



Co-funded by
the European Union

Solarblätter: Wie Pflanzen uns lehren, Energie zu gewinnen



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





INHALTSVERZEICHNIS

· Einleitung.....	2
· Wie Pflanzen Sonnenenergie gewinnen.....	3
· Wie funktioniert die Photosynthese?.....	5
· Warum ist Photosynthese so wichtig?.....	6
· Von Pflanzen lernen: Wie die Photosynthese erneuerbare Energien inspiriert	7
· Bioinspirierte Solartechnologie.....	8
· Wie inspiriert die Natur Innovationen im Bereich Solarenergie?.....	8
· Von Blättern zu Solarzellen: Biomimetische Ansätze für nachhaltige Energie	10
· Von Pflanzen inspirierte Innovationen bei der Gewinnung und Umwandlung von Solarenergie	11
· Faktoren, die die Photosynthese beeinflussen, und ihre Rolle in der bioinspirierten Solartechnologie.....	15
· Integration von Augmented Reality in Solarblätter: Wie Pflanzen uns lehren, Energie zu gewinnen.....	17
· Beispiel für Umsetzung und Verbesserung.....	20
· Ressourcen.....	24





Allgemeines Thema des Lernpfads	Bioinspirierte Solartechnologie: Von der Natur lernen, um Energie zu gewinnen
Spezifischer Name der Lerneinheit	Solarblätter: Wie Pflanzen uns lehren, Energie zu gewinnen
Zielgruppe	14–18 Jahre
Voraussetzungen für Lernende	Grundkenntnisse in Biologie, Chemie, Physik und Einführungskurs Umweltwissenschaften
Beschreibung der Lerneinheit	Diese Einheit führt Schüler und Lehrer in die bioinspirierte Solartechnologie ein und betont dabei, wie Pflanzen durch Photosynthese effizient Sonnenenergie einfangen und wie Wissenschaftler diese Mechanismen für nachhaltige Energielösungen nachahmen. Mithilfe von Augmented-Reality-Tools (AR) visualisieren die Schüler den Photosynthesevorgang, erkunden biohybride Solarzellen und experimentieren mit naturbasierten Solarpanel-Designs. Die Einheit fördert das fächerübergreifende Lernen, indem sie Konzepte aus Biologie, Physik, Chemie und Ingenieurwesen mit praktischen digitalen Experimenten verbindet.
Beteiligte Fächer	Biologie, Physik, Chemie, Umweltwissenschaften, Ingenieurwesen, Mathematik
Stichworte	Photosynthese, Solarenergie, bioinspiriert, Biomimikry, Nachhaltigkeit, erneuerbare Energien, AR, interaktives Lernen, intelligente Solartechnologie
Wichtige Fähigkeiten, Fertigkeiten und Kenntnisse, die erworben werden können	- Verständnis der Photosynthese als natürlicher Prozess der Sonnenenergiegewinnung und ihrer Rolle im nachhaltigen Design. - Analyse, wie bioinspirierte Solartechnologien die Energieumwandlung von Pflanzen nachahmen. - Problemlösung und Innovation unter Verwendung von Bio-Design-Prinzipien. - Entwicklung von AR-





	basierten Prototyping-Fähigkeiten zur Visualisierung energieeffizienter Solardesigns. - Anwendung von MINT-Konzepten zur Bewältigung realer Energieherausforderungen.
Verwendete Ressourcen und didaktische Hilfsmittel	- Wissenschaftliche Artikel und Bücher über Photosynthese und bioinspirierte Solartechnologie. - AR-Anwendungen (z. B. McGraw Hill AR, PhotosynthesisVR, CoSpaces Edu, Assemblr EDU, Merge Cube) für interaktives Lernen.
Bewertungskriterien und Beurteilung	Die Bewertung basiert auf: - Beherrschung der Konzepte durch interaktive Quizfragen und Diskussionen. - Praktische AR-basierte Bewertungen: Simulationen und Prototyping-Übungen mit AR-Tools. - Kreatives Projektdesign: Die Schüler schlagen ein bioinspiriertes Solarpanel-Konzept vor und präsentieren es mithilfe von AR-Visualisierung. - Feedback und Reflexion: Die Schüler bewerten die Wirksamkeit bioinspirierter Solartechnologie bei der Bewältigung von Nachhaltigkeitsherausforderungen.

Einführung

Pflanzen sind die grünen Fabriken der Natur, die durch Photosynthese Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln. Dieser bemerkenswerte natürliche Mechanismus erhält nicht nur das Leben auf der Erde, sondern dient auch als Inspiration für modernste Solarenergietechnologien. Durch die Untersuchung, wie Pflanzen Sonnenenergie effizient einfangen und nutzen, haben Wissenschaftler bioinspirierte Designs entwickelt, die die Leistung von Solarzellen verbessern. Diese Trainingseinheit führt die Schüler in den faszinierenden Zusammenhang zwischen Photosynthese und erneuerbaren Energien ein und betont, wie Augmented Reality (AR) ihr Verständnis dieser Konzepte verbessern kann.

Photosynthese ist der Prozess, bei dem Pflanzen Sonnenlicht nutzen, um Glukose, eine Form gespeicherter chemischer Energie, zu produzieren, während sie als Nebenprodukt Sauerstoff freisetzen. Dieser Prozess erfolgt in zwei Stufen: den lichtabhängigen Reaktionen und dem Calvin-Zyklus. Bei den lichtabhängigen Reaktionen absorbiert Chlorophyll Sonnenlicht und spaltet Wassermoleküle in Sauerstoff, Protonen und Elektronen. Die in dieser Phase erzeugte Energie wird in Molekülen wie ATP und NADPH gespeichert, die später im Calvin-Zyklus zur Synthese von Zucker aus Kohlendioxid verwendet werden (https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/special-programs/Education_in_Agriculture/soybean-





science/GRC%20Photosynthesis%20lesson-final.pdf)(<https://opentextbc.ca/biology/chapter/5-1-overview-of-photosynthesis/>).

Inspiziert von diesem effizienten Energieumwandlungssystem haben Forscher innovative Technologien wie bioinspirierte Photovoltaik (PV)-Systeme entwickelt. So ahmt beispielsweise das „PV-Blatt“ die Transpiration von Pflanzen nach, um Solarzellen zu kühlen, wodurch die Energieeffizienz verbessert und der Wärmeverlust reduziert wird (<https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/>). In ähnlicher Weise wurden Perowskit-Solarzellen mithilfe biomimetischer Techniken verbessert, die natürliche Lipidmembranen nachbilden, um sie vor Umwelteinflüssen zu schützen und gleichzeitig eine hohe Effizienz zu gewährleisten (<https://techxplore.com/news/2023-08-bio-inspired-solar-devices-boost-stability.html>)(<https://list.solar/news/bio-inspired-1/>).

Augmented Reality bietet eine einzigartige Möglichkeit, diese Prozesse zu visualisieren. Mit AR-Anwendungen können Schüler die Photosynthese auf molekularer Ebene erkunden und beobachten, wie Licht Chlorophyllmoleküle anregt oder wie Elektronen durch die Thylakoidmembran wandern. Diese Tools machen abstrakte wissenschaftliche Konzepte greifbar und spannend und fördern ein tieferes Verständnis für den Zusammenhang zwischen Biologie und Technologien für erneuerbare Energien (https://stileapp.com/static/CLL%20handouts/Lesson_035_handout.pdf)(<https://sinovoltaics.com/technology/solar-fuels-an-introduction-to-artificial-photosynthesis/>)

Indem sie untersuchen, wie Pflanzen Sonnenenergie gewinnen, und diese Prinzipien auf von Menschen geschaffene Systeme anwenden, erhalten die Schüler Einblicke in nachhaltige Energielösungen. Diese Einheit unterstreicht nicht nur die Bedeutung des interdisziplinären Lernens in den MINT-Fächern, sondern regt die Schüler auch dazu an, kreativ über die Lösung realer Probleme nachzudenken und sich dabei von der Natur leiten zu lassen.

Wie Pflanzen Sonnenenergie gewinnen

Die Natur dient als reichhaltige und dynamische Inspirationsquelle für Materialinnovationen und ebnet den Weg für die Entwicklung neuer Materialien, die als „bioinspirierte Materialien“ bekannt sind. Diese Materialien weisen verbesserte strukturelle und funktionelle Eigenschaften auf, die aus bestehenden Zusammensetzungen und Substanzen abgeleitet sind (Liu et al., 2017). Das Konzept der „Bioinspiration“ basiert auf dem Ansatz, Erkenntnisse aus natürlichen Strukturen und Funktionen zu gewinnen, um fortschrittliche künstliche Materialien mit überlegenen Eigenschaften zu entwickeln (Zhang et al., 2024).

Biologische Inspirationsquellen, sei es aus dem Pflanzen- oder Tierreich, bilden die Grundlage für die Entwicklung künstlicher Materialien, die deren Eigenschaften und Funktionen nachahmen oder von ihnen beeinflusst sind (Zhang et al., 2020). Zahlreiche biologische Strukturen wurden hinsichtlich ihres Potenzials für das bioinspirierte Materialdesign untersucht, darunter Perlmutter, Spinnenseide, Lotusblätter, Fliegenaugen und Schmetterlingsflügel (Sun et al., 2019). Pflanzen, die vor etwa 400 Millionen Jahren zum ersten Mal auftauchten, haben bedeutende evolutionäre Fortschritte durchlaufen, um sich an raue Umgebungen anzupassen und dort zu gedeihen (Pires und Dolan, 2012). Trotz ihrer begrenzten grundlegenden Bausteine weisen Pflanzen eine bemerkenswerte strukturelle und funktionelle Vielfalt auf, die die Entwicklung von



Hochleistungsflächen und -schnittstellen inspiriert hat, wie beispielsweise den von *Nepenthes* inspirierten Mechanismus zum gerichteten Flüssigkeitstransport (Chen et al., 2016).

Darüber hinaus hat die Integration von pflanzeninspirierten Materialien und Strukturen die Effizienz verschiedener Technologien erheblich verbessert, darunter Energiegewinnungs-, -umwandlungs- und -speichersysteme sowie Wasserentsalzungs- und -reinigungsgeräte, Trenn- und Sammelmechanismen sowie Lösungen zur strukturellen Verstärkung und Verfestigung (Yu et al., 2024).

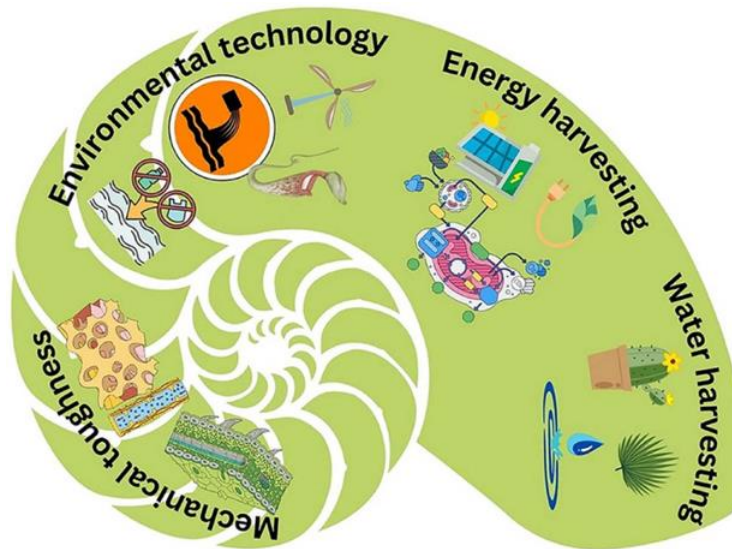
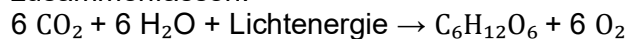


Abbildung 1. Grafische Darstellung von pflanzeninspirierten Oberflächen und Schnittstellen für verschiedene Anwendungen, Quelle: Wijerathne et al., 2025.

Die Photosynthese ist ein komplexer Prozess, bei dem Pflanzen, Algen und einige Bakterien Lichtenergie in chemische Energie umwandeln. Dieser Prozess ist für das Leben auf der Erde von grundlegender Bedeutung, da er die Energie und organischen Verbindungen liefert, die die meisten Ökosysteme erhalten.

Die Gesamtreaktion der Photosynthese lässt sich durch die folgende Gleichung zusammenfassen:



Bei diesem Prozess werden Kohlendioxid und Wasser unter Verwendung von Sonnenlicht als Energiequelle in Glukose und Sauerstoff umgewandelt (<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>).

Der Prozess der Photosynthese ist für das Leben auf der Erde von entscheidender Bedeutung. Als Nebenprodukt entsteht Sauerstoff, der für die meisten Lebewesen unverzichtbar ist. Darüber hinaus bilden die durch die Photosynthese entstehenden organischen Verbindungen die Grundlage der meisten Nahrungsketten.



Die Photosynthese wird von Photoautotrophen durchgeführt, also Organismen, die ihre eigene Nahrung mithilfe von Lichtenergie produzieren können. Dazu gehören Pflanzen, Algen und einige Bakterien

Das Verständnis der Photosynthese ist nicht nur für die Biologie wichtig, sondern auch für die Bewältigung globaler Herausforderungen. Die fossilen Brennstoffe, die wir heute nutzen, sind das Ergebnis der Photosynthese, die vor Millionen von Jahren stattfand. Darüber hinaus könnte die Forschung zur künstlichen Photosynthese zu neuen nachhaltigen Energietechnologien führen (<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>).

Pflanzen, Algen und einige Bakterien haben die Kunst perfektioniert, Sonnenlicht zu nutzen, um das Leben auf der Erde zu erhalten. Dieser Prozess, der als Photosynthese bezeichnet wird, ermöglicht es ihnen, Sonnenenergie in chemische Energie umzuwandeln und so den Sauerstoff, den wir atmen, und die Nahrung, die wir essen, zu produzieren. Das Verständnis, wie Pflanzen Energie effizient einfangen und speichern, kann zu nachhaltigen Lösungen für den Energiebedarf des Menschen inspirieren.

Wie funktioniert die Photosynthese?

Die Photosynthese findet in den Chloroplasten statt, speziellen Strukturen in Pflanzenzellen. Diese enthalten Chlorophyll, das grüne Pigment, das Sonnenlicht absorbiert. Mit Hilfe von Licht, Wasser und Kohlendioxid produzieren Pflanzen Glukose (ein Zucker, der als Energiequelle dient) und Sauerstoff (der an die Luft abgegeben wird).

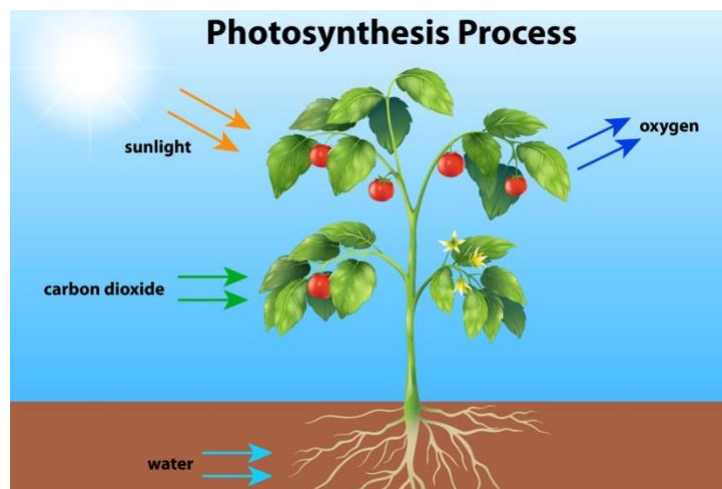


Abbildung 2. Prozess der Photosynthese, Quelle:

<https://dotandlinelearning.com/blog/biology/chapter-6-photosynthesis/>



Der Prozess verläuft in zwei Hauptphasen:

Phase 1: Einfangen von Lichtenergie (lichtabhängige Reaktionen)

- Findet in den Thylakoidmembranen der Chloroplasten statt.
- Sonnenlicht wird vom Chlorophyll absorbiert, wodurch Elektronen angeregt werden und ein Energieübertragungsprozess in Gang gesetzt wird.
- Wassermoleküle werden in Sauerstoff, Protonen und Elektronen gespalten, wobei Sauerstoffgas in die Atmosphäre freigesetzt wird.
- Die gewonnene Energie wird in speziellen Molekülen namens ATP (Adenosintriphosphat) und NADPH (Nicotinamidadeninucleotidphosphat) gespeichert, die in der nächsten Phase verwendet werden.

Stufe 2: Energieproduktion (Calvin-Zyklus)

- Findet im Stroma statt, der Flüssigkeit im Inneren der Chloroplasten.
- Kohlendioxid aus der Luft wird zur Bildung von Glukosemolekülen verwendet.
- Das ATP und NADPH aus der ersten Stufe liefern die Energie, um Kohlendioxid in Zucker umzuwandeln.
- Diese gespeicherte Energie wird für das Pflanzenwachstum, die Fortpflanzung und die Produktion wichtiger Stoffe wie Stärke und Zellulose verwendet.

Warum ist die Photosynthese so wichtig?

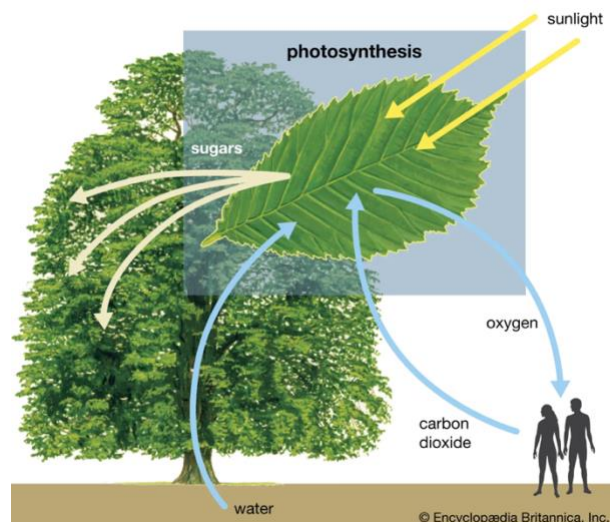


Abbildung 3. Die Bedeutung der Photosynthese, Quelle:

<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>





Die Photosynthese ist die Grundlage des Lebens auf der Erde, sie unterstützt Ökosysteme und erhält das ökologische Gleichgewicht aufrecht. Zu ihren wichtigsten Beiträgen gehören:

- Sauerstoffproduktion: Pflanzen setzen Sauerstoff frei und ermöglichen so das Leben von Tieren und Menschen.
- Energiespeicherung: Sonnenlicht wird in chemische Energie umgewandelt, die das Pflanzenwachstum unterstützt und anderen Organismen Nahrung liefert.
- Kohlenstoffkreislauf: Die Photosynthese hilft bei der Regulierung des Kohlendioxidgehalts in der Atmosphäre und mindert so die Auswirkungen des Klimawandels.

Von Pflanzen lernen: Wie die Photosynthese erneuerbare Energien inspiriert

Die Fähigkeit von Pflanzen, Sonnenlicht effizient einzufangen, hat technologische Fortschritte im Bereich der nachhaltigen Energie inspiriert. Wissenschaftler untersuchen die Photosynthese, um künstliche Photosynthesysteme zu entwickeln, die die Energieproduktion von Pflanzen nachahmen und möglicherweise zu Lösungen für saubere Energie führen, wie zum Beispiel:

- Sonnenkollektoren: Photovoltaikzellen in Sonnenkollektoren funktionieren wie Chlorophyll, indem sie Licht absorbieren und in nutzbare Energie umwandeln.
- Biokraftstoffe: Einige Mikroorganismen nutzen die Photosynthese, um Kraftstoffe herzustellen, die fossile Brennstoffe ersetzen könnten.
- Künstliche Blätter: Wissenschaftler entwickeln synthetische Materialien, die Sonnenlicht zur Erzeugung sauberer Energie nutzen können, genau wie echte Blätter.

Die Natur hat die Umwandlung von Sonnenenergie durch Photosynthese perfektioniert, einen Prozess, der Leben erhält und unser ökologisches Gleichgewicht aufrechterhält. Durch die Erforschung von Pflanzen erschließen Wissenschaftler und Ingenieure neue Wege, um Energie nachhaltig zu gewinnen. Wenn wir lernen, Sonnenlicht so effizient wie Pflanzen einzufangen, kommen wir einer saubereren, grüneren Zukunft vielleicht einen Schritt näher.

Photosyntheseeffizienz

Die Photosyntheseeffizienz bezieht sich darauf, wie effektiv Pflanzen Sonnenenergie in chemische Energie umwandeln. Während die theoretische maximale Effizienz unter idealen Bedingungen bei etwa 11 % liegt, liegt die tatsächliche Effizienz aufgrund von Faktoren wie Lichtabsorptionsgrenzen und Energieverlusten während der Umwandlungsprozesse zwischen 3 und 6 % (<https://www.britannica.com/science/photosynthesis/Energy-efficiency-of-photosynthesis>). Zum Beispiel:

- Nur Photonen im Bereich von 400–700 nm sind nutzbar.
- Während des Elektronentransports und der Zuckersynthese kommt es zu Energieverlusten.



Bioinspirierte Solartechnologie

Die bioinspirierte Solartechnologie, auch als biologische Photovoltaik bekannt, ist ein hochmodernes Forschungsgebiet, das sich von der Fähigkeit der Natur inspirieren lässt, Sonnenlicht einzufangen und in nutzbare Energie umzuwandeln. Der Prozess der Photosynthese, der sich über Milliarden von Jahren entwickelt hat, ist nach wie vor einer der effizientesten Energieumwandlungsmechanismen, die es gibt. Durch die Nachahmung natürlicher Photosynthesysteme wollen Wissenschaftler und Ingenieure hocheffiziente, nachhaltige und kostengünstige Solarenergielösungen entwickeln, die den Übergang der Welt zu sauberen, erneuerbaren Energiequellen unterstützen können.



Angesichts der steigenden Nachfrage nach nachhaltigen Energielösungen stoßen traditionelle Photovoltaik-Technologien (PV) trotz ihrer Wirksamkeit an Grenzen, wie z. B. hohe Produktionskosten, Materialknappheit und Effizienzengpässe. Forscher suchen nun in der Natur nach Lösungen und entwickeln biohybride Solarzellen, künstliche Photosynthesysteme und biologische Photovoltaikplattformen, die natürliche oder bioinspirierte Komponenten nutzen, um die Umwandlung von Sonnenenergie zu verbessern. Dieser Ansatz zielt nicht nur darauf ab, die Effizienz und Stabilität von Solarzellen zu verbessern, sondern fördert auch umweltfreundliche Produktionsmethoden, die Abfall und die Abhängigkeit von seltenen Materialien minimieren.

Wie inspiriert die Natur die Innovation im Solarbereich?

Die Photosynthese in Pflanzen, Algen und bestimmten Bakterien liefert eine Blaupause für die nächste Generation von Solarenergietechnologien. Im Kern absorbiert die Photosynthese effizient Sonnenlicht, spaltet Wassermoleküle zur Erzeugung von Sauerstoff und wandelt Kohlendioxid in energiereiche Verbindungen wie Glukose um. Wissenschaftler arbeiten daran, diese Prozesse nachzubilden und zu verbessern, indem sie Materialien verwenden, die Chlorophyll, Elektronentransportketten und Kohlenstofffixierungsreaktionen nachahmen, um elektrische Energie und synthetische Kraftstoffe zu erzeugen.





Derzeit werden mehrere Strategien im Bereich der bioinspirierten Solartechnologie erforscht:

1. **Biohybride Solarzellen:**
Diese Solarzellen integrieren biologische Komponenten wie photosynthetische Proteine (Photosystem I und Photosystem II) mit synthetischen Materialien und verbessern so die Lichtabsorption und Energieübertragung. Forschern ist es gelungen, photosynthetische Proteine aus Pflanzen wie Spinat zu extrahieren, um Solarzellen herzustellen, die die Energieumwandlungseffizienz verbessern (https://en.wikipedia.org/wiki/Biohybrid_solar_cell?utm).
2. **Biologische Photovoltaik (BPV):**
BPVs nutzen lebende Organismen wie Cyanobakterien oder Algen, um Sonnenlicht zu sammeln und elektrischen Strom zu erzeugen. Diese Systeme nutzen die selbstreparierenden und selbsttragenden Eigenschaften biologischer Materialien und bieten eine kostengünstige und nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Solarzellen auf Siliziumbasis (https://en.wikipedia.org/wiki/Biological_photovoltaics?utm).
3. **Künstliche Photosynthesesysteme:**
Die künstliche Photosynthese versucht, die Fähigkeit der Natur nachzubilden, Sonnenlicht, Wasser und Kohlendioxid in Brennstoff umzuwandeln. Technologien wie das von Harvard-Forschern entwickelte „Bionic Leaf“ nutzen Katalysatoren, um Wassermoleküle in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten und dann CO₂ mit Bakterien zu kombinieren, um flüssige Brennstoffe herzustellen. Diese Systeme haben eine höhere Effizienz als die natürliche Photosynthese erreicht und sind damit eine vielversprechende Lösung für die Produktion sauberer Brennstoffe (https://en.wikipedia.org/wiki/Bionic_Leaf?utm).
4. **Selbstreinigende und selbstreparierende Solarzellen:**
Pflanzen haben Selbstreparaturmechanismen entwickelt, mit denen sie beschädigte photosynthetische Proteine im Laufe der Zeit wiederherstellen können. Davon inspiriert entwickeln Forscher Solarzellen mit Selbstheilungsfähigkeiten, wobei sie lichtempfindliche Polymere und photoaktive Beschichtungen verwenden, die natürliche Reparaturprozesse nachahmen. Diese Innovationen verlängern die Lebensdauer von Solarzellen und erhalten ihre Effizienz über einen längeren Zeitraum.
5. **Von Blättern inspirierte abstimmbare Lichtabsorption:**
Im Gegensatz zu herkömmlichen Solarzellen, die unter wechselnden Lichtverhältnissen ineffizient sein können, haben Pflanzen adaptive Mechanismen entwickelt, mit denen sie ihre Lichtausbeute an die Umgebungsbedingungen anpassen können. Davon inspiriert entwickeln Ingenieure dynamische Solarzellen, die ihre Absorptionsrate je nach Tageszeit und Intensität des Sonnenlichts anpassen und dabei die natürlichen Bewegungen von Blättern und Chloroplastenstrukturen nachahmen (<https://www.axios.com/sponsored/the-technology-paving-the-way-for-the-future-of-solar-energy?utm>).

Jüngste Fortschritte und Anwendungen:

- Biomimikry im Design: Innovatoren suchen zunehmend in der Natur nach nachhaltigen Lösungen. So wurde beispielsweise das Design des japanischen Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszugs der Serie 500 vom Eisvogel inspiriert, was zu einer verbesserten Effizienz und geringeren Geräuschentwicklung führte. Dieses Prinzip der Biomimikry wird in verschiedenen Bereichen, darunter auch in der Solartechnologie, angewendet, um Systeme zu entwickeln, die mit natürlichen Prozessen harmonisieren (<https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/>).





- Perowskit-Silizium-Tandemzellen: Unternehmen wie Qcells haben durch die Kombination von Perowskit-Materialien mit herkömmlichen Silizium-Solarzellen Durchbrüche erzielt und neue Effizienzrekorde aufgestellt. Dieser Fortschritt könnte zu kompakteren und effizienteren Solarmodulen führen und damit Platzprobleme bei Solaranlagen lösen (<https://www.reuters.com/business/energy/qcells-says-technology-breakthrough-could-reduce-space-needed-solar-panels-2024-12-18/>).
- Solarfarbe für Elektrofahrzeuge: Innovationen wie Solarfarbe werden entwickelt, damit Elektrofahrzeuge Solarenergie direkt nutzen können, wodurch die Abhängigkeit von externen Ladeinfrastrukturen verringert und die Reichweitenangst der Nutzer gemindert werden könnte (<https://www.thetimes.com/uk/technology-uk/article/mercedes-benz-solar-paint-charge-evs-rcp86z8hd?region=global>).

Von Blättern zu Solarzellen: Biomimetische Ansätze für nachhaltige Energie

Der dringende Bedarf an nachhaltigen und umweltfreundlichen Energieumwandlungstechnologien steigt weiter, da die Welt nach wirksamen Lösungen sucht, um Umweltprobleme zu bekämpfen und bis 2050 Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Die Natur, insbesondere Pflanzen, bietet ein hocheffizientes Modell für die Gewinnung von Sonnenenergie, die Absorption und Umwandlung von Kohlendioxid und den schnellen Transport von Elektrolyten durch ihre biologischen Strukturen. Diese natürlichen Prozesse haben Wissenschaftler dazu inspiriert, Materialien und Geräte zu entwickeln, die die strukturellen und funktionellen Eigenschaften von Pflanzengeweben und -zellen nachahmen. Innovationen auf der Grundlage von pflanzeninspirierten Materialien wurden erfolgreich in verschiedene Bereiche der nachhaltigen Energietechnologien integriert. Im Bereich der Solarenergie beispielsweise haben bioinspirierte Materialien zur Weiterentwicklung von Solarzellen und Photovoltaikgeräten beigetragen und deren Fähigkeit, Sonnenlicht zu absorbieren und mit höherer Effizienz in Strom umzuwandeln, erheblich verbessert. Durch die Nachahmung der Effizienz natürlicher Photosynthese- und Transportsysteme ebnen diese Technologien den Weg für effektivere und umweltfreundlichere Energielösungen. Durch die Untersuchung des Prozesses der Photosynthese in Pflanzen wurden photokatalytische Geräte entwickelt, die unter Sonneneinstrahlung CO₂ in Biokraftstoffe wie Ethanol, Stärke und andere Hydrogencarbonat-Kraftstoffe umwandeln. Im Gegensatz zu direkten Verfahren zur Gewinnung und Umwandlung von Sonnenenergie wurde die von Pflanzen inspirierte Energieerzeugung in bemerkenswerter Weise mit kinetischer und mechanischer Energie integriert. Von Pflanzen inspirierte Hydrovoltage-Geräte wandeln die Energie der Wasserdiffusion in Strom um, indem sie den Wasserdiffusionsgradienteneffekt von Pflanzen nachahmen.

Inspiziert von den nanofluidischen Transporteigenschaften und selektiven Zellstrukturen wurden bioinspirierte Materialien für fortschrittliche Energiespeichergeräte für reale Szenarien entwickelt, wie z. B. Batterien und Superkondensatoren. So wurde beispielsweise eine erhöhte Ionenleitfähigkeit und Wasserretention in Festkörperelektrolyten beobachtet, die mit natürlichen Bambus-Zellulose-Nanofasern angereichert waren, was die elektrochemische Leistung der flexiblen Zn-Luft-Batterie verbesserte (Du et al., 2024). Eine pflanzenähnliche Batterie (FlowER: ein Verdunstungsfluss-Redox) mit verlängerter Batterielebensdauer wurde ökologisch konzipiert, um die drahtlosen Sensornetzwerke zur Unterstützung der Präzision in der Landwirtschaft mit Strom zu versorgen (Navarro- Segarra, 2022). Ähnliche pflanzeninspirierte Designs wurden auch auf andere aktive metallbasierte Batterien angewendet, darunter Zink-Ionen-Batterien (Zhang et al., 2024, Dong et al., 2023). Um zu zeigen, wie Bioinspiration den Weg für eine weitere Leistungssteigerung nachhaltiger Energietechnologien ebnet, kategorisieren wir pflanzeninspirierte Materialien nach den Arten der neuen Technologien.





Von Pflanzen inspirierte Innovationen bei der Gewinnung und Umwandlung von Solarenergie

Die größten Herausforderungen bei der Gewinnung und Umwandlung von Sonnenenergie in Strom oder andere nachhaltige Energiequellen liegen in der effizienten Absorption der Sonnenstrahlung und der Effektivität der Energieumwandlung. Solarzellen sind eine etablierte Kategorie von Geräten zur nachhaltigen Energieumwandlung, die Sonnenstrahlung direkt in Strom umwandeln. Diese Geräte sind weltweit weit verbreitet und an verschiedenen Orten installiert.

Die Effizienz von Solarzellen hat eine Grenze erreicht, die einer deutlichen Verbesserung bedarf, da mehr als 70 % der einfallenden Energie als Abwärme verloren geht. Dies verringert nicht nur die Gesamteffizienz, sondern wirft auch Sicherheitsbedenken auf. Inspiriert von Bäumen, die Wasser durch Transpiration effizient von den Wurzeln zu den Blättern transportieren, um die Kühlung und Hydratation aufrechtzuerhalten, wurde ein bioinspiriertes hybrides Mehrgenerationen-Photovoltaikblatt (PV-Blatt) entwickelt. Dieses Design ermöglicht einen passiven Wasserfluss aus einem Reservoir zur Zelloberfläche zur Verdunstung, während gleichzeitig das verdunstete Wasser aufgefangen und in sauberes Wasser umgewandelt wird (Wijerathne et al., 2025).

- Photovoltaikblatt (PV-Leaf)

Im Laufe von Milliarden von Jahren der Evolution haben natürliche Organismen hocheffiziente Methoden entwickelt, um Sonnenenergie zu sammeln und als Kohlenwasserstoffe wie Zucker und Stärke zu speichern, um Wachstum und Überleben zu sichern. Untersuchungen haben gezeigt, dass Pflanzenblätter lichtabsorbierende Antennenstrukturen enthalten, sogenannte Chloroplasten, die die Absorption eines breiten Spektrums von Sonnenlicht ermöglichen. Diese Strukturen fungieren auch als Fernkanäle, die nach der Photonenabsorption Exzitonen aus den angeregten elektronischen Zuständen des Chlorophylls zu den Reaktionszentren transportieren, wo die Photosynthese stattfindet (Mirkovic et al., 2017).

In einem natürlichen Blatt sind miteinander verbundene dreidimensionale poröse Netzwerke und Kanalnetze vorhanden, die die Lichtabsorption optimieren und den Transport essenzieller Substanzen erleichtern. Inspiriert von diesen Strukturen und den Mechanismen der natürlichen Photosynthese haben Forscher umfangreiche künstliche Verfahren zur Umwandlung von Sonnenenergie in Brennstoff entwickelt, die die Umwandlung von Kohlendioxid in Mehrfachkohlenstoffprodukte sowie die solarbetriebene Wasserstofferzeugung ermöglichen (Liu et al., 2021).

Durch die Nachahmung der Struktur von Chlorophyll und der Funktionsprozesse der Photosynthese in Pflanzenblättern wurden künstliche Blätter entwickelt, die eine bioinspirierte Gewinnung und Umwandlung von Sonnenenergie ermöglichen (Van Noorden, 2021, Reece et al., 2011, Nguyen et al., 2017).

Um die Gasdiffusion und die Lichtausbeute zu verbessern, werden dreidimensionale künstliche Photosynthesesysteme häufig mit einer hierarchischen Elektrodenstruktur ähnlich der eines





natürlichen Blattes konstruiert. So wurden beispielsweise künstliche Blätter entwickelt, bei denen synthetische Nanomaterialien in pflanzliche Gerüste eingebettet sind und so biohybride Systeme bilden (Zhou, 2013).

Das PV-Blatt ahmt den Transpirationsprozess in Pflanzenblättern nach, um Solarzellen zu kühlen und deren Effizienz zu verbessern. Dieses Design umfasst eine biomimetische Transpirationsschicht aus Bambusfasern und Hydrogelzellen, die passiv Wasser aus einem Reservoir transportieren, um die Oberfläche des Solarpanels zu kühlen. Durch die Senkung der Betriebstemperaturen um bis zu 26 °C verbessert das PV-Blatt die elektrische Effizienz und kann gleichzeitig Strom, Wärme und sauberes Wasser erzeugen.

Während des Syntheseprozesses wurden die natürliche Architektur und das Adernsystem des Blattes direkt nachgebildet und in das künstliche Photosynthesesystem integriert, wodurch ein dreidimensionales hierarchisches Makroporennetzwerk entstand. Diese künstlichen Blätter, die mit künstlichen Katalysatoren konstruiert wurden, fangen Licht effektiv ein und erleichtern die Photoreduktion von Kohlendioxid, wobei sie natürliche photochemische Prozesse nachahmen, um Kohlendioxid und Wasser unter natürlichem oder simuliertem Sonnenlicht in hochwertige Kohlenwasserstoffe umzuwandeln. Über bioinspirierte Geräte zur Kohlendioxidabscheidung und -umwandlung hinaus hat die Forschung in den letzten zehn Jahren die solare Wasserspaltung unter Verwendung von blattinspirierten Strukturen untersucht. Als saubere Energiequelle ohne Kohlenstoffemissionen wird Wasserstoff voraussichtlich eine entscheidende Rolle in zukünftigen Energiesystemen spielen, insbesondere wenn er durch Wasserspaltungsreaktionen erzeugt wird. Das Konzept der Wasserstoffherzeugung durch Wasserspaltung wurde ebenfalls von den natürlichen Mechanismen der Photosynthese beeinflusst (Velasco-Garcia und Casadevall, 2023).

Die Struktur eines typischen Pflanzenblatts besteht aus photosynthetischen Zellen, Leitbündeln (Adern), Schwammzellen, Spaltöffnungen, der Cuticula und der Epidermis, wie in Abbildung 1a dargestellt. Der Wassertransport innerhalb der Pflanze erfolgt durch einen Prozess, der durch Kapillarkräfte und osmotischen Druck angetrieben wird und die Bewegung von flüssigem Wasser vom Boden zu den Blättern ermöglicht. Die Leitbündel enthalten Mikrokanäle, die das Wasser effizient im Blatt verteilen, wo es dann während der Transpiration von den Zelloberflächen verdunstet.

Inspiziert von der Effizienz der Transpiration und dem strukturellen Aufbau natürlicher Blätter wurde eine biomimetische Transpirationsstruktur für das PV-Blatt entwickelt, wie in Abbildung 1b dargestellt. Dieses Design integriert eine biomimetische Transpirationsschicht (BT), die an der Rückseite einer Solar-PV-Zelle angebracht ist und die Wärmeableitung verbessert. Die Funktion der Leitbündel wird durch natürliche Bambusfaserbündel nachgebildet, die einen effektiven Wassertransport und eine effektive Wasserverteilung gewährleisten. Gleichzeitig dienen Hydrogelzellen mit einer hohen spezifischen Oberfläche und hervorragenden Wasseraufnahmeeigenschaften als Ersatz für Schwammzellen und fördern eine effiziente Verdunstung.

Eine detaillierte Konfiguration der Transpirationsstruktur des PV-Blattes ist in Abbildung 1c dargestellt. Sie besteht aus einer BT-Schicht (ca. 1 mm dick), einem Stützgewebe (0,5 mm dick) und einer PV-Zellschicht (ca. 150 µm dick) und deckt eine effektive Fläche von 10 × 10 cm² ab. In die BT-Schicht sind etwa 30 Zweige aus Bambusfaserbündeln eingebettet, die gleichmäßig in einem superabsorbierenden Polymer (SAP) aus Kaliumpolyacrylat (PAAK) verteilt sind, was eine gleichmäßige Wasserverteilung über die Schicht hinweg ermöglicht. Die Enden der





Faserverzweigungen werden gesammelt und in Wasser getaucht, wodurch eine kontinuierliche Hydratation aufrechterhalten wird.

Der schrittweise Herstellungsprozess für die PV-Blatt-Transpirationsstruktur ist in der ergänzenden Abbildung 1 dargestellt, während die ergänzende Abbildung 2 ein Schaltbild mit Details zum elektrischen Messsystem enthält, das für die Leistungsbewertung verwendet wurde (Huang et al., 2023).

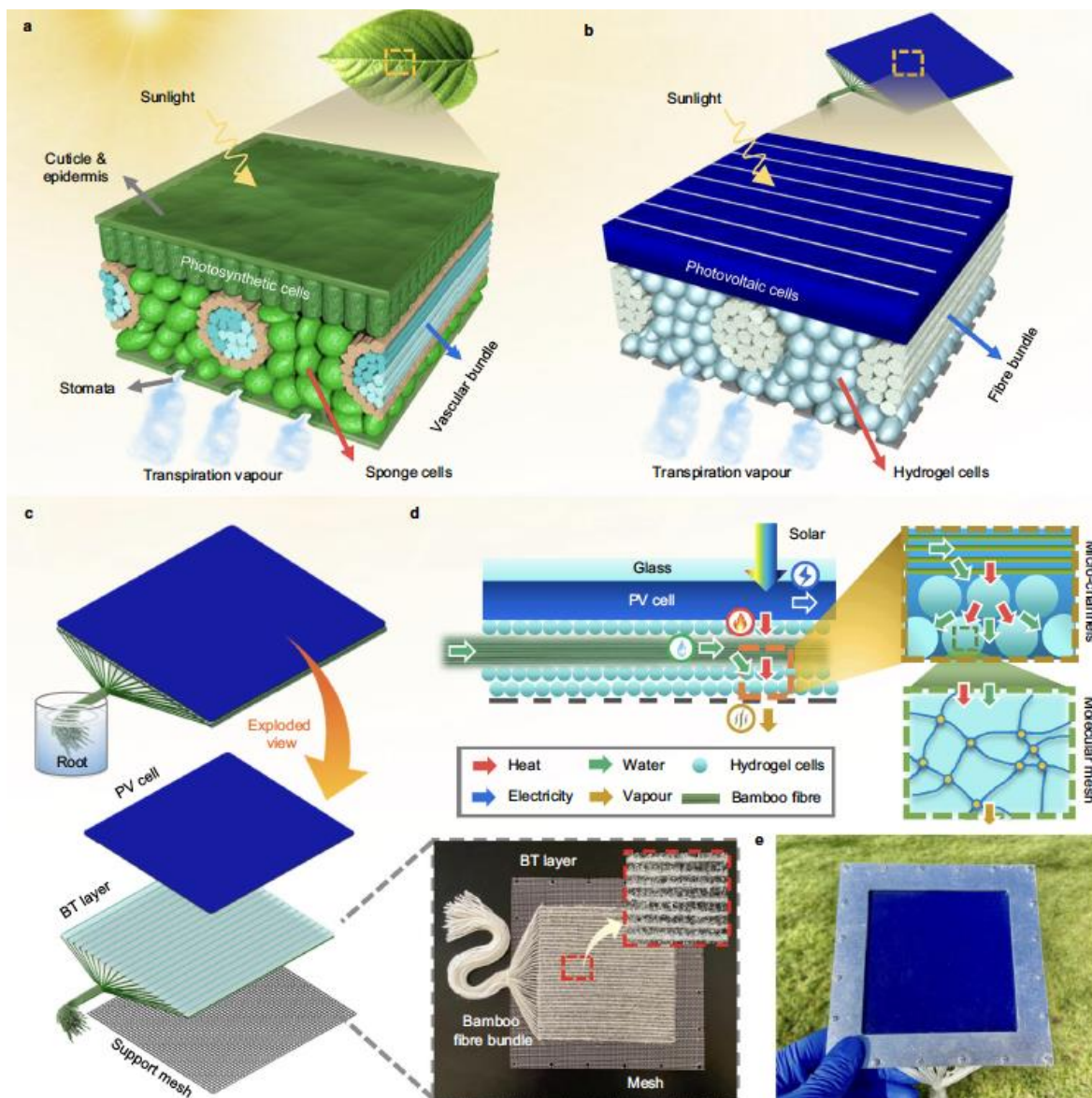


Abbildung 4. Struktur und Funktion des bioinspirierten PV-Blattes a. Ein natürliches Blatt verfügt über Leitbündel, die Wasser gleichmäßig über seine Oberfläche verteilen und so eine Kühlung durch Transpiration ermöglichen, wodurch die Photosynthese geschützt wird. b. Das bioinspirierte PV-Blatt ahmt diesen Prozess nach, indem es hydrophile Faserbündel und Hydrogelzellen verwendet, um die Wassertransport- und Speicherfunktionen eines echten Blattes nachzubilden. c. Die biomimetische Transpirationsschicht (BT) besteht aus Bambusfaserbündeln und Hydrogelzellen, wobei die Faserwurzeln in Wasser getaucht sind, um eine kontinuierliche Feuchtigkeitsversorgung zu gewährleisten. d. Das Wasser wandert durch Kapillarwirkung und Osmose von den Faserwurzeln zu den Hydrogelzellen. Wenn das Wasser verdunstet, entzieht es der PV-Zelle Wärme und hält sie kühl (). e. Ein Foto des PV-Blatt-Prototyps aus der Praxis zeigt, wie diese bioinspirierte Struktur auf eine funktionierende Solarzelle angewendet wird (Huang et al., 2023).

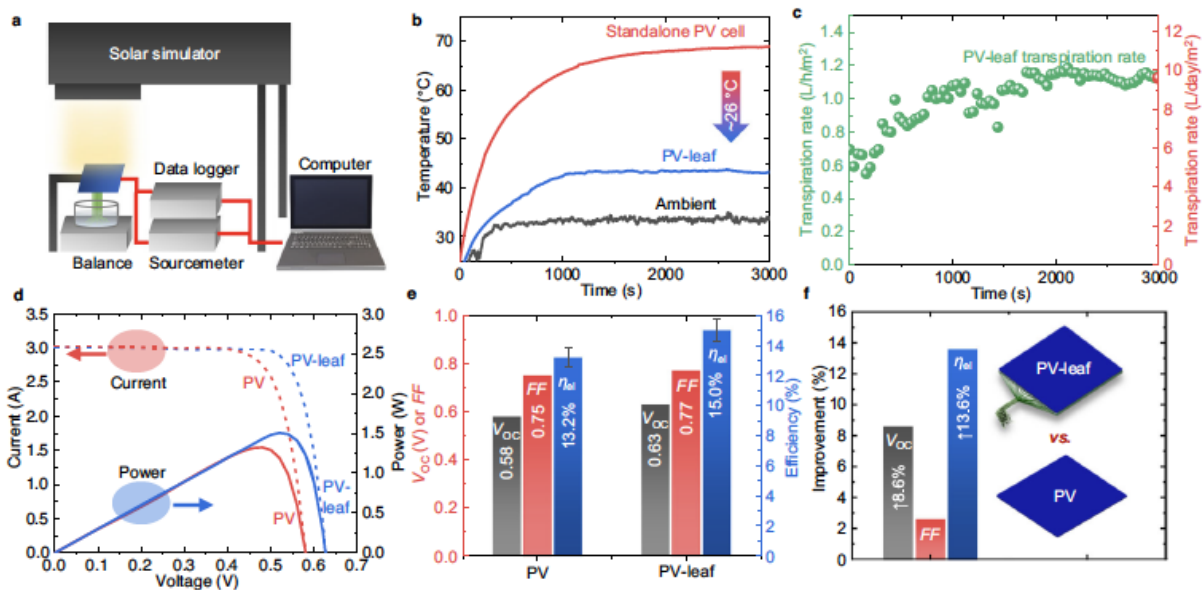


Abbildung 5. Wie das PV-Blatt die Leistung von Solarzellen verbessert a. Um zu testen, wie gut das PV-Blatt funktioniert, wurde eine spezielle Anlage mit einem Sonnensimulator geschaffen, der Licht ähnlich wie Sonnenlicht erzeugt. Diese Anlage hilft dabei, die Kühlwirkung und Energieeffizienz des PV-Blattes im Vergleich zu einer herkömmlichen Solarzelle zu messen. b. Das PV-Blatt bleibt viel kühler als eine herkömmliche Solarzelle. Tests haben gezeigt, dass die biomimetische Transpirationsschicht dazu beiträgt, die Temperatur deutlich zu senken, Überhitzung zu verhindern und die Leistung zu verbessern. c. Das PV-Leaf gibt durch Transpiration Wasser ab, genau wie ein echtes Blatt. Dieser Prozess hilft, Wärme aus dem Solarpanel abzuleiten, wodurch es effizienter wird. Die Menge des im Laufe der Zeit verdunsteten Wassers zeigt, wie gut das Kühlsystem funktioniert. d. Das PV-Leaf produziert mehr Energie als ein herkömmliches Solarpanel. Das verbesserte Kühlsystem hilft den Solarzellen, eine höhere Leistung zu erzeugen, wodurch sie Sonnenlicht effektiver einfangen und nutzen können. e. Wichtige Messungen zeigen, dass das PV-Blatt im Vergleich zu einem herkömmlichen Solarpanel eine bessere Energieproduktion und Effizienz aufweist. f. Insgesamt verbessert das PV-Blatt die





Umwandlung von Sonnenenergie, indem es das Panel kühl hält und den ganzen Tag über eine höhere Effizienz gewährleistet. Dieses bioinspirierte Design kann dazu beitragen, Solarmodule in Zukunft effektiver und nachhaltiger zu machen (Huang et al., 2023).

Faktoren, die die Photosynthese beeinflussen, und ihre Rolle in der bioinspirierten Solartechnologie

Die Photosynthese ist ein komplexer biochemischer Prozess, der von verschiedenen Umwelt- und physiologischen Faktoren beeinflusst wird. Diese Faktoren bestimmen die Geschwindigkeit, mit der Pflanzen Lichtenergie in chemische Energie umwandeln, was sich direkt auf das Pflanzenwachstum, die Kohlenstoffaufnahme und die Sauerstoffproduktion auswirkt. Das Verständnis dieser Faktoren trägt nicht nur zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Effizienz bei, sondern dient auch als Leitfaden für die Entwicklung künstlicher Photosynthesesysteme und bioinspirierter Solartechnologie.

1. Lichtintensität: Die Kraft des Sonnenlichts

Licht ist die treibende Kraft hinter der Photosynthese. Je größer die Lichtintensität, desto mehr Energie steht zur Anregung der Elektronen im Chlorophyll zur Verfügung, was zu einer Erhöhung der Photosyntheserate führt. Es gibt jedoch einen Sättigungspunkt, ab dem zusätzliches Licht den Prozess nicht weiter verbessert, da die biochemischen Mechanismen der Pflanze die zusätzliche Energie nicht effizient verarbeiten können.

- Schlechte Lichtverhältnisse (z. B. schattige Umgebungen oder Tiefseealgen) verlangsamen die Photosynthese aufgrund unzureichender Photonenverfügbarkeit.
- Zu viel Licht kann zu einer Photoinhibition führen, bei der überschüssiges Licht die photosynthetischen Pigmente schädigt und die Effizienz verringert.
- Bio-inspirierte Solarverbindung: Ingenieure, die Solarzellen und künstliche Photosynthesesysteme entwickeln, untersuchen, wie Pflanzen die Lichtabsorption optimieren. Einige Forscher entwickeln adaptive Solarzellen, die die Fähigkeit von Blättern nachahmen, ihre Ausrichtung anzupassen, um eine maximale Sonneneinstrahlung zu erzielen (https://www.rsb.org.uk/images/15_Photosynthesis.pdf).

2. Kohlendioxidkonzentration: Brennstoff für die Kohlenstofffixierung

Kohlendioxid (CO_2) ist für den Calvin-Zyklus unerlässlich, in dem es in Glukose umgewandelt wird. Je höher die CO_2 -Konzentration, desto schneller erfolgt die Kohlenstofffixierung – bis zu einer bestimmten Grenze. Bei sehr hohen Konzentrationen flacht der Effekt jedoch aufgrund von Einschränkungen der Enzymaktivität und Energieversorgung ab.

- Begrenzung des CO_2 -Gehalts: In Umgebungen mit niedrigem CO_2 -Gehalt verlangsamt sich die Photosynthese, da Pflanzen nicht effizient Zucker produzieren können.
- Auswirkungen auf Industrie und Städte: Erhöhte CO_2 -Werte durch menschliche Aktivitäten fördern die Photosynthese, können aber auch zu Klimastörungen führen, die das Pflanzenwachstum beeinträchtigen.
- Bioinspirierte Solarverbindung: Wissenschaftler erforschen Möglichkeiten, CO_2 in der künstlichen Photosynthese effizient zu erfassen und zu nutzen, und entwickeln Systeme, die atmosphärisches CO_2 in nachhaltige Kraftstoffe umwandeln (Wang et al., 2022).





3. Temperatur: Die Rolle von Enzymen bei der Energieumwandlung

Die Temperatur hat einen erheblichen Einfluss auf die Photosynthese, da sie die Enzymaktivität beeinflusst, insbesondere die von RuBisCO, dem Enzym, das für die Kohlenstofffixierung verantwortlich ist.

- Optimale Temperaturbereiche: Die Photosynthese erreicht in der Regel ihren Höhepunkt in einem moderaten Temperaturbereich (15–30 °C). Unterhalb dieses Bereichs verlangsamt sich die Enzymaktivität, und bei höheren Temperaturen denaturieren Enzyme, was zu einer Verringerung der Effizienz führt.
- Extreme Hitze und Wasserverlust: Hohe Temperaturen führen auch zu übermäßiger Transpiration, wodurch die für die Photosynthese entscheidende Wasserverfügbarkeit verringert wird.
- Bioinspirierte Solarverbindung: Künstliche Photosynthesesysteme müssen thermisch stabil sein, um eine effiziente Energieumwandlung unter unterschiedlichen Temperaturbedingungen zu gewährleisten. Wissenschaftler erforschen hitzebeständige Katalysatoren, die die Temperaturtoleranz von Wüstenpflanzen nachahmen.

4. Wasserverfügbarkeit: Unverzichtbar für photosynthetische Reaktionen

Wasser wird während der lichtabhängigen Reaktionen der Photosynthese gespalten und liefert Elektronen und Protonen, die für die Energieproduktion benötigt werden. Eine begrenzte Wasserverfügbarkeit verlangsamt oder stoppt die Photosynthese, was zum Schließen der Spaltöffnungen führt, um Feuchtigkeit zu sparen, aber auch die CO₂-Aufnahme verringert.

- Dürrebedingungen: Pflanzen in trockenen Umgebungen haben spezielle Mechanismen entwickelt, wie beispielsweise die CAM-Photosynthese (Crassulacean Acid Metabolism), um Wasser zu sparen und gleichzeitig Photosynthese zu betreiben.
- Bioinspirierte Solarverbindung: Wissenschaftler entwickeln wassersparende künstliche Photosynthesesysteme, die auch in Umgebungen mit geringer Luftfeuchtigkeit effektiv funktionieren und die Anpassungen von Wüstenpflanzen nachahmen.

5. Wellenlänge und Qualität des Lichts: Mehr als nur Helligkeit

Nicht jedes Licht ist für die Photosynthese gleichermaßen effektiv. Chlorophyll absorbiert hauptsächlich rotes und blaues Licht, während es im grünen Bereich nur minimal absorbiert wird, weshalb Blätter grün erscheinen.

- Künstliche Lichtquellen: LED-Technologie wird heute in kontrollierten landwirtschaftlichen Umgebungen eingesetzt, um das Pflanzenwachstum durch die Bereitstellung der effizientesten Wellenlängen zu optimieren.
- Bioinspirierte Solaranbindung: Die Forschung an lichtabsorbierenden Materialien, die von photosynthetischen Antennenkomplexen inspiriert sind, zielt darauf ab, die Effizienz von Solarzellen zu verbessern und ein breiteres Spektrum des Sonnenlichts für die Energieumwandlung zu nutzen.





Photosynthese als Modell für zukünftige Energielösungen

Über die Erhaltung des Lebens hinaus dient die Photosynthese als Inspiration für künstliche Energiesysteme. Wissenschaftler entwickeln aktiv bioinspirierte Solartechnologie, um natürliche Energieumwandlungsmechanismen nachzubilden und zu verbessern:

- Künstliche Photosynthese: Imitiert die Fähigkeit von Pflanzen, Wasser zu spalten und Energie in chemischen Bindungen zu speichern, wodurch potenziell sauberer Wasserstoff als Brennstoff erzeugt werden kann.
- Biohybride Solarzellen: Integrieren natürliche Proteine oder Pigmente aus Pflanzen in photovoltaische Geräte, um deren Effizienz zu steigern.
- Selbstreparierende Solarmodule: Inspiriert von der Selbstreparaturfähigkeit pflanzlicher Zellen entwickeln Forscher Materialien, die Schäden durch Sonneneinstrahlung reparieren können und so die Lebensdauer der Module verlängern.

Das Verständnis der Faktoren, die die Photosynthese beeinflussen, hilft uns nicht nur, die Effizienz von Pflanzen zu schätzen, sondern leitet auch zukünftige Innovationen im Bereich der Solarenergie. Durch die Untersuchung der Lichtabsorption, der CO₂-Bindung, der Temperaturregulierung und der Energiespeicherung in Pflanzen machen Wissenschaftler bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung intelligenterer, effizienterer und nachhaltigerer Solartechnologien.

Integration von Augmented Reality in Solarblätter: Wie Pflanzen uns lehren, Energie zu gewinnen

1. Einleitung: Verbesserung des Lernens mit Augmented Reality

Augmented Reality (AR) verändert die Bildung, indem sie immersive und interaktive Lernumgebungen schafft, die die Lücke zwischen theoretischem Wissen und praktischer Anwendung schließen. Im naturwissenschaftlichen Unterricht ermöglicht AR den Schülern, abstrakte Konzepte zu visualisieren, mit 3D-Simulationen zu interagieren und virtuelle Objekte zu manipulieren, die in einem traditionellen Klassenzimmer sonst nicht zugänglich wären.

Angesichts der zunehmenden Bedeutung der MINT-Fächer (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) bietet AR Schülern neue Möglichkeiten, sich durch Erfahrungslernen mit komplexen wissenschaftlichen Prinzipien auseinanderzusetzen. Studien haben gezeigt, dass AR-basiertes Lernen im Vergleich zu herkömmlichen Lehrmethoden zu höheren Behaltensraten und einem besseren konzeptionellen Verständnis führt. Der Einsatz von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht verbessert die räumliche Wahrnehmung und hilft den Schülern, komplexe biologische und physikalische Prozesse besser zu verstehen (Kaiwen und Wang, 2024).

Im Zusammenhang mit Solarenergie und bioinspirierter Technologie ist AR ein wertvolles Werkzeug, um die Prinzipien der Photosynthese zu veranschaulichen und zu untersuchen, wie Wissenschaftler diese natürlichen Prozesse in der modernen Solartechnologie nachbilden. Die Möglichkeit, die Mechanismen der Lichtabsorption, Elektronenübertragung und Energiespeicherung durch AR zu visualisieren, hilft den Schülern, biologische Effizienz mit von





Menschen entwickelten Solartechnologien in Verbindung zu bringen. Diese Trainingseinheit integriert AR in das Thema „Solarblätter: Wie Pflanzen uns lehren, Energie zu gewinnen“, um ein tieferes Verständnis zu ermöglichen, Neugier zu wecken und Innovationen im Bereich nachhaltiger Energielösungen anzuregen.

2. Implementierung von AR in der Unterrichtseinheit „Solarblätter“

Die Integration von AR in diese Unterrichtseinheit folgt einem strukturierten Ansatz, um das Verständnis, das Engagement und die praktische Anwendung der Photosynthese und bioinspirierter Solartechnologien zu verbessern. Durch den Einsatz von AR-Simulationen, 3D-Modellen und interaktiven Erfahrungen erhalten die Schüler einen direkten Einblick, wie Pflanzen Sonnenlicht in Energie umwandeln und wie Wissenschaftler diese Prinzipien für die Entwicklung erneuerbarer Energien nutzen.

Eine der wichtigsten AR-Anwendungen, die in dieser Einheit zum Einsatz kommt, ist McGraw Hill AR, das interaktive 3D-Modelle bietet, die die Struktur von Chloroplasten, die lichtabhängigen und lichtunabhängigen Reaktionen der Photosynthese sowie die molekularen Wege der Energieumwandlung veranschaulichen. Die Schüler können diese Modelle manipulieren, um zu beobachten, wie Sonnenlicht von Chlorophyll absorbiert wird, wie sich Elektronen durch die Elektronentransportkette bewegen und wie ATP und NADPH synthetisiert werden. Diese praktische Interaktion vertieft das theoretische Wissen und ermöglicht es den Schülern, Prozesse zu sehen, die mit bloßem Auge nicht sichtbar wären (McGraw Hill AR).

Neben der Visualisierung der natürlichen Photosynthese hilft AR den Schülern auch dabei, bioinspirierte Solartechnologien zu erforschen, die die Effizienz von Pflanzen bei der Gewinnung von Sonnenenergie nachahmen sollen. Anwendungen v , wie z. B. PhotosynthesisVR, ermöglichen es den Schülern, mit künstlichen Photosynthesesystemen zu experimentieren, Solarpanel-Designs auf der Grundlage von Pflanzenstrukturen zu simulieren und natürliche und synthetische Energieumwandlungsmechanismen zu vergleichen. Durch diese Simulationen können die Schüler die Vorteile von bioinspirierten Solarzellen beurteilen, wie z. B. ihre verbesserte Effizienz und Selbstreparaturfähigkeit, ähnlich wie bei der Regeneration von Blättern (<https://avrd.medien-campus.h-da.de/projekt/95635/?utm>).

Über die bestehenden AR-Tools hinaus können mit Plattformen wie Unity AR Foundation individuelle AR-Erlebnisse entwickelt werden, die es Pädagogen ermöglichen, interaktive, lehrplanspezifische AR-Inhalte zu erstellen. Mit Unity-basierten AR-Anwendungen können Schüler virtuelle Laborexperimente durchführen, bei denen sie Variablen wie Lichtintensität, Wellenlänge und Temperatur anpassen, um zu beobachten, wie diese Faktoren die Photosynthese und die Absorption von Sonnenenergie beeinflussen. Dies ermöglicht personalisierte Lernerfahrungen, bei denen die Schüler aktiv Hypothesen testen und Echtzeitdaten in einer virtuellen Umgebung analysieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der AR-Integration ist ihr Potenzial zur Verbesserung der Zusammenarbeit in Gruppen und des gegenseitigen Lernens. Durch die Arbeit mit gemeinsamen AR-Modellen können Schüler Beobachtungen diskutieren, Versuchsergebnisse vergleichen und gemeinsam Lösungen für reale Herausforderungen im Bereich der erneuerbaren Energien entwickeln. Der Einsatz von Multiplayer-AR-Erlebnissen, bei denen mehrere Schüler in Echtzeit mit demselben virtuellen Modell interagieren, fördert Teamarbeit, kritisches Denken und Problemlösungsfähigkeiten.





Trotz ihrer Vorteile bringt die Integration von AR in den naturwissenschaftlichen Unterricht Herausforderungen mit sich, wie beispielsweise technische Zugänglichkeit, Qualität der Inhalte und Anpassung des Lernens. Nicht alle Schüler haben Zugang zu AR-kompatiblen Geräten, und Pädagogen benötigen möglicherweise Schulungen, um AR-Tools effektiv in den Lehrplan zu integrieren. Darüber hinaus befinden sich hochwertige AR-Anwendungen, die auf bestimmte Lernziele abgestimmt sind, noch in der Entwicklung. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, müssen Optionen für die gemeinsame Nutzung von Geräten bereitgestellt, Weiterbildungsprogramme für Lehrkräfte angeboten und wissenschaftlich validierte AR-Inhalte ausgewählt werden (Kaiwen und Wang, 2024).

Durch die sorgfältige Gestaltung von AR-basierten Lernaktivitäten stellt diese Trainingseinheit sicher, dass die Schüler ein ganzheitliches Verständnis der Photosynthese, der bioinspirierten Solartechnologie und der Zukunft nachhaltiger Energieinnovationen erwerben.

Augmented Reality stellt einen transformativen Wandel in der Art und Weise dar, wie Schüler sich mit wissenschaftlichen Konzepten auseinandersetzen, und geht über passives Lernen hinaus hin zu interaktiven, explorativen Erfahrungen. Durch die Integration von AR in die Schulungseinheit „Solar Leaves“ lernen die Schüler nicht nur etwas über Photosynthese und Solarenergieumwandlung, sondern erleben diese Prozesse auch auf eine Weise, die ihr Verständnis vertieft und Innovationen fördert.

Angesichts des weltweiten Übergangs zu erneuerbaren Energielösungen wird die Fähigkeit, die Effizienz der Natur bei der Sonnenenergiegewinnung nachzuahmen, eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung nachhaltiger Technologien spielen. AR-basiertes Lernen schließt die Lücke zwischen Biologie und Ingenieurwesen und ermutigt die Schüler, zu erforschen, wie wissenschaftliche Entdeckungen in der Natur zu innovativen Energielösungen beitragen können. Der Einsatz von AR fördert Neugier, Kreativität und Problemlösungsfähigkeiten, die für die nächste Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren unerlässlich sind.

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von AR-Technologien, künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen wird das Potenzial für personalisierte, datengesteuerte Lernerfahrungen weiter ausbauen. Zukünftige Forschungen könnten untersuchen, wie Echtzeit-AR-Experimente, haptisches Feedback und KI-gesteuerte Simulationen noch immersivere Bildungsumgebungen schaffen können, die sicherstellen, dass Schüler nicht nur die Wissenschaft verstehen, sondern auch aktiv an ihrer Entwicklung teilhaben (https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/?utm_source=chatgpt.com).

Durch den Einsatz von AR als zentrales Instrument im naturwissenschaftlichen Unterricht bereiten wir die Schüler auf die Zukunft des interdisziplinären Lernens vor, in dem Biologie, Technologie und Nachhaltigkeit zusammenfließen. Die Integration von AR in diese Unterrichtseinheit bietet einen dynamischen und zukunftsorientierten Ansatz für den Unterricht in den Bereichen Solarenergie, bioinspirierte Technologie und Umweltwissenschaften und vermittelt den Schülern das Wissen und die Fähigkeiten, um globale Energieherausforderungen zu bewältigen.





Beispiel für Umsetzung und Verbesserung:

Die Integration von Technologie in die Bildung hat die Art und Weise verändert, wie Schüler sich mit komplexen wissenschaftlichen Konzepten auseinandersetzen, und das Lernen interaktiver und zugänglicher gemacht. Augmented Reality (AR) hat sich zu einem leistungsstarken Bildungsinstrument entwickelt, das traditionelle Lehrmethoden durch immersive Echtzeit-Interaktionen mit digitalen Inhalten verbessert. Im Gegensatz zu Virtual Reality (VR), die völlig neue Umgebungen schafft, überlagert AR die reale Welt mit digitalen Informationen und ermöglicht es den Lernenden, abstrakte Prozesse auf anschaulichere und ansprechendere Weise zu visualisieren.

Eines der für junge Schüler am schwierigsten zu verstehenden biologischen Konzepte ist die Photosynthese, der Prozess, bei dem Pflanzen Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln. Traditionelle textbasierte und vorlesungsorientierte Lehransätze haben oft Schwierigkeiten, dieses Konzept klar und anschaulich zu vermitteln, da es den Schülern schwerfällt, sich molekulare Wechselwirkungen und Energieumwandlungen vorzustellen. Um diesem Problem zu begegnen, hat sich der Einsatz von AR-basierten mobilen Anwendungen als innovative Lehrmethode durchgesetzt. Diese Anwendungen ermöglichen es den Schülern, mit 3D-Modellen von Pflanzen zu interagieren, animierte Photosyntheseprozesse zu beobachten und Variablen zu manipulieren, um verschiedene Umwelteinflüsse auf die Energieumwandlung von Pflanzen zu verstehen.

Die pädagogischen Vorteile von AR im naturwissenschaftlichen Unterricht sind weithin anerkannt. Studien haben gezeigt, dass AR das Verständnis verbessert, indem es interaktive Visualisierungen bereitstellt, die die Lücke zwischen theoretischem Wissen und praktischem Verständnis schließen. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass AR-Anwendungen das Engagement und die Leistungen der Schüler in verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen verbessern, darunter Maschinenbau, Mathematik und Astronomie. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass AR-gestützte Lehrmethoden das Verständnis der Schüler für Mondphasen und mathematische Analysen im Vergleich zu herkömmlichen Ansätzen erheblich verbessern.

Im Zusammenhang mit dem Unterricht zum Thema Photosynthese kann die AR-Technologie eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung konzeptioneller Herausforderungen spielen, mit denen Schüler und sogar Lehrer konfrontiert sind. Untersuchungen haben gezeigt, dass viele Pädagogen sich der falschen Vorstellungen der Schüler über die Photosynthese nicht bewusst sind und oft keine geeigneten experimentellen Demonstrationen zur Verfügung haben, um diese Konzepte effektiv zu verdeutlichen. Es hat sich gezeigt, dass traditionelle Vorlesungen in Kombination mit praktischen Aktivitäten, wie dem Bau physikalischer Modelle von Chloroplasten, das Engagement der Schüler verbessern. AR geht jedoch noch einen Schritt weiter, indem es interaktive Simulationen in Echtzeit bietet, mit denen die Schüler die Photosynthese sowohl auf makroskopischer als auch auf molekularer Ebene visualisieren können.

Um die Wirksamkeit des AR-basierten Lernens zu untersuchen, untersucht diese Studie eine spezifische pädagogische Übung, bei der eine mobile AR-Anwendung eingesetzt wird, um jungen Schülern die Photosynthese zu vermitteln (siehe vollständige Beschreibung von „ „ im beigefügten Dokument: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10645875>).





Überblick über die Übung

Diese Bildungsübung untersucht den Einsatz von Augmented-Reality-Technologie (AR) als innovatives Werkzeug, um jungen Schülern die Photosynthese näherzubringen. Traditionelle Lehrmethoden wie Lehrbücher und Vorträge haben oft Schwierigkeiten, diesen komplexen biologischen Prozess für Schüler interessant und verständlich zu gestalten. Die in dieser Übung verwendete AR-basierte mobile Anwendung bietet eine interaktive Lernerfahrung, indem sie den Schülern ermöglicht, die Photosynthese in Echtzeit durch 3D-Pflanzenmodelle und Animationen zu visualisieren.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Methoden, die sich stark auf statische Diagramme und verbale Erklärungen stützen, bietet diese AR-Anwendung eine dynamische und immersive Erfahrung, die abstrakte Konzepte greifbarer macht. Durch diesen digitalen Ansatz können die Schüler Pflanzenstrukturen beobachten, die Lichtabsorption simulieren und die Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie auf hochgradig interaktive Weise verfolgen. Die Übung verbessert nicht nur das konzeptionelle Verständnis, sondern auch das Engagement, die Motivation und die Beibehaltung wissenschaftlicher Kenntnisse der Schüler.

Durchführung der AR-Übung

1. Lernziele

Die Übung zielt darauf ab

- Den Schülern den Prozess der Photosynthese näherbringen und dabei hervorheben, wie Pflanzen Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln.
- Verbesserung der Visualisierungsfähigkeiten durch die Verwendung interaktiver 3D-Modelle, um die Rolle verschiedener Pflanzenstrukturen zu untersuchen.
- Befähigung der Schüler, Umweltvariablen wie Lichtintensität und Kohlendioxidgehalt zu manipulieren, um deren Auswirkungen auf die Photosynthese zu beobachten.
- Förderung des aktiven Lernens und der wissenschaftlichen Neugier, indem die Schüler dazu angeregt werden, zu experimentieren, zu analysieren und Schlussfolgerungen zu ziehen.

2. AR-basierte Lernerfahrung

Die mobile AR-Anwendung simuliert wichtige Schritte des Photosynthesevorgangs und ermöglicht es den Schülern, mit ihren Mobilgeräten oder Tablets mit digitalen Pflanzenmodellen zu interagieren. Die Übung umfasst die folgenden Hauptfunktionen:

- Interaktion mit Pflanzenmodellen: Die Schüler können 3D-Pflanzenmodelle vergrößern und drehen und sich dabei auf wichtige Strukturen wie Blätter, Chloroplasten und Spaltöffnungen konzentrieren. Sie können auf verschiedene Komponenten tippen, um mehr über ihre Funktionen bei der Photosynthese zu erfahren.
- Simulation der Lichtabsorption: Die Anwendung veranschaulicht, wie Chlorophyll Lichtenergie absorbiert und eine Reihe von Reaktionen auslöst. Anhand von Animationen können die Schüler die Anregung von Elektronen und die Spaltung von Wassermolekülen verfolgen, bei der Sauerstoff freigesetzt wird.
- Beobachtung des Photosynthesevorgangs: Eine Schritt-für-Schritt-Animation führt die Schüler durch die lichtabhängigen Reaktionen und den Calvin-Zyklus und hebt dabei die Umwandlung von Lichtenergie in ATP und NADPH durch die „ C_3 “ sowie die anschließende Umwandlung von Kohlendioxid in Glukose hervor.





- **Einstellbare Umweltfaktoren:** Die Schüler können die Lichtintensität, den CO₂-Gehalt und die Temperatur innerhalb der Simulation verändern, um zu beobachten, wie diese Variablen die Geschwindigkeit der Photosynthese beeinflussen. Diese Funktion ermöglicht Experimente in Echtzeit, bei denen die Lernenden Hypothesen testen und Ergebnisse analysieren können.
- **Bewertungs- und Feedback-Mechanismus:** Die Anwendung enthält integrierte Bewertungsinstrumente wie Quizfragen und interaktive Übungen, um das Verständnis und den Lernfortschritt der Schüler zu verfolgen. Diese Bewertungen messen:
 - Verständnis der Schlüsselkonzepte (z. B. Identifizierung der Reaktanten und Produkte der Photosynthese).
 - Die Fähigkeit, experimentelle Daten zu analysieren (z. B. Vorhersage, wie sich veränderte Lichtverhältnisse auf die Sauerstoffproduktion auswirken).
 - Auseinandersetzung mit der Simulation (z. B. Erforschung verschiedener Pflanzenstrukturen und ihrer Rolle bei der Energieumwandlung).

Vergleich mit traditionellen Lehrmethoden

Eine der größten Herausforderungen im traditionellen Unterricht besteht darin, dass es den Schülern oft schwerfällt, sich molekulare Prozesse auf mikroskopischer Ebene vorzustellen. Lehrbücher und statische Diagramme vermitteln nur einen begrenzten Einblick in die Dynamik der Photosynthese. Darüber hinaus gelingt es im vorlesungsbasierten Unterricht oft nicht, die Schüler aktiv in das praktische Lernen einzubeziehen.

Im Gegensatz dazu verbessert der AR-basierte Ansatz die konzeptionelle Klarheit, indem er den Schülern ermöglicht, mit digitalen Modellen zu interagieren, Echtzeit-Simulationen zu beobachten und Variablen zu manipulieren, um sofortige Ergebnisse zu sehen. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Unterschiede auf:

Aspekt	Traditioneller Unterricht	AR-basiertes Lernen
Visualisierung	Statische Diagramme und Text	Interaktive 3D-Modelle und Animationen
Schülerengagement	Passives Zuhören und Lesen	Aktive Teilnahme und Erkundung in Echtzeit
Experimente	Begrenzt auf Ressourcen im Klassenzimmer	Virtuelle Simulationen mit anpassbaren Bedingungen
Konzeptionelles Verständnis	Kann zu Fehlvorstellungen führen	Klare, interaktive Demonstrationen
Bewertung	Papierbasierte Quizze und Tests	Integrierte App-basierte Quizze und Feedback

Die AR-Übung schließt die Lücke zwischen Theorie und praktischer Anwendung und macht das Lernen immersiver, flexibler und effektiver.

Vorteile der AR-basierten Photosynthese-Übung





Die Implementierung von Augmented Reality im Unterricht zum Thema Photosynthese bietet mehrere Vorteile:

1. Verbesserte konzeptionelle Klarheit: Die interaktiven 3D-Modelle und Animationen machen abstrakte biologische Prozesse leichter verständlich.
2. Erhöhte Beteiligung der Schüler: Die praktische, spielerische Lernerfahrung motiviert die Schüler, sich aktiv an der wissenschaftlichen Erforschung zu beteiligen.
3. Experimente in Echtzeit: Durch die Veränderung von Umweltfaktoren können die Schüler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in der Photosynthese analysieren.
4. Zugänglichkeit und Komfort: Die AR-basierte mobile Anwendung ist tragbar und benutzerfreundlich, sodass die Schüler in ihrem eigenen Tempo lernen können.
5. Datengestütztes Lernen: Die integrierten Bewertungsinstrumente liefern sofortiges Feedback und helfen Lehrern und Schülern, den Fortschritt effektiv zu verfolgen.

Phase	Beschreibung
Erkunden	- Forschung und Entdeckung: Untersuchen Sie, wie die natürliche Photosynthese in Pflanzen funktioniert und wie sie Solartechnologien inspiriert.
	- Inhaltsentwicklung: Entwickeln Sie grundlegende Materialien zu bioinspirierter Solartechnologie, Photosynthese und AR-Integration.
	- Bedarfsanalyse: Bewerten Sie das Verständnis der Schüler für Photosynthese, Solarenergie und MINT-Integration, um die Lernerfahrungen individuell anzupassen.
Durchführung	- Umsetzung des Lehrplans: Halten Sie interaktive Unterrichtsstunden über Solarenergie, inspiriert von der Pflanzenbiologie, unter Verwendung von AR-Tools.
	- Interaktive Übungen: Verwenden Sie AR-Anwendungen (z. B. PhotosynthesisVR, McGraw Hill AR) zur Simulation der Photosynthese und zum Entwurf bioinspirierter Solarzellen.
	- Feedback-Erfassung: Sammeln Sie durch Diskussionen und Reflexionen Feedback von Schülern und Lehrern zur Wirksamkeit von AR und zu den Lernergebnissen.
Verbes sern	- AR-Integration: Einbettung von AR-Simulationen zur Visualisierung molekularer Photosyntheseprozesse und zur Überprüfung der Effizienz von Solarzellen.
	- Interaktives Lernen: Ermöglichen Sie den Schülern, Umweltfaktoren wie Lichtintensität und CO ₂ -Konzentration in AR zu manipulieren.





	Gamifizierte Inhalte: - Punkte und Abzeichen: Belohnen Sie Schüler für das Absolvieren von AR-Herausforderungen (z. B. den Bau eines funktionierenden Solarpanel-Prototyps). - Ranglisten: Bewerten Sie Schüler oder Teams anhand ihrer Leistung in Energieeffizienzsimulationen. - Quests und Levels: Entwerfen Sie progressive Herausforderungen, von der grundlegenden Photosynthese bis zur Herstellung von Solarzellen. - Belohnungen für Erkundungen: Verstecken Sie Fakten oder Komponenten zum Thema Energie in AR-Modellen, um zu einer tiefergehenden Erkundung anzuregen. - Kollaborative spielerische Aufgaben: Teams erstellen und optimieren virtuelle Solarmodule für maximale Effizienz. AR-basierte Bewertungen: - Beziehen Sie AR-Simulationen und virtuelle Labore als Teil der formativen Bewertungen ein, um das Verständnis von Konzepten der Solarumwandlung zu demonstrieren.
--	--

Quellen:

Chen H, Zhang P, Zhang L, Liu H, Jiang Y, Zhang D, Han Z und Jiang L 2016 Kontinuierlicher gerichteter Wassertransport auf der Peristomoberfläche von *Nepenthes alata* Nature [532 85–89](#)

Dong H et al 2023 Bio-inspirierte polyanionische Elektrolyte für hochstabile Zink-Ionen-Batterien Angew. Chem., Int. Ed. [62 e202311268](#)

Dou H, Xu M, Zhang Z, Luo D, Yu A und Chen Z 2024 Festkörperelektrolyt aus Biomasse mit zahlreichen Ionen- und Wasserkanälen für flexible Zink-Luft-Batterien Adv. Mater. [36 2401858](#)

Huang.G, Xu.J, N.Markides.C,. (2023) Hocheffizientes, bioinspiriertes hybrides Multigenerations-Photovoltaikblatt, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38984-7>

Kaiwen.Y, Wang.S, 2024 Teach Photosynthesis to Young Students Using Augmented Reality, DOI: [10.1109/ICALT61570.2024.00018](#), 2024 *IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*

Liu M, Wang S und Jiang L 2017 Von der Natur inspirierte Superbenetzbarkeitssysteme Nat. Rev. Mater. [2 17036](#).

Liu G., Gao F., Gao C. und Xiong Y. 2021 Bioinspiration für effiziente Photosynthesysteme: von Biohybriden zu Biomimetika Chem. Catal. [1 1367–77](#).





Mirkovic T, Ostroumov E E, Anna J M, van Grondelle R, Govindjee und Scholes G D 2017 Lichtabsorption und Energieübertragung in den Antennenkomplexen photosynthetischer Organismen Chem. Rev. 117 249–93.

Navarro-Segarra M, Tortosa C, Ruiz-Díez C, Desmaire D, Gea T, Barrena R, Sabaté N und Esquivel J P 2022 Eine pflanzenähnliche Batterie: eine biologisch abbaubare Energiequelle, die für die Präzisionslandwirtschaft ökologisch gestaltet wurde Energy Environ. Sci. 15 2900–15.

Nguyen P D, Duong T M und Tran P D 2017 Aktuelle Fortschritte und Herausforderungen bei der Entwicklung eines funktionsfähigen künstlichen Blattes für die solare Wasserspaltung J. Sci.: Adv. Mater. Devices 2 399–417

Pires N D und Dolan L 2012 Morphologische Evolution bei Landpflanzen: neue Designs mit alten Genen Phil. Trans. R. Soc. A 367 508–18.

Reece S Y, Hamel J A, Sung K, Jarvi T D, Esswein A J, Pijpers J J H und Nocera D G 2011 Drahtlose solare Wasserspaltung mit Halbleitern auf Siliziumbasis und reichlich vorhandenen Katalysatoren Science 334 645–8

Sun Z, Liao T, Li W, Qiao Y und Ostrikov K 2019 Jenseits von Muscheln: bioinspirierte 2D-photonische und photoelektronische Bauelemente Adv. Funct. Mater. 29 1901460

Van Noorden R 2012 „Künstliches Blatt“ steht vor wirtschaftlicher Hürde Nature (<https://doi.org/10.1038/nature.2012.10703>)

Velasco-Garcia L und Casadevall C 2023 Bioinspirierte photokatalytische Systeme für eine kompartimentierte künstliche Photosynthese Commun. Chem. 6 263.

Wang.Z, Hu.Y, Zhang.S und Sun.Y. 2022. Künstliche Photosynthesesysteme für die Umwandlung und Speicherung von Sonnenenergie: Plattformen und ihre Realitäten, DOI: 10.1039/d1cs01008e

Wijerathne.B, Liao.T, Jiang.X, Zhou.J und Sun.Z. (2025). Von Pflanzen inspirierte Oberflächen und Schnittstellen für nachhaltige Technologien, <https://doi.org/10.1088/2752-5724/ad93ea>

Yu L, Li X, Luo C, Lei Z, Wang Y, Hou Y, Wang M und Hou X 2024 Bioinspirierte nanofluidische Iontronik für gehirnnähnliches Computing Nano Res. 17 503–14

Zhang F., Liao T., Yan C. und Sun Z. 2024 Bioinspirierte Designs in aktiven metallbasierten Batterien Nano Res. 17 587–601

Zhang Y., Mei J., Yan C., Liao T., Bell J. und Sun Z. 2020 Bioinspirierte 2D-Nanomaterialien für nachhaltige Anwendungen Adv. Mater. 32 1902806





Zhang F., Liao T., Yan C. und Sun Z. 2024 Bioinspirierte Designs in aktiven metallbasierten Batterien Nano Res. 17 587–601

Zhou H., Guo J., Li P., Fan T., Zhang D. und Ye J. 2013 Blattförmiges 3D-hierarchisches künstliches Photosynthesesystem aus Perowskit-Titanaten zur photochemischen Reduktion von CO₂ zu Kohlenwasserstoffbrennstoffen Sci. Rep. 3 1667

<https://avrd.medien-campus.h-da.de/projekt/95635/?utm>

https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/bullet-trains-green-buildings-innovators-take-cue-nature-through-biomimicry-2025-01-13/?utm_source=chatgpt.com

https://www.rsb.org.uk/images/15_Photosynthesis.pdf

<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>

[https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/special-programs/Education in Agriculture/soybean-science/GRC%20Photosynthesis%20lesson-final.pdf](https://www.uaex.uada.edu/farm-ranch/special-programs/Education%20in%20Agriculture/soybean-science/GRC%20Photosynthesis%20lesson-final.pdf)

<https://opentextbc.ca/biology/chapter/5-1-overview-of-photosynthesis/>

<https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/>

<https://techxplore.com/news/2023-08-bio-inspired-solar-devices-boost-stability.html>

<https://list.solar/news/bio-inspired-1/>

https://stileapp.com/static/CLL%20handouts/Lesson_035_handout.pdf

<https://sinovoltaics.com/technology/solar-fuels-an-introduction-to-artificial-photosynthesis/>

<https://dotandlinelearning.com/blog/biology/chapter-6-photosynthesis/>

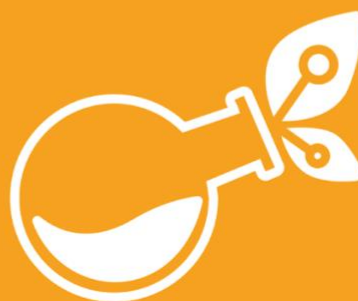
<https://www.britannica.com/science/photosynthesis>

<https://innovationorigins.com/en/a-big-leap-in-solar-power-the-bio-inspired-photovoltaic-leaf-shows-greater-efficiency/>





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

*Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.