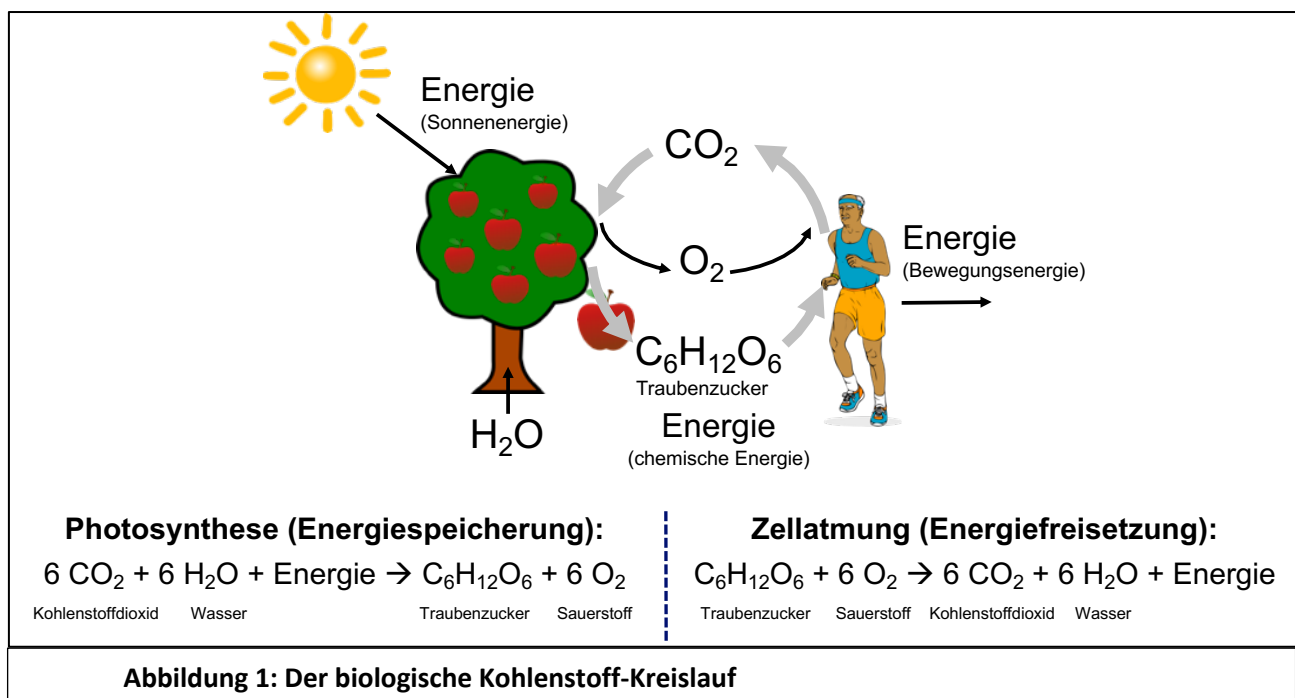


## Wissensbox: Strom aus Boden erzeugen

Wie kann der Energiebedarf der Welt dauerhaft gedeckt werden, ohne dass sich das Klima mehr und mehr erwärmt? Dafür suchen Forscher nach erneuerbaren Energien. Hierbei richten sie ihren Blick auch auf den Boden. Denn im Erdboden leben Bakterien, die chemische Energie, die in zersetzten pflanzlichen und tierischen Materialien gespeichert ist, in elektrische Energie umwandeln können.

### Was ist chemische Energie und wie wird sie in organischen Substanzen gespeichert?

Zunächst einmal gilt es zu verstehen, dass die Sonne unsere größte Energiequelle ist und Pflanzen bei der Photosynthese mit Hilfe von Sonnenenergie chemische Energie herstellen können. „Chemische Energie“? - Ja, vielleicht habt ihr ja auch schon mal vom Traubenzucker als Energiespender gehört. Pflanzen produzieren bei der Photosynthese aus CO<sub>2</sub> und Wasser Traubenzucker. Dieser enthält mehr Energie als die Ausgangsstoffe, man kann also sagen, es wurde Energie im Traubenzucker gespeichert. Wenn man ihn verbrennt, entsteht wieder CO<sub>2</sub> und die gespeicherte Energie wird wieder freigesetzt. Dieser Prozess wird von Menschen, Tieren, Pflanzen und Bakterien genutzt, um Energie zu gewinnen. Dies ist der **biologische Kohlenstoff-Kreislauf**.

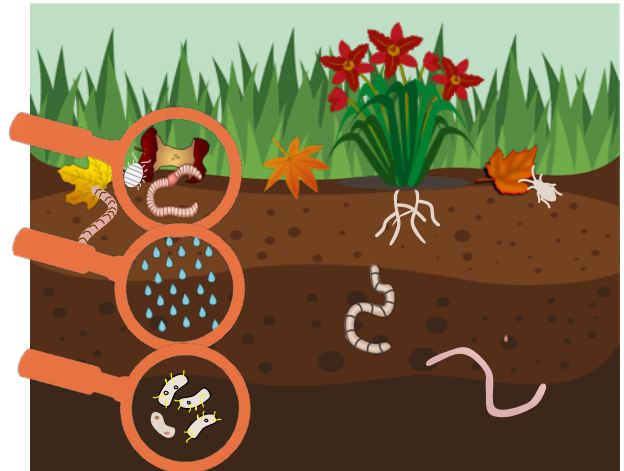


Da Pflanzen keine reinen Zuckerfabriken sind, dient der Traubenzucker nur als Grundbaustein, aus dem viele andere Verbindungen hergestellt werden, aus denen die Pflanze besteht. All diese chemischen Verbindungen nennt man zusammengefasst **organische Substanz**. Diese organische Substanz ist wie der Traubenzucker hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff aufgebaut.

Wenn der Baum Blätter abwirft, Pflanzen oder Tiere absterben, werden die organischen Verbindungen durch Kleinstlebewesen und Bodenbakterien wieder abgebaut.

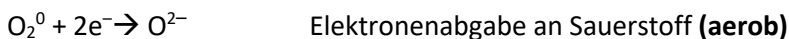
## Welche Prozesse finden im Boden beim Abbau von organischen Verbindungen statt?

1. An der Erdoberfläche werden abgestorbene Pflanzenteile von Kleinstlebewesen und Bodenbakterien zu Nährstoffen wie Zucker, Nitrat, Phosphat abgebaut.
2. Mit dem Regen versickern die Nährstoffe im Boden.
3. In tieferen Bodenschichten, wo kein Sauerstoff hinkommt, leben anaerobe Bakterien, zu denen auch die sogenannten „elektrogenen“ Bakterien gehören. Diese nehmen die in den Boden geschwemmten Nährstoffe auf und scheiden dafür Elektronen aus, die sie zum Beispiel an Nitrat oder bestimmte Eisensalze im Boden abgeben.

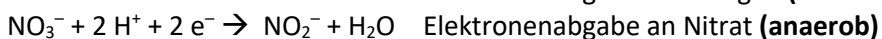
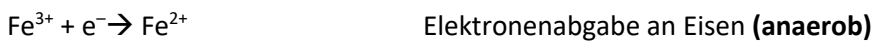


### Exkurs: Warum ist es wichtig, dass es anaerobe Bakterien sind?

Wie in der Abbildung zum biologischen Kreislauf dargestellt, nutzen Menschen, aber auch Tiere und Bakterien organische Substanz wie z.B. Traubenzucker zur Energiegewinnung, indem sie ihn mit Sauerstoff wieder zu  $\text{CO}_2$  abbauen. Bei diesem Vorgang reagieren der Kohlenstoff und der Wasserstoff aus dem Traubenzucker mit Sauerstoff, es ist also eine **Oxidation**. Nach der verallgemeinerten Definition der Oxidation sind damit nicht nur Reaktionen mit Sauerstoff bezeichnet, sondern alle **Reaktionen, bei denen Elektronen abgegeben werden** (hier vom Kohlenstoff und vom Wasserstoff). Der Reaktionspartner (hier der Sauerstoff) nimmt die Elektronen auf. Da die biochemischen Vorgänge komplex sind und über viele Zwischenschritte ablaufen, ist hier nur dargestellt, wie die Elektronen an den Sauerstoff abgegeben werden:



Wenn die Bakterien jedoch keinen Sauerstoff zur Verfügung haben, müssen sie andere Verbindungen finden, an die sie die Elektronen loswerden können, denn auch sie gewinnen aus Redoxreaktionen Energie, die sie zum Leben benötigen. Elektrogene Bakterien können die entstandenen Elektronen an Eisen(III)-Ionen oder Mangan(IV)-Ionen abgeben und diese zu Eisen(II) bzw. Mangan(II) reduzieren. Auch eine Abgabe an Nitrat-Ionen ist möglich.



(Weitere Einzelheiten kannst du unter dem Stichwort „anaerobe Atmung“ recherchieren.)

**Da es den elektrogenen Bakterien möglich ist, die Elektronen auf einen Feststoff anstelle eines Gases zu übertragen, können sie die Elektronen auch an eine Elektrode abgeben, und damit die Gewinnung von Strom ermöglichen.**

Das Material der Elektrode wird dabei so gewählt, dass es durch die Elektronenaufnahme nicht reagiert, sondern die Elektronen weiterleitet (siehe nächste Seite).

Doch wie kann man diese Erkenntnisse nutzen, um Strom zu gewinnen? Dazu werden Mikrobielle Brennstoffzellen (abgekürzt MBZ) im Boden installiert.

## Was sind Mikrobielle Brennstoffzellen (MBZs)?

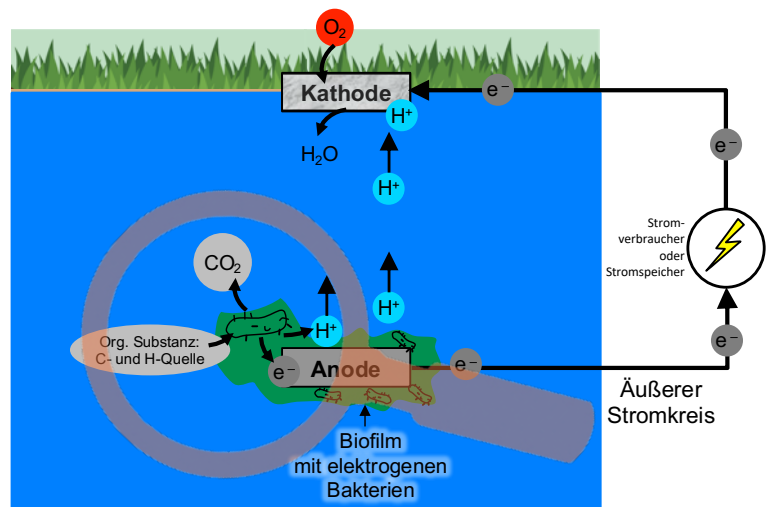
Es gibt verschiedene Arten von Mikrobiellen Brennstoffzellen. Hier sind erst einmal die Boden-basierten Mikrobiellen Brennstoffzellen gemeint. Sie bestehen aus:

- zwei **Elektroden** (Anode und Kathode), die durch Stromkabel verbunden sind, an denen Stromverbraucher und/oder Stromspeicher angeschlossen werden

Das weitere liefert eigentlich schon die Natur (der Mensch kann höchstens ein bisschen nachhelfen):

- feuchten Boden, der als **Elektrolyt** dient und dadurch Wasserstoff-Ionen transportieren kann
- **Organische Substanzen** im Boden, die als „**Brennstoff**“ dienen
- **elektrogene Bakterien**, die diesen Brennstoff als Nahrung aufnehmen und dafür Elektronen ausscheiden

Die Elektroden sind aus elektrisch leitendem Material hergestellt. Die **Kathode** wird oben an der Grenze zwischen Boden und Luft platziert, die **Anode** wird unten in den Boden gesteckt. Die **elektrogenen Bakterien**, die im Boden leben, ernähren sich von **organischen Substanzen** und produzieren dabei **CO<sub>2</sub>**, **Elektronen (e<sup>-</sup>)** und **Wasserstoff-Ionen (H<sup>+</sup>)**. Wenn sich die Bakterien in der Nähe der Anode befinden, geben sie ihre Elektronen an diese ab. Von dort fließt Strom durch das Kabel zu den dort angeschlossenen Stromabnehmern oder Stromspeichern



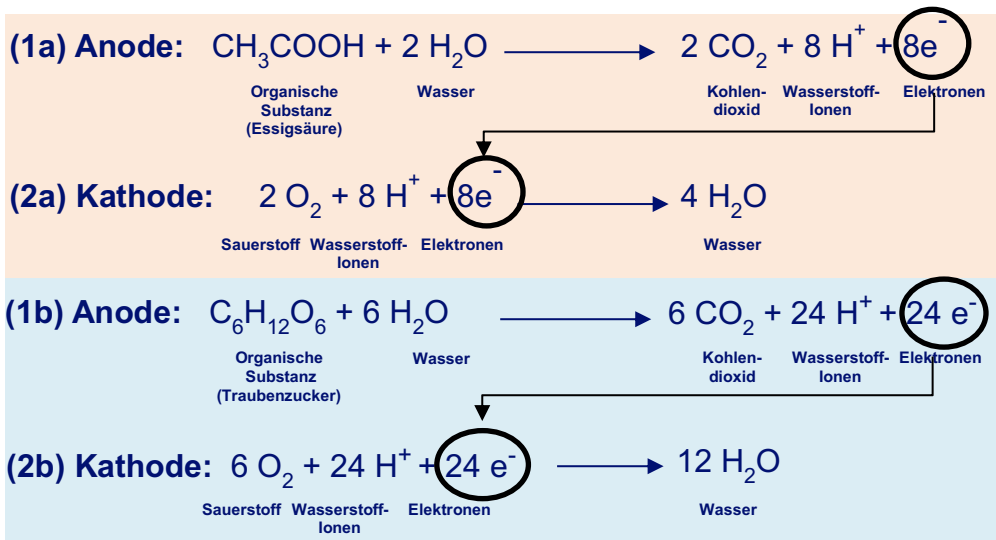
und weiter zur Kathode. Die Wasserstoff-Ionen wandern durch den Boden von der Anode zur Kathode. Dazu muss der Boden Ionen (geladene Teilchen) leiten können, er muss also ziemlich feucht sein und Salze enthalten, um die Leitfähigkeit im Vergleich zu normalem Wasser zu erhöhen. Wie bei Batterien nennt man diese leitfähige Flüssigkeit **Elektrolyt**. An der Kathode, die an der Bodenoberfläche ist, verbinden sich dann die Wasserstoff-Ionen mit den Elektronen und mit Sauerstoff aus der Luft, sodass **Wasser** entsteht.

## Was ist das Besondere, sodass auf diese Weise Strom gewonnen werden kann?

Die chemischen Reaktionen, die an der Anode und Kathode stattfinden, sind **Redoxreaktionen**, also Reaktionen, bei denen Elektronen übertragen werden. Da diese Redoxreaktionen räumlich getrennt voneinander stattfinden, nämlich die Elektronen-erzeugende Reaktion (=Oxidation) an der Anode (1) und die Elektronen-verbrauchende Reaktion (=Reduktion) an der Kathode (2), entsteht ein Spannungsunterschied zwischen den Elektroden, der dazu führt, dass Elektronen durch den äußeren Stromkreis fließen. Auf diese Weise lässt sich Strom, also elektrische Energie, gewinnen.

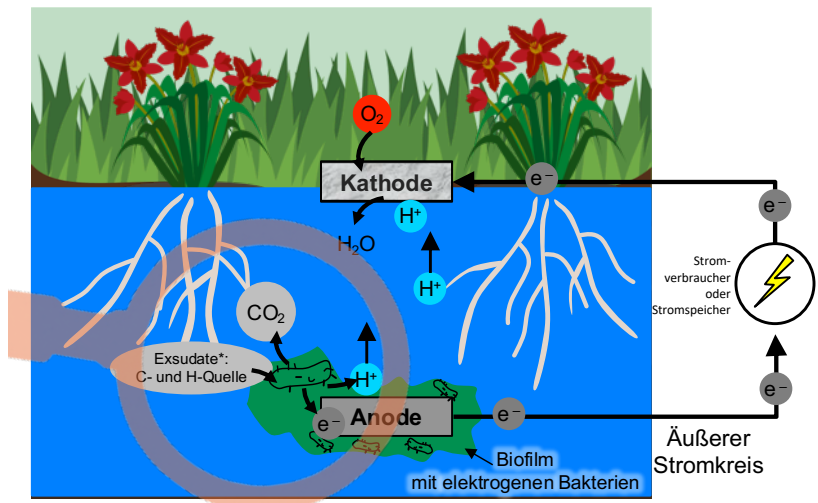
In den folgenden Kästen sind die chemischen Reaktionen an der Anode und Kathode dargestellt. Je nachdem, was man als organische Substanz angibt (Traubenzucker oder Essigsäure), erhält man die Reaktionen 1a und 2a oder 1b und 2b.

(Essigsäure ist als Beispiel für eine organische Verbindung dargestellt, denn häufig haben andere Bakterien den Traubenzucker aus der Photosynthese schon wieder so weit abgebaut, dass Essigsäure entstanden ist, die von diesen Bakterien nicht weiter verwertet werden kann und daher ausgeschieden wird. Die Reaktionen sind aber sehr ähnlich, wie man erkennt.)



## Was sind Pflanzen-basierte Mikrobielle Brennstoffzellen (P-MBZs)?

Pflanzen-Mikrobielle Brennstoffzellen sind eine Weiterentwicklung der beschriebenen Boden-basierten Brennstoffzellen. Sie entstanden aus der Feststellung, dass es tief im Boden gar nicht mehr so viel organisches Material gibt, das als Brennstoff dienen kann, denn das meiste wird bereits in den oberen Bodenschichten abgebaut. Weiterhin hatte man beobachtet, dass Pflanzenwurzeln ständig organische Substanzen an den Boden abgeben, nicht nur, wenn sie absterben. Diese sogenannten Exsudate bestehen unter anderem aus Zuckermolekülen und organischen Säuren und können leicht von den Mikroorganismen, die im Wurzelbereich der Pflanzen leben, aufgenommen werden. Tatsächlich finden sich auch hier, dicht unter der Bodenoberfläche zahlreiche elektrogene Bakterien, die Strom erzeugen können, und durch den ständigen Nachschub leicht abbaubarer Stoffe ist die Stromausbeute höher als bei der Boden-basierten MBZ (laut einer Veröffentlichung ca. 7-mal so hoch). Mit dieser neuen Technologie beschäftigen sich z.B. die spanische Firma Bioo, welche das „Bioo Ed“ Experimentierkit anbietet, ein Unternehmen namens Plant-e aus den Niederlanden sowie viele Forscherteams auf der ganzen Welt.



Auch bei dieser MBZ ist eine gute Durchfeuchtung des Bodens wichtig, weshalb sie zum Beispiel beim Reisanbau eingesetzt wurde, der meist auf sehr feucht gehaltenen Böden erfolgt. Andere Pflanzen, mit denen diese Art Brennstoffzelle bisher erforscht wurde, waren z.B. Gräser, Wasserlinsen, Süßkartoffeln und Blumenrohr (Canna).



von links nach rechts:  
 Salz-Schlickgras (Spartina anglica) von Jürgen Howaldt - Selbst fotografiert, CC BY-SA 2.0 de, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1329193>  
 Bucklige Wasserlinse (Lemna gibba) von Christian Fischer, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=189083>  
 Blumenrohr (Canna) von Usien - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=34541512>