

Smarte Experimente

zur Fotosynthese und ihren Einflussfaktoren

Liane Becker, Saskia Meyer-Rühen, Daniel Dreesmann

AG Didaktik der Biologie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Johannes-von-Müller-Weg 6, 55128 Mainz, liane.becker@uni-mainz.de, daniel.dreesmann@uni-mainz.de

Mit digitalen Messsensoren können abiotische Umweltfaktoren als Einflussfaktoren der Fotosynthese im Klassenraum in Echtzeit gemessen und über eine App auf einem digitalen Endgerät ausgewertet werden. Somit können digitale Messsensoren als zeitgemäßes Tool in den Biologieunterricht der Oberstufe im Rahmen von leicht umsetzbaren, „smarten“ Experimenten integriert werden. Für das Thema Fotosynthese bieten Experimente eine gewinnbringende Ergänzung zur komplexen und nicht direkt beobachtbaren Theorie der stoffwechselphysiologischen Prozesse und unterstützen deren Verständnis.

Stichwörter: Fotosynthese, Fotosyntheseleistung, Lichtreaktion, abiotische Faktoren, digitale Tools, Experimente

1 Experimentieren mit digitalen Messsensoren

Gerade für die Naturwissenschaften, die aufgrund der Komplexität von Fachinhalten und ihrer starken Theorieausrichtung als Schulfächer unbeliebt sein können (Merzyn, 2008), bietet der Einzug von digitalen Medien beim Experimentieren das Potenzial, den Unterricht handlungsorientierter und damit ansprechender und lernförderlicher für die Schülerinnen und Schüler zu gestalten (Schäfers et al., 2020).

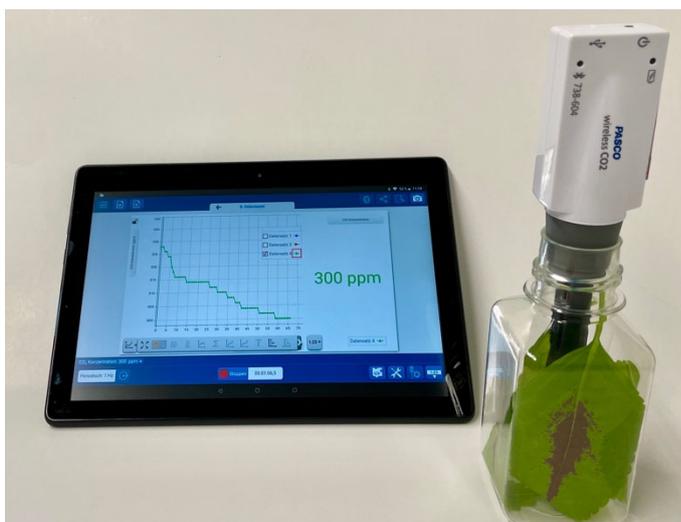


Abbildung 1: Digitale Messwerterfassung in Echtzeit. Der smart CO₂ Gas-Sensor von PASCO misst die CO₂-Konzentration in einer Stoffwechselkammer mit frischem Pflanzenmaterial (rechts). In der SPARKvue-App auf einem Tablet wird über Bluetooth die Messung aufgezeichnet (links). Foto: L. Becker

Die digitale Erfassung von Messwerten im Rahmen eines Experiments bietet eine methodisch neue und vielversprechende Möglichkeit für die Kompetenzentwicklung im Bereich der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung. Des Weiteren bestehen deutliche Vorteile gegenüber anderen Wegen der Erfassung von Messwerten (Kuschmierz & Rücker, 2021). So kann die digitale Messwerterfassung nicht nur zur Anre-

gung von Lernprozessen in den Biologieunterricht integriert werden, sondern ermöglicht auch die einfache und schnelle Durchführung von Experimenten, wobei auch die Förderung weiterer Kompetenzen aus dem Umgang mit den Geräten und den Softwarefunktionen resultiert.

Das Experimentieren mit Geräten der Firma PASCO sowie der dazugehörigen SPARKvue-App (Abbildung 1) wurde von den Autorinnen und Autoren in universitären sowie schulischen Kontexten mehrfach erprobt und evaluiert und kann für den Einsatz im Biologieunterricht empfohlen werden. Die Geräte und die App bieten dafür zahlreiche praktische und moderne Funktionen (Kasten 1). PASCO bezeichnet diese deshalb als „smart“ und stellt unter anderem einen Smart CO₂-Sensor, einen Smart Temperatursensor und einen Smart Lichtsensor her (Abbildung 2).

Die Sensoren der Firma PASCO mit der dazugehörigen SPARKvue-App, die kostenlos für die Betriebssysteme von Android und Apple auf ein Smartphone oder Tablet heruntergeladen werden kann, sind optimal für einen Einsatz im Biologieunterricht geeignet.

Die Sensoren sind über den Lehrmittelvertrieb *conatex* online zu erwerben. Die Kosten der hier eingesetzten Sensoren liegen zwischen 76 und 306 Euro je nach Sensor. Bei *conatex* steht zusätzlich auch eine Software-Lizenz zur Nutzung auf dem Computer zum Kauf sowie zu jedem Messensor eine Kurzanleitungen zu Funktionsweise und Handhabung zur Verfügung (Links zu den Kurzanleitungen: siehe Literaturverzeichnis).

Die Verbindung mit den Sensoren erfolgt via Bluetooth, wobei es sowohl möglich ist, nur einen Sensor zu verbinden als auch mehrere, wodurch unterschiedliche Messungen zeitgleich durchgeführt werden können. Es ist nicht möglich, mehrere mobile Endgeräte mit einem Sensor zu verbinden. Da die App aber speziell für den Einsatz in der Schule konzipiert wurde, besteht bei der Nutzung auch die Möglichkeit, eine geteilte Sitzung einzurichten oder an einer bereits bestehenden Sitzung teilzunehmen.

Insgesamt bietet die App zahlreiche Möglichkeiten zur Erfassung, Speicherung und Auswertung von Daten. Zur Handhabung und Kopplung der PASCO-Sensoren sowie zur Einarbeitung in die Oberfläche und Bedienung der SPARKvue-App stehen zwei Videos im YouTube-Kanal der Didaktik der Biologie (JGU Mainz) zur Verfügung. Diese sind über folgende QR-Codes erreichbar:

Video 1



Einführung in die Arbeitsweise mit den PASCO-Sensoren am Beispiel des CO₂-Sensors.

Video 2



Arbeiten mit der SPARKvue-App: Messdatenerfassung, -verarbeitung und -analyse.

Kasten 1: Allgemeine Informationen zur Nutzung und Handhabung der Messsensoren der Firma PASCO und der SPARKvue-App.

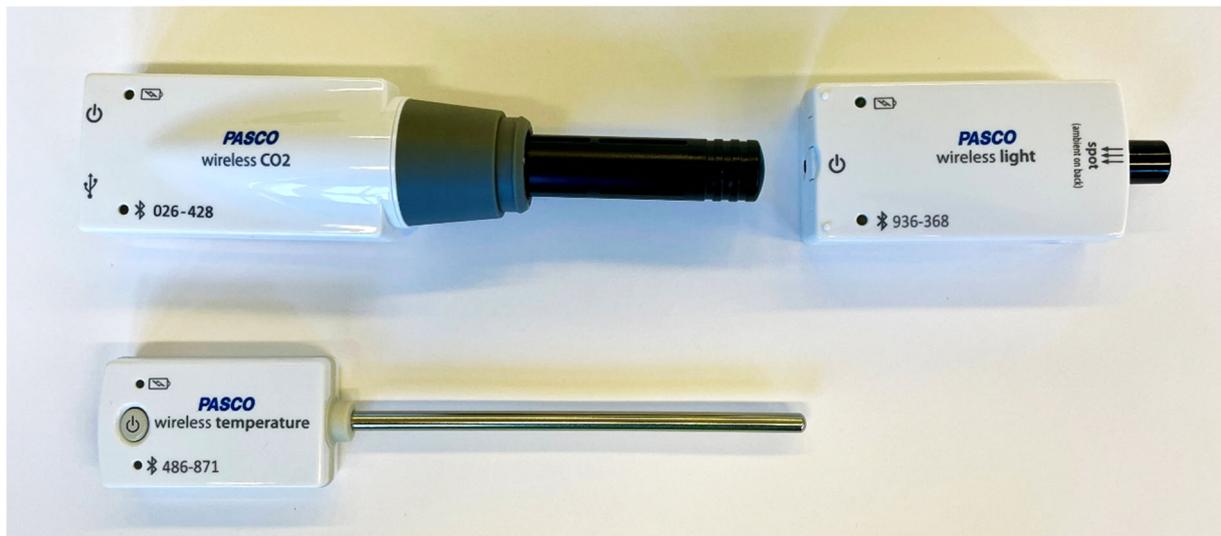


Abbildung 2: Übersicht über die ausgewählten Messsensoren, welche für die hier vorgestellten Experimente relevant sind. Oben von links nach rechts: Smart CO₂-Sensor und Smart Lichtsensor. Unten: Smart Temperatursensor. Foto: L. Becker

2 Grundlagen der Fotosynthese

Die Fotosynthese stellt den grundlegenden Prozess der Energieumwandlung von Lichtenergie in Stoffwechselenergie dar (Schopfer & Brennicke, 2010, S. 532). Pflanzen nutzen damit einen photoautotrophen Weg der Energiebereitstellung, indem sie anorganische, körperfremde Stoffe in organische, körpereigene Moleküle umwandeln. Die Gesamtbilanz der Fotosynthese lässt sich anhand der folgenden Reaktionsgleichung beschreiben:



Die Reaktionen bei der Fotosynthese werden in eine Licht- und eine Dunkelreaktion eingeteilt.

2.1 Licht- und Dunkelreaktion

Die lichtabhängige Reaktion der Fotosynthese findet in den Chloroplasten der Pflanzenzellen statt, die im Cytoplasma der Pflanzenzellen vorliegen (Schopfer & Brennicke, 2010). Im Chloroplastenstroma befinden sich Membransysteme, die Stapel aus Thylakoiden bilden. Diese Stapel werden als Granathylakoide bezeichnet und sind durch Stromathylakoide miteinander verbunden.

Die Prozesse der Lichtreaktion erfolgen ausschließlich an den Membranen der Thylakoide. Im Verlauf werden Wassermolekülen Protonen und Elektronen entzogen. Die Elektronen werden über verschiedene Moleküle entlang einer Redoxreihe auf 5 Substrate übertragen, während die Protonen einen Ladungs- und Konzentrationsgradienten zwischen Thylakoidlumen und Stroma aufbauen, der für die Synthese von ATP genutzt wird (Buchanan et al., 2015).

Mit den in der lichtabhängigen Reaktion gebildeten Reduktionsäquivalenten, den Molekülen NADPH + H⁺, und den energiereichen ATP-Molekülen wird in der Dunkelreaktion, dem Calvin-Zyklus, der im Stroma der Chloroplasten abläuft, das durch die Stomata aufgenommene CO₂ in Glu-

cose assimiliert (Weiler et al., 2008). Für die Synthese eines Moleküls Glucose werden sechs Umläufe und 12 Moleküle NADPH + H⁺ sowie 18 Moleküle ATP benötigt. Der Calvin-Zyklus lässt sich in die Phasen der Carboxylierung, der Reduzierung und der Regenerierung einteilen.

2.2 Fotosynthese und abiotische Umweltfaktoren

2.2.1 Licht

In der Natur hängt die Fotosynthese vom Sonnenlicht ab (Kadereit et al., 2014) Die lichtabhängige Reaktion kann stattfinden, wenn die elektromagnetische Energie des Lichts über die Pigmente der Thylakoidmembran (Chlorophyll a, Chlorophyll b und verschiedene Carotinoide) aufgenommen wird (Schopfer & Brennicke, 2010).

Die Fotosyntheserate steigt proportional mit der Erhöhung der Lichtintensität, wenn kein anderer Faktor begrenzend wirkt. Bei höheren Lichtintensitäten wirken ab einem bestimmten Punkt andere Faktoren limitierend, sodass von einer Lichtsättigung gesprochen wird. Pflanzen, die an sonnige Standorte angepasst sind, erreichen den Punkt der Lichtsättigung bei einer Strahlungsmenge von 400-1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; solche, die überwiegend keine direkte Sonneneinstrahlung erhalten, erreichen den Punkt bereits bei 100-150 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Der Lichtkompensationspunkt einer Pflanze beschreibt den Wert der Lichtintensität, an dem sich der Verbrauch und die Produktion von CO₂ durch die Fotosynthese und die Dissimilation entsprechen. Dieser Wert liegt zwischen 10-50 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei sonnenangepassten Pflanzen und 1-10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bei Pflanzen an schattigen Standorten (Kadereit et al., 2014).

Bei übermäßiger Belichtung einer Pflanze greift als erster Schutzmechanismus gegen einen zu hohen Wasserverlust das Schließen der Stomata, so dass die Transpiration eingeschränkt wird (ebd.). Bei geschlossenen Stomata wird allerdings kein CO₂ mehr aufgenommen, sodass die CO₂-Fixierung durch RubisCO und der anschließende Ablauf des Calvin-Zyklus nicht mehr stattfinden können.

2.2.2 Temperatur

Die Lichtreaktion der Fotosynthese ist kaum von der Umgebungstemperatur beeinflusst, da die Reaktionen entlang der Elektronentransportkette nur wenig enzymatischer Beteiligung unterliegen. Alle anderen Reaktionen der Fotosynthese, die enzymatisch katalysiert sind, unterliegen einer starken Temperaturabhängigkeit, die sich mithilfe der RGT-Regel beschreiben lässt. Die Reaktionsgeschwindigkeit eines Enzyms verdoppelt sich demnach mit einer Erhöhung der Temperatur um jeweils +10°C bis zu einer gewissen Grenze. Ist diese überschritten, werden Enzyme und Biomembranen irreversibel denaturiert. Bei enzymatisch katalysierten Fotosyntheseprozessen kommt es bereits vor dieser kritischen Temperatur zum Absinken der Fotosyntheserate, da bei steigenden Temperaturen die Affinität von RubisCO zu CO₂ abnimmt und die Affinität zu Sauerstoff zunimmt. Damit wird die Photorespiration, eine signifikante Nebenreaktion bei der RubisCO Sauerstoff enzymatisch umsetzt, begünstigt (Kadereit et al., 2014).

Prinzipiell erhöht sich also die Fotosyntheserate mit steigenden Temperaturen, bis ihr Temperaturoptimum erreicht ist. Danach sinkt die Fotosyntheserate wieder ab. Nach diesem Zusammenhang lässt sich die Fotosyntheserate in Abhängigkeit von der Temperatur in einer Verlaufskurve darstellen.

3 Experimente zur Fotosynthese und ihren Einflussfaktoren

3.1 Die Lichtabhängigkeit der Fotosyntheseleistung

In diesem Experiment wird frisch geerntetes Pflanzenmaterial in einer Stoffwechselkammer mit einer Lichtquelle aus unterschiedlichen Entfernungen – und damit bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke – belichtet. Die CO₂-Abnahme in der Stoffwechselkammer wird über den CO₂-Sensor gemessen und aufgezeichnet, während die Lichtintensität über den Lichtsensor gemessen und aufgezeichnet wird (Abbildung 4). Über die Rate der gemessenen CO₂- Abnahme lässt sich schließlich auf die Fotosyntheserate des Pflanzenmaterials bei den gemessenen Lichtintensitäten schließen.

3.1.1 Material, Aufbau und Durchführung

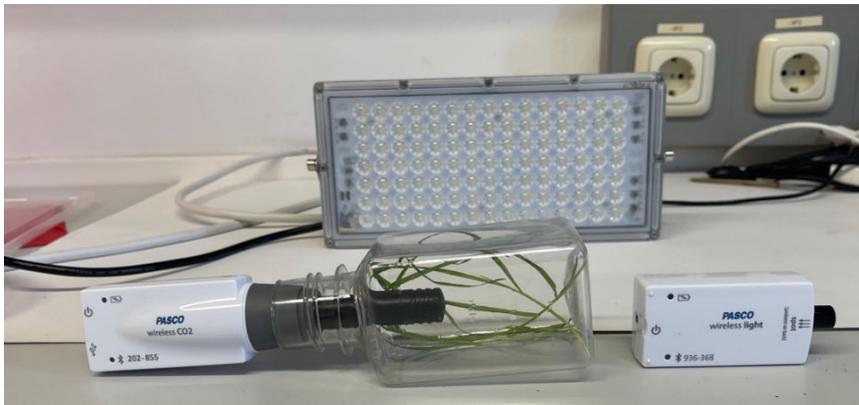


Abbildung 3: Materialien und Aufbau des Experiments zur Lichtabhängigkeit der Fotosyntheseleistung. Vorne: Der CO₂-Sensor verschließt die Stoffwechselkammer mit dem frischen Pflanzenmaterial (hier Dinkelblätter) luftdicht. Der Lichtsensor ist daneben ausgerichtet. Hinten: Lichtquelle. Foto: S. Meyer-Rühen

Für das Experiment bieten sich leicht zugängliche Pflanzen wie Getreidegräser, Bohnenpflanzen, großblättriges Basilikum oder die Buntnessel an, deren Blätter nicht besonders derb sind. Das Pflanzenmaterial wird unmittelbar vor der Messung von der Pflanze entfernt. Die Blätter werden in die Stoffwechselkammer gegeben und so ausgerichtet, dass sie möglichst viel Licht ausgesetzt sind. Sie sollten sich nicht gegenseitig überlappen. Außerdem muss unbedingt darauf geachtet werden, dass die Blätter trocken sind, um die Messung des CO₂-Sensors aufgrund seiner optischen Messart und seiner daraus resultierenden Querempfindlichkeit zu Wasser nicht zu gefährden. Die

Stoffwechselkammer wird anschließend mit dem CO₂-Sensor verschlossen und in der Belichtung ausgerichtet.

Der Lichtsensor befindet sich während der Messung auf derselben Höhe wie die Stoffwechselkammer, um möglichst den Wert der fotosynthetisch wirksamen Strahlung zu messen, der auf die Blätter trifft. Bei der Messung im abgedunkelten Zustand wird der Lichtsensor ebenfalls abgedunkelt. Die Lichtquelle sollte möglichst kaltweißes Licht abstrahlen, um die Strahlung der Sonne möglichst gut zu imitieren, sodass mit den entsprechenden Entfernungen ähnliche Werte wie in realen Beleuchtungssituationen erreicht werden können. Es empfiehlt sich z. B. ein Baustellenstrahler (Abbildung 3).

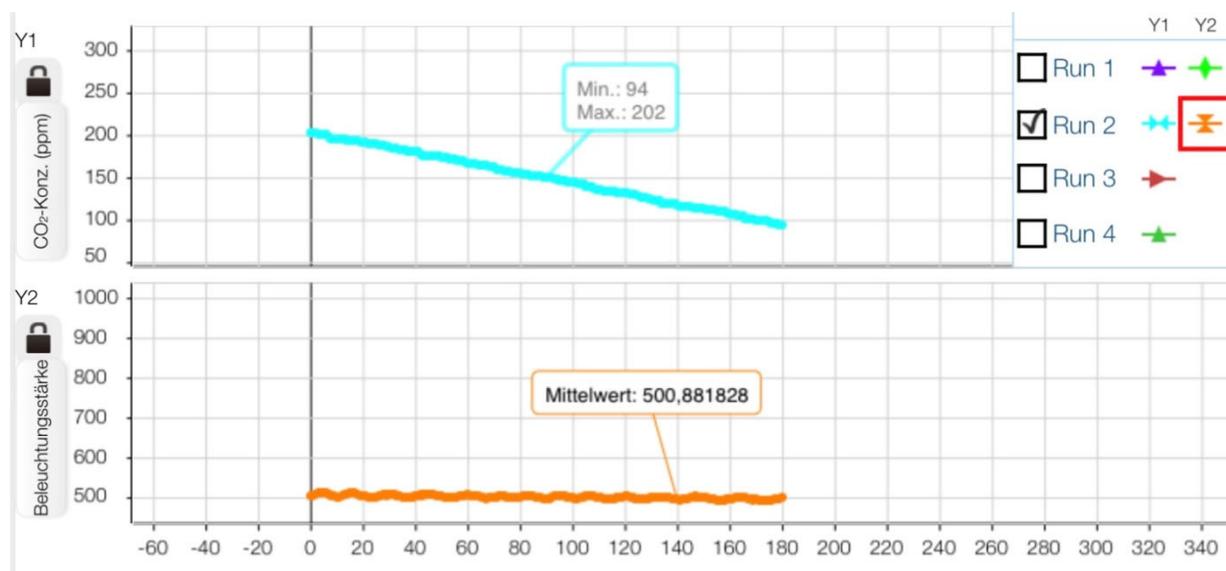


Abbildung 4: Darstellung der Datenaufzeichnung in Echtzeit während des Experiments. Oben: Messung der CO₂-Konzentration (Y-Achse) über den Zeitraum von 180 Sekunden (X-Achse). Unten: Messung der Lichtintensität (Beleuchtungsstärke) in Lux (Y-Achse) über den Zeitraum von 180 Sekunden (X-Achse). Während die Lichtintensität über den Zeitraum gleich bleibt, sinkt die CO₂-Konzentration kontinuierlich ab. Die Änderung der CO₂-Konzentration pro Minute oder pro Sekunde kann aus dem Diagramm über das Aufrufen des Minimal- und Maximalwertes berechnet werden. Screenshot erstellt von L. Becker

Es werden drei Messdurchgänge von je fünf Minuten durchgeführt, wobei die Kammer mit den Blättern beim ersten Durchgang 15 cm und bei der zweiten Messung 130 cm von der Lichtquelle entfernt ist. Der entsprechende Abstand wird mit einem Zollstock ermittelt. Im dritten Messszenario werden die Kammer und der Lichtsensor in Alufolie verpackt, sodass kein Licht mehr auf die Geräte und das Pflanzenmaterial treffen kann. Zwischen den Messdurchgängen wird der CO₂-Sensor aus der Kammer entfernt, sodass ein Austausch der Luft stattfinden kann.

Bei der Kopplung des CO₂- und des Lichtsensors sollte darauf geachtet werden, dass beide Sensoren direkt über den Menüpunkt „Messwerte“ mit dem mobilen Endgerät gekoppelt werden, damit beide Datenaufzeichnungen gleichzeitig dargestellt werden. Beim Auswählen der durch den Lichtsensor zu messenden Daten wird der Punkt „Sonne PAR“ gewählt, der von PASCO mit dem PPFD (Photosynthetically Activ Photon Flux Density, angegeben in $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gleichgesetzt wird.

3.1.2 Auswertung und didaktische Hinweise

Tabelle 1: Tabelle zur Auswertung der Messdaten. Den drei Messdurchgängen des Experiments sind jeweils die Messdaten zugeordnet. Aus den Messdaten lässt sich die durchschnittliche CO₂-Abnahme pro Sekunde berechnen und den jeweiligen Lichtstärken zuordnen.

| Messdurchgang | PPFD [$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ sec}$] | CO ₂ - Konzentration Maximalwert [ppm] | CO ₂ - Konzentration Minimalwert [ppm] | Durchschnittliche CO ₂ -Abnahme [ppm/sec] |
|-----------------------------|--|--|--|--|
| 1. Volle Belichtung | | | | |
| 2. Abgeschwächte Belichtung | | | | |
| 3. Dunkelheit | | | | |

Die Berechnung der durchschnittlichen CO₂-Abnahme pro Sekunde erfolgt mit folgender Formel:

$$\text{Maximalwert CO}_2 \text{ [ppm]} - \text{Minimalwert CO}_2 \text{ [ppm]} : \text{Anzahl Sekunden} = \text{CO}_2\text{-Abnahme} / \text{Sekunde}$$

Die Ergebnisse werden tabellarisch erfasst (Tabelle 1). Anschließend kann die Lichtkompensationskurve sinnvoll erstellt werden, indem die Ergebnisse der Berechnungen in ein Koordinatensystem eingetragen werden (Abbildung 5). In Form eines Kurvendiagramms, wie die Lichtkompensationskurve dargestellt werden soll, wird eine stetige Verteilung abgebildet. Die Schülerinnen und Schüler erkennen somit, dass es sich bei der Lichtabhängigkeit der Fotosynthese um einen dynamischen Prozess handelt. Damit kann die Hypothese, dass schwächer werdende Lichtverhältnisse eine sinkende Fotosyntheseleistung zur Folge haben, überprüft werden.

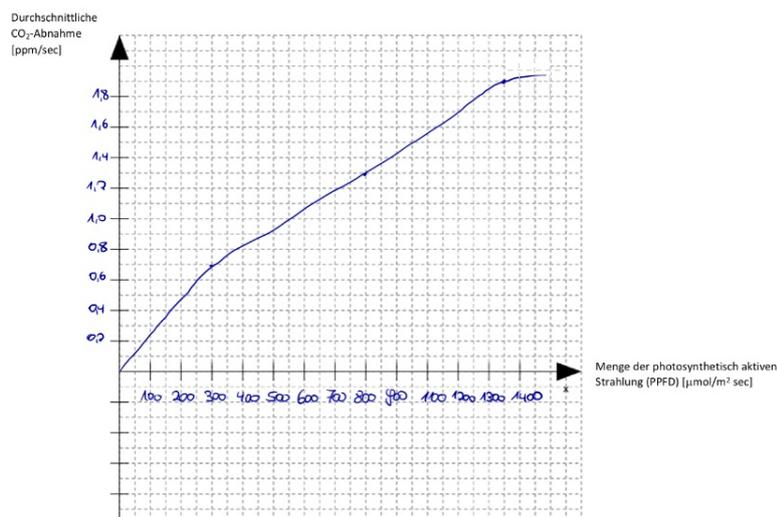


Abbildung 5: Lichtkompensationskurve im Koordinatensystem. X-Achse: Menge der fotosynthetisch aktiven Strahlung (PPFD). Y-Achse: Durchschnittliche CO₂-Abnahme. Im Experiment wurde bei 300 mol/m² sec, 800 mol/m² sec und 1350 mol/m² sec gemessen, die Punkte sind in das Koordinatensystem eingetragen und zu einer Kurve verbunden. Grafik: S. Meyer-Rühen

Für eine effektive Durchführung und Auswertung des Experiments sollten Schülerinnen und Schüler Kenntnisse über die Grundlagen der Fotosynthese haben. Somit ist bereits bekannt, dass die Fotosynthese von Sonnenlicht im Allgemeinen abhängt und dass sich ihre Rate in Abhängigkeit von der herrschenden Lichtintensität ändert.

Anhand der Durchführung des Experiments können die Schülerinnen und Schüler zu der Erkenntnis gelangen, dass die Fotosyntheserate nicht nur mit abnehmender Lichtmenge ebenfalls abnimmt, sondern auch, dass sie ab einer bestimmten Lichtmenge nicht mehr zunehmen kann, weil die Elektronentransportkette der Lichtreaktion und die enzymatischen Prozesse des Calvin-Zyklus bei ihrer maximalen Geschwindigkeit angekommen sind. Je nach Durchführung des Experiments und abhängig von der vorherigen Beleuchtung der gewählten Pflanze kann bei der Messung, bei der die Pflanze aus kurzem Abstand belichtet wird, die Fotosyntheserate geringer ausfallen als bei dem größeren Abstand. In diesem Fall wird von den Schülerinnen und Schülern explizit eine Transferleistung gefordert, bei der sie das Schließen der Stomata erwähnen und sich auf die hohe Belichtung sowie auf den dadurch entstehenden CO₂-Mangel beziehen.

3.2 Die Temperaturabhängigkeit der Fotosyntheseleistung

In diesem Experiment wird frisch geerntetes Pflanzenmaterial in einer Stoffwechselkammer bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen belichtet. Die CO₂-Abnahme in der Stoffwechselkammer wird über den CO₂-Gassensor gemessen und aufgezeichnet, während die Umgebungstemperatur (bei Raumluft oder in einem kalten oder einem warmen Wasserbad) über den Temperatursensor gemessen und aufgezeichnet wird (Abbildung 6). Über die Rate der gemessenen CO₂-Abnahme lässt sich auf die Fotosyntheserate des Pflanzenmaterials bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen schließen (Abbildung 8).

3.2.1 Material, Aufbau und Durchführung

Für das Pflanzenmaterial, die Lichtquelle und den Umgang mit dem CO₂-Sensor gelten dieselben Bedingungen wie im Experiment zur Lichtabhängigkeit der Fotosyntheseleistung beschrieben (Abschnitt 3.1).

Zunächst werden die grünen Blätter in die Stoffwechselkammer gegeben, welche dann mit dem CO₂-Sensor verschlossen wird. Ein Becherglas mit 800-1000 ml Fassungsvermögen dient als Wasserbad und wird nacheinander mit drei verschiedenen Temperaturen angesetzt. Die Wassertemperaturen sollten so gewählt werden, dass bei kühler Temperatur (ca. 5-15 °C), bei Raumtemperatur (ca. 20-25 °C) und bei sehr warmer Temperatur (ca. 35-45 °C) gemessen werden kann. Mithilfe eines Wasserkochers oder mit Eiswürfeln kann die Wassertemperatur nach oben und unten eingestellt werden. Bei den sehr warmen Temperaturen ist auf Verbrühungsgefahr zu achten. Wenn auf die Denaturierung von Enzymen bei hohen Temperaturen im Unterricht nicht eingegangen werden soll, ist auch kein Wasserbad mit einer Temperatur >40 °C nötig.



Abbildung 6: Aufbau des Experiments zur Temperaturabhängigkeit der Fotosyntheseleistung. Die Stoffwechselkammer mit CO₂-Sensor und der Temperatursensor befinden sich im Wasserbad. Foto: L. Becker

Für den weiteren Aufbau wird die Stoffwechselkammer mit dem CO₂-Sensor mit einer Seite direkt an die Wand des Becherglases in das Wasser gestellt. Zur besseren Absicherung kann eine Stativklemme am Hals der Kammer befestigt werden. Der Temperatursensor wird ebenfalls durch ein Laborstativ mit Klemme gehalten und taucht ebenfalls in das Wasserbad, sodass er die Umgebungstemperatur des Blattmaterials misst (Abbildung 6). Die Lichtquelle wird an der Becherglaseite, an der die Stoffwechselkammer so dicht wie möglich steht, in einem Abstand von 20-40 cm positioniert und eingeschaltet. Nach jeder der fünfminütigen Messungen werden die Stoffwechselkammer und der Temperatursensor aus dem Wasserbad entnommen und der CO₂-Sensor zwecks Luftaustausch aus der Stoffwechselkammer entfernt.

Nach einigen Minuten Anpassungszeit des Temperatursensors wird dann der nächste Messdurchgang gestartet. Bei der Messaufzeichnung in der App wird eine Ansicht gewählt, bei der die Temperatur und die CO₂-Konzentration gleichzeitig angezeigt werden (Abbildung 7).

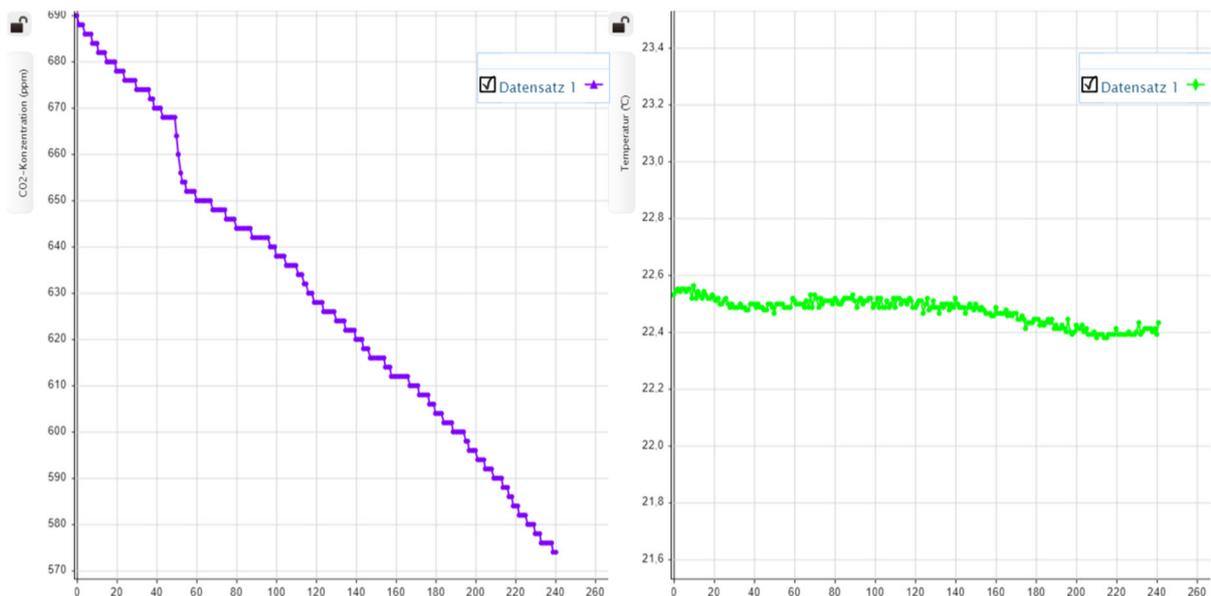


Abbildung 7: Beispielhafte Aufzeichnung der gleichzeitigen Messung von CO₂-Konzentration (links) und Temperatur (rechts). Deutlich zu erkennen ist eine Abnahme der CO₂-Konzentration über einen Zeitraum mit konstanter Temperatur. Screenshot erstellt von L. Becker.

3.3 Auswertung und didaktische Hinweise

Die Berechnungen erfolgen analog zu den Berechnungen des ersten Experiments (Tabelle 1). Auch hier werden die errechneten Werte in ein Koordinatensystem eingetragen, um die Ergebnisse des Experiments in einer Kurve zu veranschaulichen (Abbildung 8).

Das zweite Experiment greift den Umweltfaktor Temperatur für die Fotosynthese zusammen mit einer grundlegenden Bedingung für den Ablauf von enzymatischen Reaktionen auf. Die Kenntnis und das sichere Anwenden der RGT-Regel durch die Schülerinnen und Schüler ist also eine wesentliche Voraussetzung für das Verständnis des zweiten Experiments. Um die RGT-Regel auf die Prozesse bei der Fotosynthese beziehen zu können, müssen die Abläufe des Calvin-Zyklus bereits theoretisch behandelt worden sein, damit die Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang zwischen der Umgebungstemperatur und ihrem Einfluss auf die Enzyme, die die Reaktionen des Calvin-Zyklus katalysieren, erkennen können.

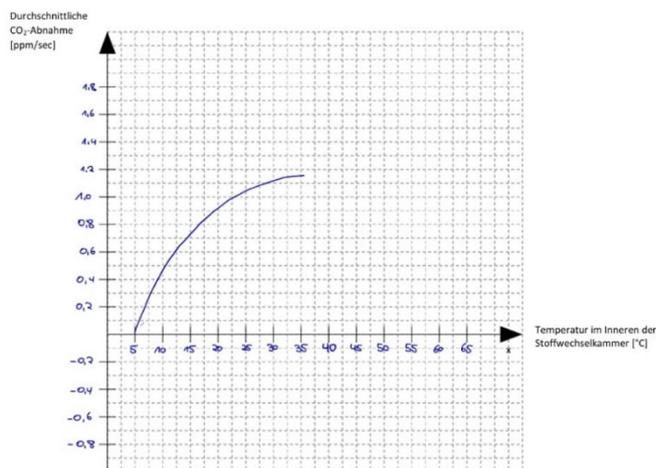


Abbildung 8: Verlaufskurve im Koordinatensystem. X-Achse: Temperatur. Y-Achse: Durchschnittliche CO₂-Abnahme in ppm/sec. Im Experiment wurde bei 10 °C, 25°C und 35°C gemessen, die Punkte sind in das Koordinatensystem eingetragen und zu einer Kurve verbunden. Grafik: S. Meyer-Rühen

Vor der Durchführung des Experiments sollte theoretisches Wissen zum Ablauf der Fotosynthese mit Licht- und Dunkelreaktion vermittelt werden, damit die Schülerinnen und Schüler dieses systematisch erweitern können und sie die Problemstellung begreifen können, dass die Lichtreaktion kaum enzymatische Beteiligung aufweist und somit nicht temperaturabhängig sein kann. Dieses Vorgehen eignet sich nur für eine starke Lerngruppe, die anschließend keine Schwierigkeiten dabei hat, die beiden Teilprozesse der Fotosynthese als voneinander abhängig zu erkennen.

4 Einordnung der Experimente in den Lehrplan und Ausblick

Beide Experimente sind im Lehrplan in das Leitthema 4 **Lebewesen in ihrer Umwelt** (Ministerium für Bildung Rheinland-Pfalz, 2022) einzuordnen. Im Pflichtbaustein *Fotosynthese – ein aufbauender Stoffwechselprozess* können die Experimente in den Themenblock der *Beeinflussung der Fotosynthese* eingebracht werden, der die Abhängigkeit der Fotosyntheserate von abiotischen Faktoren aufgreift. Wir schlagen außerdem vor, einen Zusammenhang zur *Vernetzung von systemischen Ebenen eines Organismus* einzugliedern, der besonders im ersten Experiment durch die Vernetzung zum Öffnungs- und Schließmechanismus der Stomata der Pflanze in Abhängigkeit der Wasserregulation angestrebt werden kann.

Für den Pflichtbaustein *Fachliche Verfahren und biologische Denk- und Arbeitsweisen*, der explizit eine Verknüpfung zum Pflichtbaustein *Fotosynthese – ein aufbauender Stoffwechselprozess* nennt, eignen sich die Experimente besonders für den Einsatz im Leistungskurs Biologie, da dort das Durchführen von Experimenten zur Abhängigkeit der Fotosyntheserate von abiotischen Faktoren obligatorisch gefordert wird.

Durch den Einsatz der Experimente können also mehrere fachliche Inhalte des Lehrplans im genannten Leitthema abgedeckt werden. Die grundlegende Änderung, die in der Überarbeitung des Lehrplans für die Oberstufe Anwendung gefunden hat, besteht darin, dass das Leitthema **Stoffwechsel & Energiefluss lebender Systeme** (Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, 1998) aufgelöst und in die Leitthemen **Leben und Energie** sowie **Lebewesen in ihrer Umwelt** (Ministerium für Bildung Rheinland-Pfalz, 2022) aufgeteilt wird. Dadurch werden die Schülerinnen und Schüler in der Verknüpfung des erhaltenen Wissens über die Abhängigkeit der Fotosyntheseprozesse von spezifischen Umweltbedingungen unterstützt.

Es ist eine Möglichkeit, beide Experimente im Unterricht durchzuführen, um zwei abiotische Umweltfaktoren abzudecken. Dies ist auch arbeitsteilig möglich, damit der Zeitaufwand des Experimentierens reduziert werden kann und sich Schülerinnen und Schüler im Anschluss an das Experimentieren gegenseitig über ihre gewonnenen Erkenntnisse informieren und gemeinsam an den weiterführenden Aufgaben arbeiten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, als Lehrkraft nur eines der beiden Experimente auszuwählen und im Unterricht durchzuführen, da die Experimente nicht aufeinander aufbauen und deshalb als voneinander unabhängig betrachtet werden können.

Die Erprobung und die Evaluation der vorgestellten Experimente im Biologieunterricht der Oberstufe sowie in der Lehramtsausbildung für das Fach Biologie haben gezeigt, dass besonders das praktische Experimentieren mit den modernen technischen Geräten und das selbständige Arbeiten in Kleingruppen als positiv wahrgenommen wird. Insgesamt stehen mit den vorgestellten Experimenten zeitgemäße und an den Lehrplan angepasste praktische Unterrichtseinheiten zur Verfügung, die von den Lernenden positiv aufgenommen werden. Darüber hinaus bietet die Vielfalt an Messsensoren noch Raum für zahlreiche weitere Möglichkeiten des Experimentierens auch in anderen Leitthemen oder weiteren Unterrichtsfächern der Naturwissenschaften.

5 Literaturverzeichnis

- Buchanan, B. B., Gruissen, W., & Jones, R. L. E. (2015). *Biochemistry & molecular biology of plants* (2. Aufl.). John Wiley & Sons Ltd.
- Kadereit, J. W., Körner, C., Kost, B., & Sonnewald, U. (2014). *Strasburger Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften* (37. Aufl. ed.). Berlin, Heidelberg: Spektrum.
- Kuschmiertz, P., & Rücker, V. (2021). Digitale Messwerterfassung im Biologieunterricht. In: Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz (Hg.) (1998). Lehrplan Biologie. Grund- und Leistungsfach Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).
- Merzlyn, G. (2008). Naturwissenschaften, Mathematik, Technik - immer unbeliebter? Baltmannsweiler: Schneider Hohengehren.
- Ministerium für Bildung Rheinland-Pfalz (Hg.) (2022). Lehrplan Biologie. Grund- und Leistungsfach in der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz (Hg.) (1998). Lehrplan Biologie. Grund- und Leistungsfach Jahrgangsstufen 11 bis 13 der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe).
- Schäfers, M. S., Schmiedebach, M., & Wegner, C. (2020). Virtuelle Labore im Biologieunterricht: Auswirkungen von Labster auf die Selbsteinschätzung von Schülerinnen und Schülern. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, 2020 (Occasional Papers), 140-167.
- Schopfer, P., & Brennicke, A. (2010). *Pflanzenphysiologie* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Weiler, E. W., Nover, L., & Nultsch, W. (2008). *Allgemeine und molekulare Botanik: 30 Tabellen*. Stuttgart: Thieme.

Conatex-Artikelinformation zur Funktionsweise der Messsensoren

Conatex Lernsysteme. (2020). Smart CO₂ Gas-Sensor. Bedienungsanleitung [online]. URL: <https://www.conatex.com/datasheet/1174001> [25.10.2023].

Conatex Lernsysteme. (2020). Smart Lichtsensor. Bedienungsanleitung [online]. URL: <https://www.conatex.com/datasheet/1164021> [25.10.2023].

Conatex Lernsysteme. (2020). Smart Temperatursensor. Bedienungsanleitung [online]. URL: <https://www.conatex.com/datasheet/1234003> [25.10.2023].