

**PFLANZENWURZELN** stecken nicht einfach nur in steriler Erde. Stattdessen tummelt sich eine große Vielfalt verschiedenster Mikroben im Boden. Milliarden einzelner Mikroorganismen sind in einem kleinen Brocken Erde verborgen. Da ist es nicht verwunderlich, dass sich im Laufe der Evolution untrennbare Gemeinschaften zwischen Pflanzen und Mikroorganismen entwickelt haben. Das Zusammenspiel zwischen beiden Gruppen ist komplex. In vielen Fällen profitieren sowohl die Pflanzen von den Mikroben, die an ihren Wurzeln leben, als auch die Mikroben von ihren Pflanzenpartnern. In manchen Fällen sind die Mikroben auch schädlich und gewinnen an Oberhand, weil sich bestimmte Gleichgewichtszustände zu ihren Gunsten verschoben haben. Auch unsere Nutzpflanzen sind in hohem Maße von den sie umgebenden Mikroben abhängig. Ohne die Mikroben im Boden könnten sie nicht gedeihen und Früchte tragen. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in diese faszinierende Welt unter unseren Füßen.

## DIE NACHBARN VON UNTEN

# Pflanzen leben nicht allein ...

... vielmehr besiedelt eine riesige Vielfalt von Mikroorganismen ihren Wurzelraum und ihre Organe. Obgleich für das bloße Auge unsichtbar, sollte man die winzigen Kolonisten nicht unterschätzen. Sie beeinflussen die Pflanzenernährung und Gesundheit, ihre Toleranz gegenüber Stress wie Trockenheit, und sie helfen bei der Abwehr von Krankheitserregern.

### Spricht man vom Mikrobiom, meint man meist das Mikrobiom des Menschen.

Die Zahl der Mikroben, die auf und in unserem Körper leben, ist zehnmal größer als die Zahl all unserer Zellen. Wir besitzen über 100 Billionen von ihnen. Häufig verwenden wir die Begriffe Darm-, Haut- oder Mundflora. Die Bakterien helfen bei der Verdauung, regulieren unser Immunsystem, schützen vor Krankheitserregern und produzieren wertvolle Vitamine.

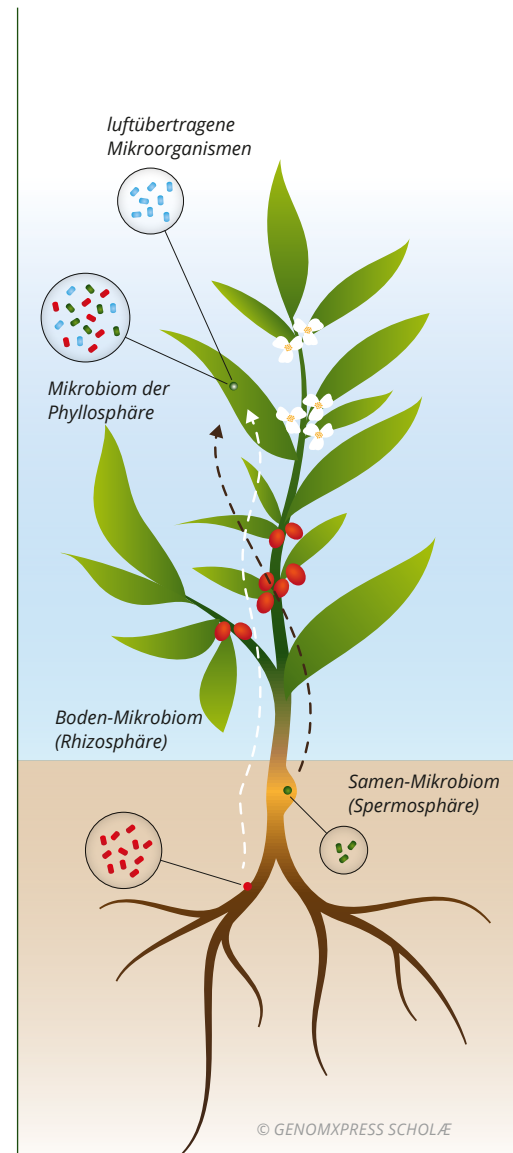
### Bei Pflanzen ist das ähnlich.

Auch Pflanzen haben ein Mikrobiom, das eine wichtige Rolle für ihre Fitness und auch für den Ertrag von Nutzpflanzen spielt. Die meisten Pflanzen beherbergen unterschiedliche mikrobielle Gemeinschaften in ihrer Nachbarschaft, auf aber auch in ihren Geweben. In ihrer Gesamtheit werden sie als Pflanzenmikrobiota

oder Phytobiom bezeichnet. Die Mikroben leben in einer komplexen Lebensgemeinschaft mit den Pflanzen. Dabei handelt es sich um Bakterien, Archaeen und Pilze. Einige sind vorteilhaft für die Pflanzen, andere sind sogenannte Pflanzenpathogene und können sie schädigen oder sogar abtöten. Von der Mehrheit der mikrobiellen Kolonisten ist die Wirkung auf Wachstum und Fitness ihrer Pflanzen bisher noch gar nicht erforscht.

### Eine Pflanze kann in bestimmte Zonen unterteilt werden.

Diese sogenannten Mikrohabitate werden von ganz unterschiedlichen Mikroorganismengemeinschaften besiedelt. Die dünne Erdschicht im unmittelbaren Einzugsbereich der Wurzel wird als Rhizosphäre bezeichnet. Sie ist der mikrobielle Lebensraum, in dem die physikalische, chemische und biologische Zusammen-



**Ursprung des Pflanzenmikrobioms.** Das Pflanzenmikrobiom stammt hauptsächlich aus dem Boden. In einigen Fällen wandern die Mikroben von dort zu den oberirdischen Teilen der Pflanze. Zusätzlich wird die Phyllosphäre von luftübertragenen Arten besiedelt. Oft spielt auch die Mikrobengemeinschaft der Samen eine Rolle. (Nach: Sánchez-Cañizares C., Jorrín B., Poole P.S., Tkacz A. (2017) Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome. *Curr Opin Microbiol.*, 38:188-196. doi.org/10.1016/j.mib.2017.07.001)

**Von Mikroorganismen besiedelte Zonen einer Pflanze (Mikrohabitate)**

<b>Phyllosphäre</b>	Bereich aller oberirdischen Pflanzenorgane (also der Blätter, aber auch Blüten, Gewebe, Stängel)
<b>Rhizosphäre</b>	Zone um die Wurzel herum, wo die Eigenschaften des Bodens direkt von der Pflanze beeinflusst werden
<b>Anthosphäre</b>	Zone um die Blüten
<b>Carposphäre</b>	Zone um die Früchte
<b>Caulosphäre</b>	Zone um den oberirdischen Teil des Stängels
<b>Phylloplane</b>	unmittelbare Blattoberflächen
<b>Endosphäre</b>	Bereiche innerhalb der ober- und unterirdischen Pflanzengewebe
<b>Spermosphäre</b>	Bodenzone unter dem direkten Einfluss von keimendem Saatgut
<b>Laimosphäre</b>	Zone des Bodens, der die unterirdischen Teile des Stängels umgibt
<b>Rhizoplane</b>	unmittelbar mit der Wurzeloberfläche assoziierter mikrobieller Lebensraum

setzung des Bodens direkt von der Pflanze beeinflusst wird. Die Rhizosphäre beheimatet deshalb eine besonders große Vielfalt an Mikroorganismen, das Wurzelmikrobiom. Das Wurzelmikrobiom steht meist auch im Zentrum der Mikrobiomforschung. Der mikrobielle Lebensraum auf der Oberfläche der oberirdischen Pflanzenorgane, also vor allem der Blätter, heißt Phyllosphäre. Die Phyllosphäre wird wiederum in kleinere Bereiche unterteilt, je nachdem ob nur die Zone um die Blüten, die Blätter oder die Samen gemeint ist.

**Woher kommen eigentlich die Mikroben?**

Der Boden ist vermutlich der am dichtesten besiedelte Raum auf der Erde und der Hotspot der Pflanze-Mikroben-Interaktion. Neben Wurzeln, Würmern, Insekten, Algen und Pilzen sind Bakterien hier reichlich vorhanden. Ein Gramm trockene Erde enthält circa zehn Milliarden Mikroorganismen. Tausende unterschiedliche Arten tummeln sich auf engstem Raum. Zusätzlich zu den Mikroorganismen der Rhizosphäre, die in einigen Fällen auch vom Boden zu den Blättern wandern, kann die Phyllosphäre von luftübertragenen Arten besiedelt werden. Bei einigen Pflanzenarten werden die Mikrobengemeinschaften der Samen sogar auf die nächste Generation „vererbt“. Dies macht man sich auch im Pflanzenanbau zunutze, indem man die Samen von Nutzpflanzen mit bestimmten Mikroorganismen beimpft.

**Die Wechselwirkungen zwischen Mikroben und Pflanzen sind komplex.**

Sie sind vom gegenseitigen Austausch von Signalmolekülen und Stoffwechselprodukten geprägt. Durch sogenannte Exsudate beeinflussen Pflanzen das Mikrobiom ihrer Rhizosphäre. Die Bezeichnung leitet sich vom lateinischen exsuda-

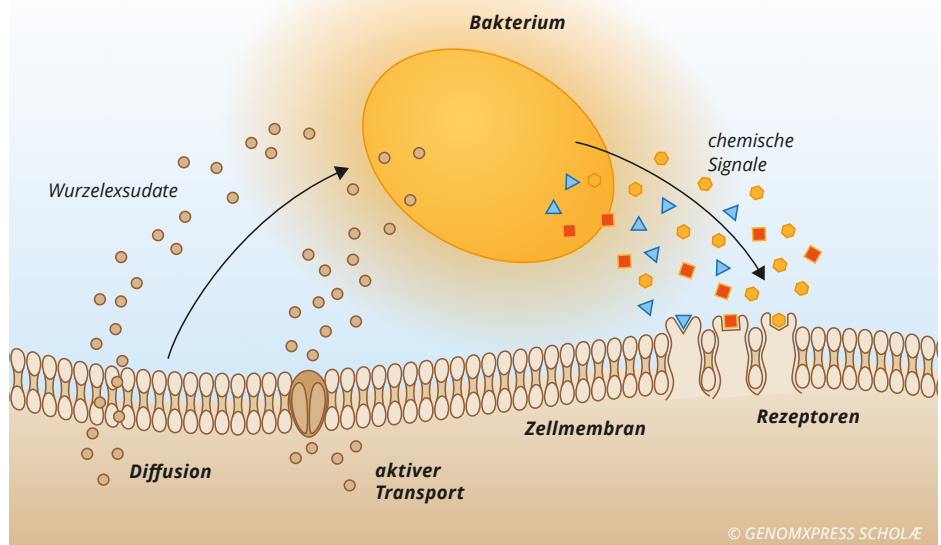
re ab, was mit „ausschwitzen“ oder „abfließen“ übersetzt werden kann. Wurzelexsudate sind verschiedenste Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln. Es sind meist wasserlösliche organische Stoffwechselprodukte wie freie Zuckermoleküle, organische Säuren, Aminosäuren und Proteine, die in den Boden abgegeben werden. Diesen Prozess bezeichnet man als Rhizodeposition. Pflanzen prägen so die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens. Beispielsweise können sie durch die Abgabe geringer Mengen organischer Säuren den pH-Wert im wurzelnahen Boden regulieren. Sie können so aber nicht nur die Umgebung der Wurzeln verändern, sondern auch Mikroben anlocken oder fernhalten und stabile Mikrobengemeinschaften fördern. Im Laufe der Evolution hat sich ein ausgeklügeltes Kommunikationssystem entwickelt, durch das Pflanzen den Boden, die

Zusammensetzung und auch das Verhalten der Mikroorganismen in ihrer Rhizosphäre steuern können.

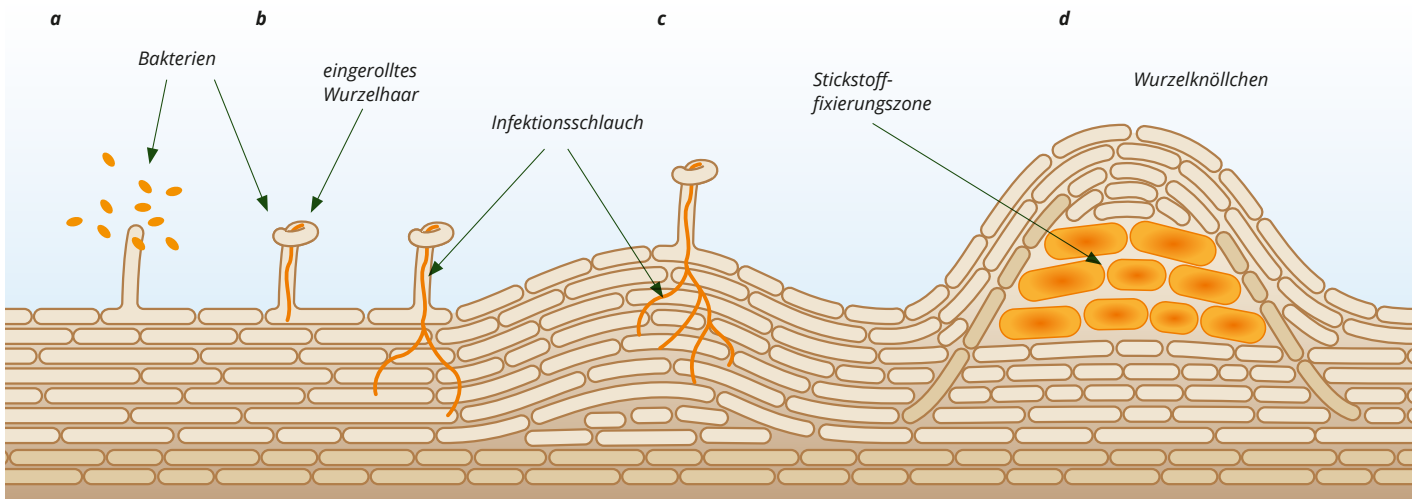
Die Bodenorganismen profitieren von den abgegebenen organischen Kohlenstoffverbindungen. Sie ernähren sich von ihnen, insbesondere von den Assimilaten, die durch die Photosynthese in den Blättern produziert wurden. Sie verändern ihren Stoffwechsel gezielt, um sich während der Besiedlung oder als Reaktion auf pflanzliche Stressreaktionen an die jeweilige Umgebung anzupassen.

**Viele Pflanzen gedeihen besser in Gegenwart eines gesunden Mikrobioms.**

Denn bestimmte mikrobielle Mitbewohner helfen dabei, Nährstoffe zu erschließen, sich gegen Krankheitserreger zu wappnen oder toleranter gegenüber Stressfaktoren zu sein. Die positiven



**Dialog zwischen den Mikroorganismen des Bodens und der Pflanze.** Die Exsudate der Wurzeln wirken auf bestimmte Mikroben attraktiv. Sie werden von ihnen angezogen. Signal- und Oberflächenmoleküle der Mikroorganismen binden an spezifische Rezeptoren in der Zellmembran und werden so von der Pflanze wahrgenommen. (Nach: Sánchez-Cañizares C., Jorrín B., Poole P.S., Tkacz A. (2017) Understanding the holobiont: the interdependence of plants and their microbiome, *Curr. Opin. Microbiol.*, 38:188-196. doi.org/10.1016/j.mib.2017.07.001.)



**Die Knöllchenbildung erfolgt in mehreren Phasen.** a) Nachdem das Bakterium den geeigneten Symbiosepartner identifiziert hat, erfolgt die Anheftung an dessen Haarwurzeln. b) Durch bestimmte Ausscheidungen der Rhizobien kräuselt sich das Wurzelhaar. c) Nach der Bildung eines Invasionsschlauchs kann das Bakterium in die Haarwurzel eindringen, sich vermehren und dann in die Hauptwurzel einwandern. d) In den Pflanzenzellen bilden sich deformierte Bakterienzellen (Bacteroiden), die die Fähigkeit zur Stickstoff-Fixierung besitzen. Das reife Wurzelknöllchen entsteht durch weitere Zellteilungen der Pflanzenzellen, die durch die Bakterien angeregt wurden. (Nach: Wippel K., Schulze-Lefert P., Garrido-Oter R. (2019) Rhizobien in der Pflanzenmikrobiota, Biol. Unserer Zeit, 49:426-434. doi.org/10.1002/biuz.201910692.)

Auswirkungen auf die Pflanzengesundheit und das Wachstum sind vielfältig und können sowohl direkt als auch indirekt durch das Zusammenspiel mehrerer Prozesse sein. Beispielsweise reagieren Gerstenpflanzen auf eine Wurzelinfektion durch bestimmte Pilze mit der Ausscheidung bestimmter Verbindungen, die wiederum die Produktion pilzhemmender Stoffe durch Bakterien fördern. Andere

Mikroben können schädliche Pathogene in Schach halten, Stoffwechselwege der Pflanze modulieren oder die Genaktivität der Pflanze positiv beeinflussen.

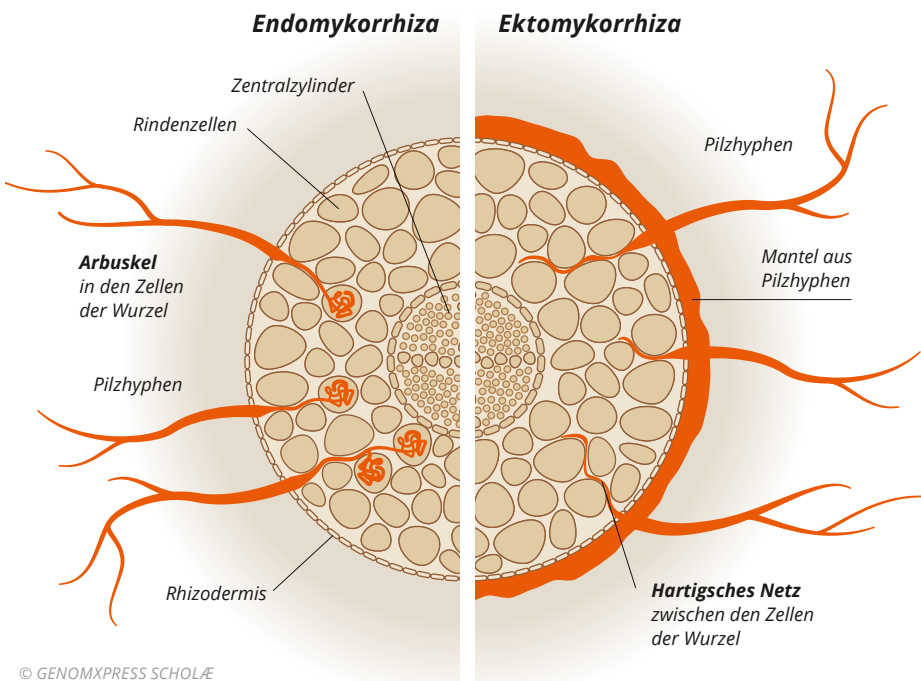
### Pflanzen-Mikrobiom-Beziehungen können unterschiedlich intensiv sein.

Meistens wird das Verhältnis zwischen Pflanzen und ihren Mikrobiota dem

„Kommensalismus“ zugeordnet. Kommensalismus ist eine Form des lockeren Zusammenlebens von Organismen verschiedener Arten. Dabei profitiert der eine, der Kommensale, vom anderen, dem Wirt, ohne dass dieser dabei geschädigt wird (sonst wäre es Parasitismus) oder ohne, dass der Wirt auch einen großen Nutzen hätte (sonst wäre es eine Symbiose).

### Es gibt aber auch sehr enge Pflanzen-Mikroben-Beziehungen.

Sie sind für beide Partner von großem Nutzen. Ein gut erforschtes Beispiel einer solchen Symbiose sind die Knöllchenbakterien (Rhizobien). Der wissenschaftliche Name *Rhizobium* bedeutet „in den Wurzeln lebend“. Rhizobien sind stäbchenförmige, freilebende Bodenbakterien. Sie leben mit Leguminosen, auch Hülsenfrüchtler und Schmetterlingsblütler genannt, wie Luzernen, Sojabohnen, Lupinen, Rotklee oder Linsen aber auch vielen anderen Pflanzen in Symbiose. Die Besonderheit von Rhizobien ist, dass sie elementaren Luftstickstoff binden können (Stickstoff-Fixierung), der dann in Form von Ammonium und Nitrat von den Pflanzen aufgenommen werden kann. Pflanzen sind nicht in der Lage Stickstoff aus der Luft aufzunehmen, den sie jedoch dringend benötigen. Man bezeichnet Rhizobien auch als Knöllchenbakterien, weil sie knollige Schwellungen an den Wurzeln ihrer Pflanzenpartner hervorrufen. Gerade wegen ihrer Fähigkeit mit Rhizobien Symbiosen einzugehen, sind Hülsenfrüchtler von großer wirtschaftlicher Bedeutung als Proteinpflanzen, zur Gründüngung und als Zwischenfrüchte zur Verbesserung des Bodens (vgl. „Zur



© GENOMXPRESS SCHOLÆ

**Es gibt zwei Hauptformen der Mykorrhiza.** Bei der Endomykorrhiza (links) wachsen die Hyphen in die Rinde (den Cortex) der Wurzel ein und schwellen zu Vesikeln an. Sie dienen als Speicherorte. Arbuskuläre Mykorrhizapilze bilden in den Zellen der Wurzelrinde bäumchenartige Gebilde, die Arbuskeln. Hier findet der aktive Stoffaustausch zwischen der Pflanze und dem Mykorrhizapilz statt. Die Pilzhypen außerhalb der Wurzel können sich mehrere Meter weit in den Boden ausdehnen. Die Ektomykorrhiza (rechts) kommt vor allem bei Bäumen und Sträuchern vor. Der Pilz bildet einen dicken Mantel aus Pilzhypen um die Wurzel herum. Als Hartiges Netz wird das dichte Geflecht zwischen den Rindenzellen bezeichnet.

Wurzelbehandlung bitte!“ S. 9). Auch die bodenlebenden Bakterien der Gattung *Francia* können elementaren Luftstickstoff fixieren und leben mit einigen Pflanzen in enger Symbiose, bei denen sie Wurzelknöllchen hervorrufen.

### Mykorrhiza kommt bei den meisten Pflanzen vor.

Als Mykorrhiza (altgr.: Pilzwurzel) bezeichnet man eine Gemeinschaft zwischen den Wurzeln höherer Pflanzen und Pilzen. Der Pilzkörper besteht aus dünnen Filamenten, den Hyphen. Der gesamte Pilzkörper wird als Myzel bezeichnet. Zwischen beiden Partnern, Pilz und Pflanze, findet ein wechselseitiger Stoffaustausch statt: Die Pilze erhalten von der Pflanze vor allem Kohlenhydrate. Die Pflanze wird von den Pilzen mit Phosphor, Spurenelementen, Ammonium und Nitrat als Stickstoffquellen versorgt. Doch es gibt weitere Vorteile für die Pflanze: Das Pilz-Myzel kann sich mehrere Meter weit im Boden ausdehnen, wodurch der Einzugsbereich der Wurzeln enorm vergrößert wird. Wegen des geringen Durchmessers der Pilzhypen können diese auch in feinste Bodenpartikel eindringen und dort viel effizienter als Pflanzenwurzeln Nährstoffe und Wasser erschließen. Dadurch werden die Nährstoffversorgung und die Wasseraufnahme der Pflanze deutlich verbessert. Durch diese Symbiose werden die Pflanzen widerstandsfähiger gegenüber Schädlingen und haben eine deutlich höhere Trockenstresstoleranz. Eine pilzfreie Aufzucht von Bäumen hat in der Regel ein kümmerliches Wachstum zur Folge.



Foto: © Adobe Stock/andersphoto



### Trüffel sind Ektomykorrhizapilze

Auch wenn der Fachausdruck kaum geläufig ist, ein Ektomykorrhizapilz ist sehr bekannt und besonders wertvoll: der Trüffel. Seine oberirdischen Fruchtkörper gelten als Delikatesse und sind weltweit heißbegehrt.

## Zum Weiterlesen und Recherchieren



### Artgerechte Fütterung

Pflanzen kultivieren eigene Bodenbakterien

Während des Wurzelmetabolismus entstehen von Art zu Art unterschiedliche Produkte. Mit ihrer Hilfe passen Pflanzen das Mikrobiom in der Rhizosphäre an ihre Bedürfnisse an.

[www.pflanzenforschung.de/qr/Artgerechte\\_Fuetterung](http://www.pflanzenforschung.de/qr/Artgerechte_Fuetterung)

### Hilfe bei Bedarf

Bodenbakterien können Pflanzen mit Eisen versorgen

Für ein gesundes Wachstum brauchen Pflanzen ausreichend Nährstoffe. Doch gerade Eisen ist im Boden oft für Pflanzen kaum zugänglich. Mit einem Signalmolekül können Pflanzen bei Mikroorganismen „um Hilfe bitten“, damit diese ihnen den Nährstoff zur Verfügung stellen.

[www.pflanzenforschung.de/qr/Hilfe\\_bei\\_Bedarf](http://www.pflanzenforschung.de/qr/Hilfe_bei_Bedarf)

### Wie Wurzel und Mikrobiom kommunizieren

Der Pflanzenforscher Tonni Andersen ist Kovalevskaja-Preisträger 2019. Er will verstehen, wie Wurzeln sich mit Bodenmikroben austauschen und baut am Max-Planck-Institut in Köln eine neue Arbeitsgruppe auf.

[biooekonomie.de/interview/wie-wurzel-und-mikrobiom-kommunizieren](http://biooekonomie.de/interview/wie-wurzel-und-mikrobiom-kommunizieren)

### Krieg der Knöllchen

Wenig Harmonie in der Symbiose zwischen Pflanzen und Rhizobien

Die oft als friedliches Miteinander dargestellte Symbiose zwischen Pflanzen und Rhizobien ist in Wahrheit ein Kampf: die Stickstoff-fixierenden Knöllchenbakterien überleben gerade so in der Wurzelzelle.

[www.pflanzenforschung.de/qr/Krieg\\_der\\_Knoellchen](http://www.pflanzenforschung.de/qr/Krieg_der_Knoellchen)

### Planet Wissen: Bakterien. Vorteil der Symbiose

von Remo Trerotola

Es ist eine der bedeutendsten Fähigkeiten in der Natur: Einige Bakterien können Stickstoff aus der Luft binden. Ein unscheinbarer Prozess mit einer entscheidenden Rolle – auch für uns Menschen. Naturbewusste Gärtner wissen das schon lange und setzen auf die Symbiose zwischen Leguminosen und Bakterien statt auf Dünger. <https://bit.ly/2MVuHJj>

### Rhizobien in der Pflanzenmikrobiota

Wipfel, K., Schulze, Lefert, P. and Garrido, Oter, R. (2019), Biologie in unserer Zeit, 49: 426-434.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/biuz.201910692>



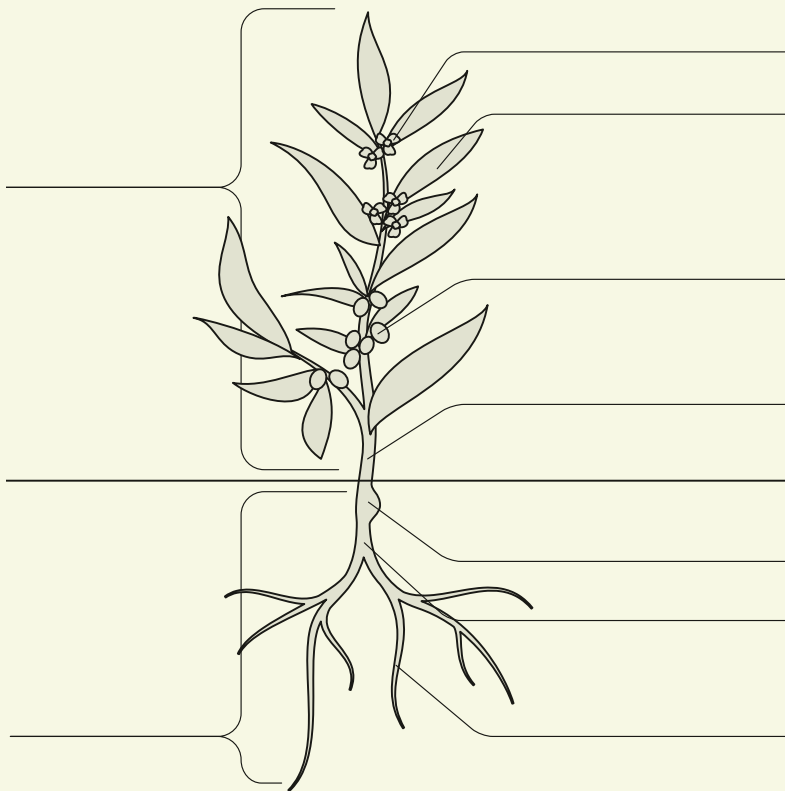
### Mykorrhiza I – Mykorrhiza und Umwelt

(Video 4:33) UFZde <https://youtu.be/CMtq9q6PZD8>



# Arbeitsaufträge

1. Eine Pflanze kann in verschiedene mikrobielle Lebensräume unterteilt werden. Lies den Text und beschrifte die Abbildung. (Kopiervorlage: [www.genomxpress.de](http://www.genomxpress.de))



2. Recherchiere den Begriff „Rhizosphäre“. Was versteht man unter dem Rhizosphärenereffekt?
3. Was bedeutet der Begriff „Rhizodeposition“?
4. Erkläre die Anreicherung des Bodens mit Stickstoffverbindungen durch Rhizobien (Knöllchenbakterien).
5. Recherchiere Nutzpflanzenarten, die mit Rhizobien in Symbiose leben.
6. Recherchiere folgende Fragen: Was sind die Vorteile für die beiden Partner a) bei der Mykorrhizierung und b) bei den Rhizobien? Teilt euch in zwei Gruppen auf. Jede Gruppe bearbeitet dann nur eine Form der Symbiose.

7. Erkläre anhand der Abbildung (links unten), wie durch Mykorrhizapilze die Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanze enorm gesteigert wird.
8. Mykorrhizapilze leben als Symbionten an den Wurzeln vieler Pflanzenarten. Recherchiere, bei welchen Nutzpflanzenarten Mykorrhizierung beobachtet werden kann.
9. Zahlreiche Speisepilze leben in Symbiose oder enger Assoziation mit Bäumen. Kennst Du Pilze, die besonders häufig unter bestimmten Bäumen zu finden sind? Dabei muss es sich nicht immer um Mykorrhizapilze handeln.

10. Selbsttest: Welche Aussagen sind richtig?

- a Der Boden ist vermutlich der am dünnsten besiedelte Raum auf der Erde.
- b Als Phytobiom bezeichnet man die mikrobielle Gemeinschaft, mit der Pflanzen interagieren.
- c Das Wurzelmikrobiom steht meist im Zentrum der Mikrobiomforschung.
- d Pflanzenpathogene sind Krankheitserreger, die Pflanzen mit Nährstoffen versorgen.
- e Mikrohabitate sind bestimmte Zonen einer Pflanze, die von Mikroorganismen besiedelt werden.
- f Die Rhizosphäre ist der Bereich an den Blättern, dessen Eigenschaften direkt von der Pflanze beeinflusst werden.
- g Wurzelexsudate sind Ausscheidungen der Pflanzenwurzeln.
- h Wurzelexsudate können bestimmte Mikroorganismen anlocken oder abschrecken und die Eigenschaften des Bodens verändern.
- i Bei der Rhizodeposition sondert die Pflanze bestimmte Stoffe über die Blätter ab.
- j Rhizobien sind stäbchenförmige Flechtenarten.
- k Rhizobien können Luftstickstoff binden und so umwandeln, dass Pflanzen davon profitieren.
- l Rhizobien werden auch als Knöllchenbakterien bezeichnet, weil sie die Bildung von Knöllchen an den Wurzeln hervorrufen.
- m Als Mykorrhiza bezeichnet man eine Gemeinschaft zwischen Pflanzen und Blaualgen.
- n Mykorrhiza kommt bei den wenigsten Pflanzen vor.
- o Die Pflanzen erhalten von den Mykorrhizapilzen vor allem Kohlenhydrate.
- p Mykorrhizapilze werden von den Pflanzen mit Phosphor, Spurenelementen, Ammonium und Nitrat versorgt.
- q Mykorrhizapilze spielen keine Rolle für die Wasseraufnahme von Pflanzen.
- r Bei der Ektomykorrhiza befinden sich die Pilzhypen außerhalb der Wurzelzellen.
- s Bei der Endomykorrhiza dringen die Hyphen in die Wurzelzellen ein.
- t Arbuskuläre Mykorrhizapilze zählen zur Gruppe der Endomykorrhiza.

