit. Der Zerfall von Kreatinphosphat führt zur Neubildung von ATP. Dieses wird aber sofort wieder für die Muskelarbeit verbraucht. Bevor das gespeicherte Kreatinphosphat nach etwa 30 Sekunden aufgebraucht ist, wird beim Abbau von Glucose in der Milchsäuregärung ATP gebildet. Nach 40 Sekunden werden etwa 80 % des Energiebedarfs vom Prozess der Milchsäuregärung bereitgestellt. Nach 70 Sekunden ist es nur noch die Hälfte. Die Zellatmung übernimmt erst mit zeitlicher Verzögerung die Energieversorgung des Muskels und läuft nur langsam an. Nach 40 Sekunden liefert sie ca. 10 % der Energie. Erst nach 70 Sekunden kann die Zellatmung die Hälfte und nach 120 Sekunden ca. 90 % des Energiebedarfs des Muskels decken. Die Zellatmung liefert die höchste Energieausbeute um die Muskeln über einen längeren Zeitraum permanent mit Energie in Form von ATP zu versorgen. Die ersten Phasen überbrücken die Zeit bis zur vollen Leistung der Zellatmung.

b. Dieses Molekül speichert Energie in einer Phosphatbindung, die es auf ADP übertragen kann. Durch eine schnelle Übertragung der in der Phosphatbindung gespeicherten Energie wird ATP bereitgestellt, bis genügend ATP über die anschließenden Stoffwechselwege (Milchsäuregärung und Zellatmung) gewonnen werden kann.

c. Aus der Zellatmung lässt sich der hohe Energiebedarf zunächst nicht decken, da die Sauerstoffversorgung des Muskels so kurzfristig nicht an den hohen Verbrauch angeglichen werden kann. Also wird Energie unter anaeroben Bedingungen über Milchsäuregärung bereitgestellt. Die gebildete Milchsäure wird im Anschluss an die Belastungsphase wieder abgebaut.

S. 127 **7.1** Pflanzen beziehen ihre Stoffwechselenergie aus dem Sonnenlicht

A1 Erklären Sie die Aussage „Sonnenlicht ist die Basis für unsere Ernährung“. Der Mensch ist heterotroph, also fremdernährt. Die Energie der Nahrung, die der Mensch aufnimmt, stammt direkt (bei pflanzlicher Nahrung) oder indirekt (bei tierischer Nahrung) aus dem Sonnenlicht. Denn die autotrophen Pflanzen wandeln in der Fotosynthese die Lichtenergie in Biomasse um.

A2

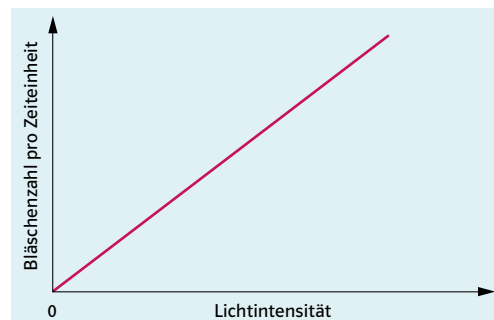
a. Definieren Sie den Begriff „Fotosynthese“.

b. Entwickeln Sie eine Hypothese, wie sich im Experiment in Abb. 2 die Sauerstoffbildung in Abhängigkeit von der Lichtintensität ändert, und erstellen Sie ein Diagramm, in dem Sie Bläschenzahl gegen Lichtintensität auftragen.

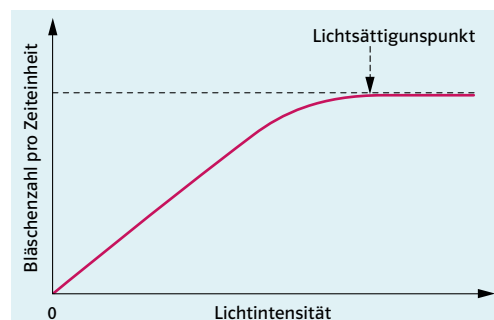
a. Definition: Stoffwechselweg zur Herstellung energiereicher organischer Moleküle aus energiearmen anorganischen Ausgangsstoffen mithilfe von Chlorophyll unter Einwirkung des Sonnenlichts. Durch Fotosynthese wird Biomasse unter CO_2 -Verbrauch aufgebaut, Sauerstoff wird dabei abgegeben.

b. Es sind zwei Lösungen denkbar:

1. Die Fotosyntheserate und damit die Sauerstoffbildung steigt mit größer werdender Lichtintensität.



2. Die Fotosyntheserate und damit die Sauerstoffbildung steigt mit größer werdender Lichtintensität bis zu einem Maximalwert, danach bleibt die Sauerstoffbildung konstant.



Hinweis: Die Hypothesen sollten bei der Bearbeitung von Konzept 7.4 wieder aufgenommen werden.

S. 130 **7.2** Eine große Blattoberfläche ermöglicht Lichtabsorption und Gasaustausch**A1**

a. Vergleichen Sie den Aufbau von Palisadengewebe und Schwammgewebe tabellarisch (→ Abb. 4).

b. Erklären Sie die Unterschiede im Hinblick auf die Konzeptüberschrift.

a.

Merkmal	Palisadengewebe	Schwammgewebe
Aufbau	zellulärer Aufbau aus typischen pflanzlichen Zellen mit Vakuole, Zellkern und Chloroplasten	
Lage	Blattoberseite	Blattunterseite
Zellanordnung im Gewebe	dicht, z.T. mehrschichtig, kleiner Interzellularraum	weitmaschig, großer Interzellularraum
Zellen	sehr chloroplastenreich	weniger Chloroplasten
Leitbündel	nein	ja

b. Das Blatt ist für Gasaustausch, Transpiration und Einfangen von Sonnenlicht optimiert. Zur Lichtabsorption ist das enge, z.T. mehrschichtige und chloroplastenreiche Palisadengewebe an der Blattoberseite angeordnet. An der Blattunterseite, wo sich auch die Spaltöffnungen befinden, befindet sich das weitmaschige Schwammgewebe mit seinem großen Interzellularraum. Dies ermöglicht einen schnellen Gasaustausch und die Transpiration.

A2

Bei vielen Kakteen haben sich im Verlauf der Evolution die Blätter zu „Stacheln“ umgewandelt (botanisch sind dies Dornen). Dies stellt eine Anpassung an heiße, trockene Standorte dar. Stellen Sie eine begründete Hypothese auf, wie effizient ein Kaktus im Vergleich zu einer Blätter tragenden Pflanze Fotosynthese betreiben kann und welche Vorteile sich aus dieser Anpassung ergeben.

Die blattlosen Kakteen haben eine viel geringere innere Oberfläche, über die Wasser verdampfen kann. Daher können sie auch an heißen, trockenen Standorten besser die Transpiration begrenzen. Allerdings ist auch die CO_2 -Aufnahme und damit die Fotosyntheserate begrenzt. Folge: Die Kakteen wachsen langsamer.

S. 132 **7.3** Schließzellen regulieren Gasaustausch und Transpiration**A1**

Das Blatt ist das wichtigste Austausch- und Synthesezentrum der Pflanze. Erklären Sie diese Aussage.

Grüne Blätter sind die bevorzugten Orte des Gasaustauschs über die Spaltöffnungen an der Blattunterseite. Die Transpiration kann über die Spaltöffnungen reguliert werden. Als Hauptort der Fotosynthese sind die Blätter für die autotrophe Ernährung der Pflanze entscheidend, da hier energiereiche Kohlenhydrate synthetisiert werden.

A2

Wenn Gärtner ihre Pflanzen umtopfen, geht dabei häufig ein Teil der Wurzeln verloren. Danach werden die Pflanzen oft für einige Tage mit Wasser eingeebelt, oder es wird auf andere Weise für hohe Luftfeuchtigkeit gesorgt. Manchmal werden auch Substanzen eingesetzt, die teilweise die Stomata verkleben. Begründen Sie diese Maßnahmen.

Durch den Wurzelverlust ist die Wasseraufnahme verlangsamt. Alle genannten Maßnahmen verringern die Transpiration und schützen damit die umgetopften Pflanzen vor zu großem Wasserverlust und damit vor dem Verwelken.

S. 134 7.4 Licht, CO₂ und Temperatur beeinflussen die Fotosyntheseleistung

A1 Viele Gärtnereien begasen die Pflanzen in ihren Gewächshäusern mit Kohlenstoffdioxid. Erklären Sie die Wirkung dieser Maßnahme auch unter Berücksichtigung von Abb. 1b.

Bei optimalen Licht- und Temperaturbedingungen in Gewächshäusern wirkt der CO₂-Gehalt als begrenzender Faktor. Um die Fotosyntheserate zu erhöhen und damit das Pflanzenwachstum zu beschleunigen, wird der CO₂-Gehalt künstlich erhöht.

A2 Die Abhängigkeit der Fotosyntheserate von verschiedenen Umweltfaktoren in Abb. 1 ist jeweils so gemessen worden, dass die nicht veränderten Faktoren optimal eingestellt sind und eine maximale Fotosyntheserate ermöglichen. Stellen Sie eine begründete Hypothese zum Verlauf der Kurve in Abb. 1c auf, wenn

- a. gleichzeitig nur Schwachlichtbedingungen herrschen oder
- b. die Luftfeuchte relativ niedrig ist.

a. Aus Kurve 1a wird deutlich, dass Schwachlicht die Fotosynthese begrenzt. Also wird das Maximum in Abb. 1c deutlich niedriger liegen.

b. Wenn mehr Spaltöffnungen bei geringer Luftfeuchte geschlossen bleiben, kann die Kurve 1c etwas zu tieferen Temperaturen verschoben sein, begrenzend wirkt dann auch der CO₂-Gehalt in den Interzellularräumen. Das Optimum wird vermutlich bei einem geringeren Wert liegen.

S. 136 7.5 Wasser verteilt Mineralstoffe und Assimilate über getrennte Leitungsbahnen

A1 Erklären Sie folgende Aussage: In einer Pflanze arbeiten Blätter und Wurzeln zusammen wie in einem Brunnen eine Saug- und eine Druckpumpe.

Mit der Aussage wird versucht, den Wassertransport in der Pflanze von unten nach oben zu erklären. Die Blätter werden als Saugpumpe bezeichnet, da durch die Wasserverdunstung ein Transpirationssog entsteht. Die Zellen im Schwammgewebe ziehen Wasser aus den Blattadern nach. Dieser Unterdruck setzt sich bis in den oberen Teil des Xylems fort und saugt hier das Wasser nach oben. Die Wurzeln werden als Druckpumpe bezeichnet, da sich durch den osmotischen Wassertransport in die Wurzel am unteren Ende des Xylems der Wurzeldruck aufbaut und so für den Aufwärtstransport des Wassers sorgt. In diesem Vergleich fehlen jedoch die beim Wassertransport unterstützend wirkenden Kapillarkräfte.

A2 In den frühen Morgenstunden, wenn die kühle Morgenluft wassergesättigt ist, sehen Sie häufig an Blatträndern oder -spitzen kleine Flüssigkeitströpfchen. Diese Tropfen werden oft irrtümlich für Tau gehalten. In Wirklichkeit handelt es sich um Flüssigkeit aus dem Xylem, die nach außen abgegeben wird. Erklären Sie diese auch Guttation genannte Flüssigkeitsabgabe und geben Sie an, worin der Vorteil für die Pflanzen liegt.

Die Flüssigkeitsabgabe wird durch den Wurzeldruck angetrieben. So können in den Gefäßen des Xylems auch noch Mineralstoffe von der Wurzel in die Blätter transportiert werden, wenn wegen der wassergesättigten Luft keine Transpiration mehr möglich ist.

S. 137 **7.6** Viele Mineralstoffe sind für Pflanzen essenziell

A1 Ein Hobbygärtner folgt beim Düngen seiner Zierpflanzen dem Motto „viel hilft viel“. Nehmen Sie Stellung zu dieser Haltung.

Nach dem Gesetz des Minimums bestimmt der am meisten fehlende Mineralstoff die Geschwindigkeit des Pflanzenwachstums. Mit „Viel hilft viel“ kann der Gärtner mögliche Mangelercheinungen nicht gezielt ausgleichen. Er sollte sich an die vom Hersteller empfohlene Dosierung halten oder ggf. eine Bodenanalyse durchführen lassen, um fehlende Mineralstoffe im Boden speziell nachzudüngen. Durch eine zu starke Düngung können die Wurzeln osmotisch geschädigt werden und die Pflanzen gehen ein.

A2 Seit Jahren weiß man, dass das Element Selen (Se) für uns ein unverzichtbarer Mineralstoff ist. Im menschlichen Stoffwechsel wird es in die Aminosäure Selenocystein eingebaut. Selen liegt in Böden oft als Selenit (SeO_3^{2-}) oder Selenat (SeO_4^{2-}) vor. Entwickeln Sie ein Experiment, um herauszufinden, ob es auch für Pflanzen essenziell ist.

Man lässt geeignete Pflanzen nicht in Erde wurzeln, sondern in einer sorgfältig hergestellten Nährlösung, die alle notwendigen Mineralstoffe enthält, nur kein Selen. Wenn diese Pflanzen verkümmern, dann ist Selen essenziell. Parallel muss ein Kontrollexperiment angesetzt werden, in dem die Nährlösung Selen enthält. Wenn diese Pflanzen gedeihen, ist das Ergebnis bestätigt.

S. 138 **7.7** Dünger versorgt Pflanzen mit zusätzlichen Mineralstoffen

A1 Recherchieren Sie für verschiedene Nutzpflanzen den Mineralstoffbedarf (N-P-K-Mg) in kg/ha und machen Sie einen Vorschlag, wie eine bedarfsgerechte Düngung mit mineralischem Volldünger erfolgen kann.

individuelle Schülerleistung, z. B.:

Pflanze	N	P	K	Mg
Roggen	90	26	83	15
Hafer	110	30	130	12
Wintergerste	120	20	115	27
Sommergerste	100	20	100	13
Kartoffel	140	33	200	9
Winterweizen	130	26	115	18
Sommerweizen	110	20	83	15
Winterraps	130	26	170	27
Zuckerrüben	300	44	400	45

Vorschlag: Zunächst sollte über eine Bodenanalyse der Düngbedarf für die Fläche ermittelt werden. Dann sollten die Einzelkomponenten nach Bedarf zusammen gemischt und auf die Fläche ausgebracht werden. Die Düngung sollte in mehreren Etappen erfolgen, da die Pflanzen über die gesamte Wachstumsphase Mineralstoffe benötigen.

A2 Stellen Sie Vermutungen an, welche Faktoren eine hohe Nitratbelastung durch Überdüngung begünstigen.

Mögliche Faktoren könnten sein:

- Starkregen während oder kurz nach der Düngung
- sandige Böden, die wenig Mineralstoffe speichern können
- Feuchtgebiete und große Nähe zu Oberflächenwasser
- ...

S. 139 **7.8** Auch Pflanzen müssen atmen

A1 Eine einjährige Pflanze keimt zu Beginn einer Saison, wächst und geht beim ersten Frost ein. Nehmen Sie Stellung zu der Frage, ob in der Lebensbilanz dieser Pflanze die geleistete Fotosynthese oder die Zellatmung überwiegt.

Sie hat mehr Fotosynthese betrieben. Die erfrorene Pflanze besteht zum größten Teil aus organischen Materialien. Diese hat sie aus anorganischen Materialien synthetisiert und noch nicht durch Zellatmung verbraucht.

A2 Nennen Sie Argumente für die Aussage im Konzept „Auch Pflanzen müssen atmen“.

- Keimende Pflanzensamen haben einen intensiven Stoffwechsel, in dem energiereiche Vorratsstoffe wie Stärke verarbeitet werden.
- Andere nichtgrüne Pflanzenorgane wie Blütenblätter und reife Früchte können keine Fotosynthese betreiben.
- Grüne Blätter veratmen nachts einen Teil der Kohlenhydrate, die sie tagsüber fotosynthetisch als Glucose erzeugt und als Stärke in den Chloroplasten gespeichert haben.
- Nichtgrüne Pflanzenorgane wie die Wurzeln sind darauf angewiesen, Tag und Nacht von den Blättern mit Kohlenhydraten versorgt zu werden.
- ...

S. 140

Kombiniere!

A1 Ein Maß für die Fotosyntheserate ist die von der Pflanze abgegebene Sauerstoffmenge. Genauer als die „Bläschenzählmethode“ (S. 127) ist der Nachweis von Sauerstoff in einer Farbreaktion. Der Farbstoff Indigocarmin ist im reduzierten Zustand gelb und im oxidierten blau. Mithilfe dieses Farbstoffs kann die Fotosyntheserate der Wasserpest (*Elodea*) experimentell bei unterschiedlichen Bedingungen untersucht werden (→ Abb. 1). In Abb. 2 sind sieben verschiedene Versuchsansätze aufgeführt, bei denen die Fotosyntheserate anhand der Farbreaktion untersucht wurde.

a. Geben Sie an, in welchen Ansätzen Sie eine Blaufärbung vermuten und in welchen nicht. Begründen Sie Ihre Entscheidung.

b. Begründen Sie für die Ansätze, in denen Sie eine Blaufärbung vermuten, eine zeitliche Reihenfolge zum Beginn der Blaufärbung.

a. Eine Blaufärbung ist in den Ansätzen 4, 5 und 6 zu erwarten, da hier alle für die Fotosynthese benötigten Faktoren (Pflanze, Licht, CO₂ und Wasser) vorliegen.

b. Keine Blaufärbung ist in den Ansätzen 1, 2, 3 und 7 zu erwarten, da hier jeweils ein für die Fotosynthese benötigter Faktor fehlt (1: Pflanze, 2: Licht, 3: CO₂ bzw. in Ansatz 7 die Temperatur zu hoch ist und die Enzyme denaturieren).

A2 Die Abhängigkeit der Fotosynthese von den äußeren Faktoren ist häufig untersucht worden.

a. Leiten Sie aus Abb. 3 den Zusammenhang zwischen der Fotosyntheseintensität und der Kohlenstoffdioxidkonzentration ab.

b. Beschreiben Sie einen Versuchsaufbau, mit dem die Ergebnisse in Abb. 3 ermittelt werden können.

c. Erläutern Sie die Aussage „Die Fotosynthese wird durch unterschiedliche Faktoren begrenzt“ und nennen Sie die Konsequenzen, die ein Gärtner für das effiziente Betreiben von Gewächshäusern ziehen sollte.

a. Bei konstanter Temperatur und gleichbleibender Versorgung mit Licht nimmt die Fotosyntheserate mit wachsender Kohlenstoffdioxidkonzentration zunächst zu. Ab einer bestimmten Kohlenstoffdioxidkonzentration ist jedoch keine weitere Steigerung mehr zu verzeichnen und man erhält eine Sättigungskurve. Dabei bleibt bei Schwachlichtbedingungen die Fotosyntheseleistung deutlich niedriger.

b. Ein möglicher Versuchsaufbau ist in Konzept 7.1 (→ S. 127, Abb. 2 (rechtes Foto)) dargestellt.

c. Günstig sind hohe Lichtintensitäten, eine ausreichende Versorgung der Pflanze mit Kohlenstoffdioxid sowie eine optimale Temperatur, an die die jeweilige Pflanzenart angepasst ist. Zu geringe, aber auch zu hohe Lichtintensitäten, ein unzureichendes CO₂-Angebot und zu niedrige oder zu hohe Temperaturen verringern die Fotosyntheseleistung.

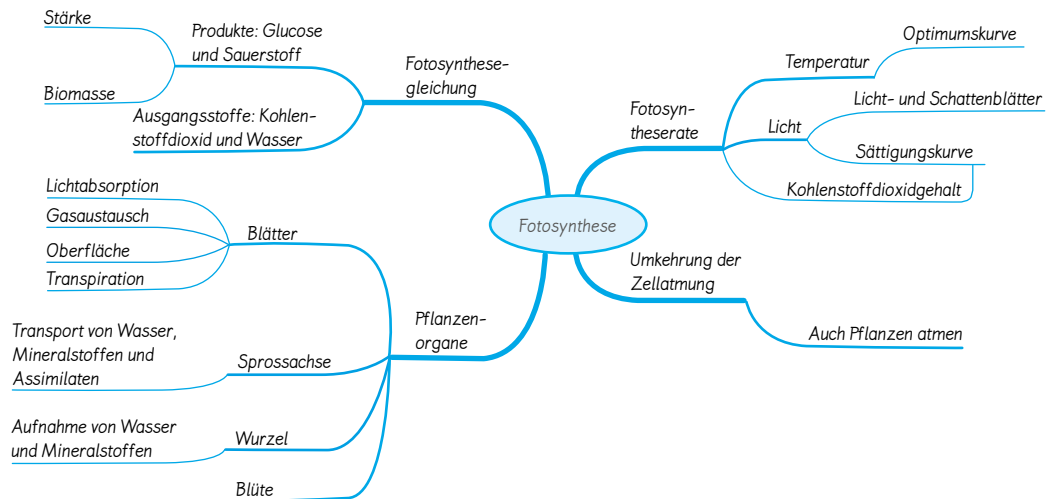
Folglich muss der Gärtner alle Faktoren in seinen Gewächshäusern im Blick behalten und für die Pflanzen in seinem Gewächshaus möglichst nah am Optimum halten. Denn der Faktor, der am weitesten vom Optimum entfernt ist, begrenzt die Fotosynthese am stärksten.

A3 Bis vor einigen Hundert Jahren nahm man an, dass Pflanzen aus der Erde Substanzen aufnehmen und diese für den Aufbau ihrer Biomasse, also für neue Blätter oder Äste, nutzen. Der Naturforscher Johann Baptista van Helmont machte dann um 1640 ein Experiment zum Wachstum von Bäumen. Van Helmont pflanzte ein Weidenbäumchen von 2,5 kg in einen Kübel, in dem sich eine genau abgewogene Menge Erde befand. Fünf Jahre lang goss er die Pflanze nur mit Regenwasser und achtete darauf, dass keine Erde hinzukam oder weggespült wurde. Nach 5 Jahren wog das Weidenbäumchen 84,5 kg.

- a.** Erklären Sie in Grundzügen die Vorgänge bei der Fotosynthese
- b.** Formulieren Sie die Hypothese, die van Helmont mit seinem Experiment untersucht hat.
- c.** Beschreiben Sie die Versuchsergebnisse und deuten Sie diese aus der Sicht von van Helmont.
- d.** Erläutern Sie die Versuchsbedingungen und die Bedeutung der Erde in diesem Experiment.
 - a.** individuelle Schülerleistung, z. B.: Bei der Fotosynthese wird in grünen Blättern aus energiearmen Ausgangsstoffen (Kohlenstoffdioxid und Wasser) energiereiche Glucose hergestellt. Als Abfallprodukt entsteht Sauerstoff. Dazu wird die von den Blattpigmenten absorbierte Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt. Dieser Prozess stellt die Basis für alle Nahrungsketten dar.
 - b.** Mögliche Hypothese: Eine Pflanze benötigt zum Wachsen nur Luft, Licht und Wasser.
 - c.** Nach fünf Jahren hat die Masse der Erde um 0,1 kg abgenommen, die Masse des Baums ist um 82 kg gestiegen. Die Hypothese von van Helmont wurde bestätigt. Da die Masse der Erde nur unmerklich abgenommen, die des Baumes aber deutlich zugenommen hat, sind nur Luft, Licht und Wasser für das Wachstum einer Pflanze erforderlich.
 - d.** Van Helmont hat auf konstante Versuchsbedingungen geachtet. Vor allem der Gedanke, darauf zu achten, dass keine Erde weggespült oder abgetragen wurde, war sehr wichtig für seine Erkenntnisse. Van Helmont wusste zu seiner Zeit noch nichts von Mineralstoffen im Boden, die für das Wachstum einer Pflanze essenziell sind. Offensichtlich war die Erde aber mineralreich genug, damit er diese Ergebnisse erhalten konnte. So lässt sich auch die geringe Massendifferenz erklären.

S. 143 **8.1** Fotosynthese ist die Umkehrung von Verbrennung oder Zellatmung**A1**

- a. Erstellen Sie eine Mind-Map zum Begriff „Fotosynthese“.
 b. Pflanzen bilden in chlorophyllhaltigen Zellen gleichzeitig Wasserstoff und Sauerstoff. Trotzdem kommt es nicht zur Knallgasreaktion. Erläutern Sie diesen Sachverhalt.
 a. individuelle Schülerlösung, z. B.:

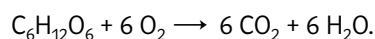


Hinweis: Die Mind-Map kann im weiteren Unterrichtsverlauf ergänzt und modifiziert werden.

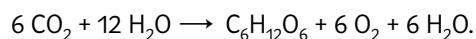
- b. Der Wasserstoff liegt in den Zellen nicht elementar vor, sondern an biologische Überträger gebunden, also in Form von NAD^+ (oder NADP^+) + H^+ . Dadurch kann in der Atmung die Reaktion zwischen dem gebundenen Wasserstoff und Sauerstoff kontrolliert ablaufen und zur Erzeugung von ATP dienen.

A2 Erklären Sie, welche Bedeutung die Verwendung des Sauerstoffisotops ^{18}O für die Aufklärung der Vorgänge bei der Fotosynthese hatte. Verwenden Sie dabei auch Reaktionsgleichungen.

Die Fotosynthese ist die Umkehrung der Zellatmung. Die Gesamtgleichung der Zellatmung lautet:



Die Gesamtgleichung der Fotosynthese lautet:



Mit der Isotopenmarkierung hat man herausgefunden, dass der bei der Fotosynthese frei werdende Sauerstoff ausschließlich aus der Wasserspaltung stammt.

S. 145 **8.2 Die Fotosynthesefarbstoffe fangen blaues und rotes Licht ein**

A1 Experimente haben bei der Aufklärung der Vorgänge bei der Fotosynthese eine entscheidende Rolle gespielt.

a. Formulieren Sie eine begründete Hypothese, welches Ergebnis in Abb. 1 zu erwarten wäre, wenn man vor das Prisma einen Rotfilter setzt.

b. Geben Sie an, worauf die Trennung der Pigmente bei der Dünnschichtchromatografie beruht, und erklären Sie die Position von β -Carotin im Chromatogramm in Abb. 2.

a. Wenn mithilfe eines Filters der rote Spektralbereich aus dem Licht entfernt wird, kann die Alge in diesem Bereich keine Fotosynthese betreiben. Es wird dort also kein Sauerstoff gebildet und folglich werden sich auch keine sauerstoffliebenden Bakterien anreichern.

b. Die Gründe für die Auftrennung des Farbstoffgemischs bei der Dünnschichtchromatografie sind die Löslichkeit der Farbstoffe im verwendeten Laufmittel, die Adsorption, also die Wechselwirkung mit dem Trägermaterial und die Molekülgröße/Molekülmasse. β -Carotin ist offensichtlich am besten im unpolaren Laufmittel löslich und hat die geringste Wechselwirkung mit dem polaren Trägermaterial, da es am weitesten nach oben gelaufen ist.

A2 Erklären Sie mithilfe des Absorptionsspektrums, warum uns Chlorophyll grün erscheint.

Der Blattfarbstoff Chlorophyll absorbiert vor allem kurzwelliges und langwelliges rotes Licht. Der mittlere Spektralbereich mit dem kompletten Grünbereich dagegen wird weitgehend verlustfrei reflektiert. Es existiert also eine „Grünlücke“, die wir wahrnehmen.

S. 146 **8.3 Die Fotosynthesefarbstoffe sind an Membranproteine gebunden**

A1 Erklären Sie mithilfe der Absorptionsspektren in Abb. 3, S. 145, die Bedeutung der Lichtsammelpigmente.

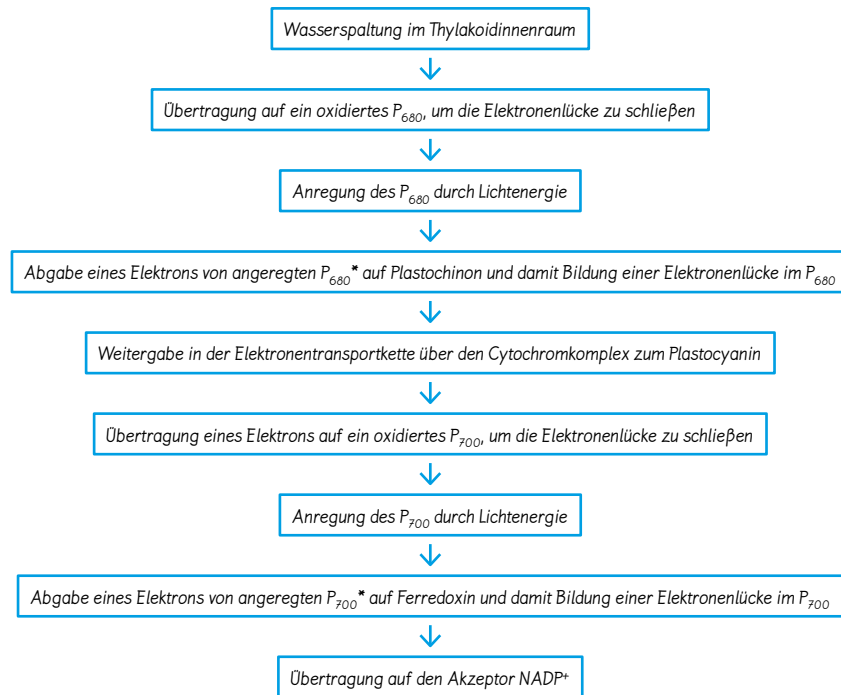
In jedem Reaktionszentrum befindet sich ein spezielles Chlorophyll-a-Molekül, wo die Anregungsenergie in chemische Energie umgewandelt wird. Die Lichtsammelpigmente (weitere Chlorophylle und Carotinoide) erweitern den Bereich des absorbierten Lichts, da sie andere Wellenlängen als Chlorophyll a absorbieren und diese Energie auf das Chlorophyll a im Reaktionszentrum transferieren.

A2 Ein Gärtner beobachtet, dass sich die Blätter seiner Tomatenpflanzen gelblich verfärben. Eine Untersuchung der Pflanzen ergibt Magnesiummangel. Erklären Sie die Blattverfärbung und geben Sie Ratschläge zur Abhilfe.

Bei Magnesiummangel ist die Synthese von Chlorophyll beeinträchtigt, da jedes Chlorophyllmolekül im Porphyrinring ein komplex gebundenes Magnesium-Ion enthält. Die Verwendung eines magnesiumhaltigen Düngers könnte Abhilfe schaffen.

S. 149 **8.4** Der lichtabhängige Elektronentransport ermöglicht die Synthese von ATP**A1**

- a.** Stellen Sie den Weg eines Elektrons von der Fotolyse des Wassers bis zum Akzeptor NADP^+ in einem Flussdiagramm dar.
b. Erklären Sie mithilfe des Z-Schemas ($\rightarrow$ Abb. 2) die Notwendigkeit von zwei Fotosystemen bei der Fotosynthese.

a.

- b.** Die zwei Fotosysteme sind notwendig, um die Elektronen vom Donator (Wasser) auf den Akzeptor (NADP^+) zu übertragen. Das angeregte P_{680}^* kann die Elektronen nicht auf den primären Akzeptor Ferredoxin und damit auf das NADP^+ übertragen, da die Elektronen immer nur energetisch bergab weitergegeben werden können. Aus dem gleichen Grund kann das P_{700} keine Elektronen aus der Wasserspaltung aufnehmen. Die zwei Fotosysteme sind also notwendig, um die Differenz im Redoxpotenzial zwischen Donator und Akzeptor zu überwinden. Das Chlorophyll dient hier als Elektronentransporter.

A2

Viele Herbizide (Unkrautbekämpfungsmittel) enthalten sogenannte Entkoppler. Das sind Substanzen, die die Thylakoidmembranen für Protonen durchlässig machen. Erklären Sie deren Giftigkeit für Pflanzen.
 Diese Substanzen lassen die im Thylakoidinnenraum angehäuften Protonen zurückfließen. Damit bricht das Protonenkonzentrationsgefälle zusammen und die ATP-Synthase stellt kein ATP mehr her. Ohne ATP kann die Pflanze ihren Stoffwechsel nicht aufrechterhalten.

S. 151 8.5 Aus sechs CO_2 -Molekülen wird lichtunabhängig ein Zuckermolekül aufgebaut

A1

- a. Stellen Sie den Calvinzyklus in einem Flussdiagramm dar.
 b. In der in Abb. 1 beschriebenen Versuchsanordnung zeigen sich nach längerer Reaktionszeit für die Algen weitere radioaktive Flecken auf dem Chromatographiepapier, also weitere Substanzen, die das neu assimilierte CO_2 enthalten. Stellen Sie eine begründete Vermutung an, um welche Substanzen es sich handelt.

a.

CO_2 -Fixierung: 6 CO_2 werden durch das Enzym Rubisco auf Ribulose-1,5-bisphosphat (6 C_5) übertragen



Es entstehen 6 C_6 -Körper, die sofort in 12 3-Phosphoglycerinsäure (12 C_3) zerfallen



Reduktion von 3-Phosphoglycerinsäure zu 3-Phosphoglycerinaldehyd (12 C_3) unter Verbrauch von ATP und $\text{NADPH} + \text{H}^+$



Regeneration von 6 Ribulose-1,5-bisphosphat (6 C_5) aus 10 3-Phosphoglycerinaldehyd (10 C_3) unter ATP-Verbrauch



Bildung von Glucose (C_6 -Zucker) aus den 2 verbleibenden 3-Phosphoglycerinaldehyd (2 C_3 -Zucker)

- b. Es wird sich um die weiteren Stoffe des Calvinzyklus, also 3-Phosphoglycerinaldehyd und Ribulose-1,5-bisphosphat, sowie das Produkt Glucose handeln, da das radioaktiv markierte $^{14}\text{O}_2$ nach der Fixierung in der Reduktion und der Regeneration weitergegeben wird.

A2 Oft werden die Reaktionen des Calvinzyklus als die „Dunkelreaktionen“ der Fotosynthese bezeichnet. Erklären Sie, warum diese Bezeichnung irreführend ist. Die Bezeichnung „Dunkelreaktion“ ist irreführend, da man vermuten könnte, dass diese Reaktionen ohne Licht ablaufen. In den lichtabhängigen Reaktionen werden jedoch das Reduktionsmittel $\text{NADPH} + \text{H}^+$ und der Energieträger ATP hergestellt, mit deren Hilfe dann aus CO_2 der Zucker hergestellt wird. Deshalb ist der Begriff „lichtunabhängige Reaktion“ genauer.

S. 153 8.6 Manche Bakterien können ganz ohne Licht und organische Nährstoffe leben

A1 Symbiose bezeichnet das körperlich sehr enge Zusammenleben zweier Arten zum gegenseitigen Nutzen. Beschreiben Sie die gegenseitige Abhängigkeit von Bartwürmern und chemoautotrophen Bakterien.

Die Bakterien sind in der Lage, mittels Chemosynthese Glucose aufzubauen, von der sich die Bartwürmer ernähren. Die Bakterien haben einen geschützten Lebensraum, wo sie ständig mit Schwefelwasserstoff versorgt sind.

A2 Erklären Sie folgende Aussage: „Die Chemosynthese stellt im Gegensatz zur Fotosynthese keinen Energiegewinn im globalen Energiehaushalt dar, sondern nur eine Energieumverteilung.“

Die bei der Fotosynthese verwendete Sonnenenergie wird von außen zusätzlich in die Biosphäre eingebracht. Bei der Chemosynthese wird von den Lebewesen chemisch gebundene Energie genutzt, die bereits gespeichert war.

Kombiniere!

A1 Vergleichen Sie den Blattquerschnitt der C_4 -Pflanze in Abb. 1a mit dem einer typischen C_3 -Pflanze (→ S. 129).

Gemeinsamkeiten: Beide Blattquerschnitte besitzen eine Kutikula an Blattober- und Blattunterseite, eine einschichtige obere und untere Epidermis (chloroplastenfrei), Spaltöffnungen unten, Assimilationsgewebe, Leitbündel.

Unterschiede: Dickere Kutikula an der Blattober- als auf der Blattunterseite, der Blattquerschnitt der C_4 -Pflanze Mais ist von oben und unten symmetrisch und nicht wie bei der C_3 -Pflanze Buche getrennt in Palisaden- und Schwammgewebe, C_4 -Pflanzen weisen Mesophyllzellen mit Chloroplasten und Bündelscheidenzellen mit Chloroplasten auf. Die Bündelscheidenzellen sind um die Leitbündel herum angeordnet.

A2 Beschreiben Sie die Stoffwechselvorgänge in den Blattzellen einer Maispflanze (→ Abb. 1b).

Kohlenstoffdioxid der Luft wird in den Mesophyllzellen durch das Enzym PEP-Carboxylase an PEP gebunden, das Zwischenprodukt ist Malat. Malat wandert in Bündelscheidenzellen, wo Kohlenstoffdioxid wieder abgespalten wird. Der CO_2 -Akzeptor PEP wird in Mesophyllzellen aus Pyruvat zurückgebildet, das Kohlenstoffdioxid in Bündelscheidenzellen wird wie bei C_3 -Pflanzen im Calvinzyklus umgesetzt. Man beobachtet also eine räumliche Trennung zwischen der ersten CO_2 -Fixierung und der Weiterverarbeitung im Calvinzyklus.

A3 Erläutern Sie unter Berücksichtigung von Abb. 2, unter welchen Bedingungen C_3 -Pflanzen und unter welchen die C_4 -Pflanzen im Vorteil sind.

Das Diagramm zeigt die Kohlenstoffdioxidaufnahme und -abgabe von C_3 - und C_4 -Pflanzen bei gleichen Bedingungen (Licht, Temperatur ...) in Abhängigkeit von der Kohlenstoffdioxidkonzentration. Die deutlich stärkere Fotosyntheseleistung der C_4 -Pflanze im Vergleich zur C_3 -Pflanze bei geringeren Kohlenstoffdioxidkonzentrationen lässt sich auf die Besonderheit der PEP-Carboxylase zurückführen, die in diesem Bereich eine höhere Kohlenstoffdioxidaffinität hat als die Rubisco. Erst bei einer Kohlenstoffdioxidkonzentration ab 0,08 % erzielt die C_3 -Pflanze eine höhere Fotosyntheserate. Bei der natürlichen Kohlenstoffdioxidkonzentration der Luft von etwa 0,03 % ist die C_4 -Pflanze der C_3 -Pflanze überlegen und kann etwa doppelt so viel Kohlenstoffdioxid binden.

A4 Beschreiben Sie das stoffwechselphysiologische Dilemma von Pflanzen an warm-trockenen Standorten und erläutern Sie, wie C_4 -Pflanzen an diese Situation angepasst sind.

Das Problem an warm-trockenen Standorten ist, den Wasserverlust gering zu halten und trotzdem genügend CO_2 aufzunehmen, um Fotosynthese betreiben zu können, also „verhungern oder verdursten“. Die Lösung ist die räumliche Trennung von CO_2 -Fixierung und CO_2 -Verarbeitung. Die erste Kohlenstoffdioxidfixierung durch die PEP-Carboxylase erfolgt effektiv auch bei geringeren Kohlenstoffdioxidkonzentrationen, also auch bei geringerer Spaltöffnungsweite. Der Wasserverlust der Pflanze wird so gering gehalten, sie kann aber dennoch effektiv Fotosynthese betreiben.

A5 Stellen Sie eine Hypothese hinsichtlich des Verlaufs der Kohlenstoffdioxidkonzentration in dem Gefäß auf (→ Abb. 3) und begründen Sie diese.

Die Kohlenstoffdioxidkonzentration sinkt zunächst relativ stark, da beide Pflanzen Fotosynthese betreiben und dabei Kohlenstoffdioxid aufnehmen. Ist der Kompensationspunkt der C_3 -Pflanze erreicht, nimmt die C_4 -Pflanze wegen ihres niedrigeren Kompensationspunktes weiterhin Kohlenstoffdioxid auf. Das verringert zusätzlich den Kohlenstoffdioxidgehalt in dem Gefäß. Infolgedessen gerät die C_3 -Pflanze in den Bereich der Kohlenstoffdioxidabgabe und der Kohlenstoffdioxidgehalt im Gefäß steigt. Durch die Kohlenstoffdioxidabgabe geht die C_3 -Pflanze schließlich

ein und ihre Kohlenstoffdioxidabgabe entfällt. Der Kohlenstoffdioxidgehalt im Gefäß fällt aufgrund der Fotosyntheseleistung der C_4 -Pflanze wieder bis auf ihren Kompensationspunkt. Ab diesem Zeitpunkt ändert sich die Kohlenstoffdioxidkonzentration nicht mehr, da Fotosynthese und Zellatmung im Gleichgewicht sind.

S. 155

Abi-Training**A1** Vergleichen Sie die Ergebnisse zum Kohlenstoffdioxidgaswechsel von Bohne und Brutblatt in Abb. 3.

Die Bohne nimmt tagsüber Kohlenstoffdioxid auf, nachts wird Kohlenstoffdioxid abgegeben. Der Kohlenstoffdioxidgaswechsel begründet sich über die ablaufenden Stoffwechselprozesse, da am Tage die Fotosynthese die Zellatmung überwiegt. Beim Brutblatt findet die Kohlenstoffdioxidaufnahme nachts statt. Tagsüber ist die Kohlenstoffdioxidbilanz ausgeglichen, es erfolgt weder eine Kohlenstoffdioxidaufnahme noch -abgabe.

A2 Erklären Sie die Änderung im pH-Wert und im Glucosegehalt (→ Abb. 2) einer Mesophyllzelle anhand des Schemas in Abb. 4.

Der relative Glucosegehalt steigt von 6 Uhr bis 18 Uhr aufgrund der Fotosyntheseleistung der Pflanze an, sinkt im Verlauf der Nacht aber wieder ab, da hier ausschließlich Zellatmung betrieben wird. Der pH-Wert in den Vakuolen der Mesophyllzellen steigt von 6 Uhr (pH 3) bis 18 Uhr (pH 6) an und sinkt im Verlauf der Nacht wieder auf etwa pH 3. Da nachts der pH-Wert der Vakuolen sinkt, muss also eine Säure angereichert werden. Das Malat (Äpfelsäure) wird nachts in die Vakuolen transportiert. Tagsüber wird das Malat wieder aus den Vakuolen abgegeben, es ist also weniger Säure in den Vakuolen vorhanden, der pH-Wert steigt. Die pH-Wert-Änderung korreliert mit dem CO_2 -Gasaustausch. Das CO_2 wird nachts aufgenommen und in Form der Äpfelsäure (als Reaktionsprodukt) gespeichert. Tagsüber wird die Säure dann abgebaut und CO_2 wird freigesetzt.

A3 Erläutern Sie die Vorteile der zeitlichen Trennung von CO_2 -Fixierung und Calvinzyklus bei den CAM-Pflanzen.

Das Kohlenstoffdioxid wird nachts bei geöffneten Stomata aufgenommen und in Form von Malat in den Vakuolen der Mesophyllzellen gespeichert. In der Nacht bedeuten geöffnete Stomata einen wesentlich geringeren Wasserverlust. Tagsüber wird das Malat zurück ins Cytoplasma transportiert, abgebaut und Kohlenstoffdioxid wieder freigesetzt. Der Pflanze steht so, trotz geschlossener Stomata am Tage, Kohlenstoffdioxid für die Fotosynthesereaktionen zur Verfügung.

A4 Stellen Sie eine begründete Hypothese zur Wachstumsrate von CAM-Pflanzen im Vergleich zu der von C_3 - und C_4 -Pflanzen auf.

Die Wachstumsrate der CAM-Pflanzen wird am geringsten sein, da tagsüber nur so viel CO_2 verarbeitet werden kann, wie nachts als Malat fixiert worden ist. Die C_4 -Pflanzen sind den C_3 -Pflanzen bei „normalen“ CO_2 -Konzentrationen überlegen, da sie das Kohlenstoffdioxid über die PEP-Carboxylase schneller fixieren können. Folglich werden sie die größte Zuwachsrate haben.