

Rhizobium – Mikrobe des Jahres 2015

Symbiotische Bakterien machen Pflanzen genügsam und Menschen satt

HARALD ENGELHARDT

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOCHEMIE, MARTINSRIED

DOI: 10.1007/s12268-015-0564-0
© Springer-Verlag 2015

■ Rhizobien – „in Wurzeln Lebende“ – sind symbiotische Bakterien der meisten Hülsenfrüchtler (Leguminosen), wie Klee, Lupine, Bohne, Erbse und Linse. Viele Rhizobien regen die Bildung von Wurzelknöllchen an (**Abb. 1**). In ihnen wandeln sie Luftstickstoff (N_2) in Ammonium (NH_4^+) um und beliefern den Stoffwechsel der Pflanze, die nun nicht mehr auf stickstoffreiche Böden angewiesen ist. Die Bakterien lassen sich dafür mit Nährstoffen versorgen und vermehren sich besser [1] – eine Win-win-Situation. Der Gewinn ist aber noch bedeutender, wenn wir den Nutzen sehen, den wir aus den genügsamen Pflanzen für unsere Ernährung ziehen – dank

der Knöllchenbakterien. *Rhizobium* ist Mikrobe des Jahres 2015.

Wie lässt es die Pflanze geschehen, von „freundlichen“ Mikroben besiedelt zu werden? Pflanzen entwickelten ein ausgeprägtes Immunsystem gegen Mikroorganismen, die sich Zugang in ihre Zellen zu verschaffen suchen. Doch den rund 100 Arten von *Rhizobium* und Verwandten gelingt die Gratwanderung zwischen Infektion und Abwehr. Hat etwa der Rotklee Bedarf an einer Symbiose mit *Rhizobium leguminosarum* – und den verspürt er, wenn es dem Boden an Stickstoff mangelt –, dann schüttet er Botenstoffe aus. Sie aktivieren bakterielle Nodulations („Knöllchen“-)Gene. Zudem bildet *Rhizobium* Zuckermoleküle, die an Rezeptoren der Wurzelhaare binden und dem Klee mitteilen, dass geeig-

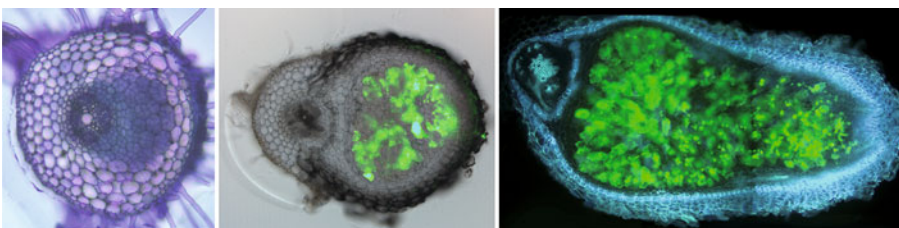
nete Symbionten vor Ort sind. Nach einer Kaskade von Signalen und Reaktionen in beiden Partnern und mithilfe von Enzymen dringt *Rhizobium* in die Spitze eines Wurzelhaares ein. Es krümmt sich, bildet einen Infektionskanal und leitet die sich teilenden Bakterien in ein Knöllchen, das die Leguminose ausschließlich für „ihre“ *Rhizobium*art(en) anlegt (**Abb. 2**, [2]). Die Bakterien werden in die Knöllchenzellen entlassen und von einer Membran umhüllt. Sie ändern ihren Stoffwechsel und ihre Gestalt, um künftig als Bakteroiden N_2 zu fixieren (**Abb. 3**). Zwei Knöllchenarten sind bekannt: länglich wachsende wie bei Rotklee (**Abb. 1**), die nicht mehr oder kaum vermehrungsfähige Bakteroiden enthalten, und kugelige Knöllchen wie bei der Gartenbohne, die teilungsfähige Rhizobien beherbergen [1]. Einige Dutzend bis einige Hundert der Knöllchen können Pflanzen vollständig mit Stickstoff versorgen (**Abb. 4**).

Rhizobium lebt im Boden und braucht selbst Stickstoffsalze, denn das N_2 -bindende Enzym Nitrogenase funktioniert nur in Abwesenheit von Sauerstoff. Erst im Knöllchen stellt *Rhizobium* Nitrogenase her, sofern der O_2 -Gehalt gering ist; und dafür sorgt die Pflanze. Leguminosen füllen die Knöllchen mit Leghämoglobin, einem dem Myoglobin verwandten, stark O_2 -bindenden Molekül, das den O_2 -Transport zu den Bakteroiden kontrolliert [3]. Es ist blutrot gefärbt und verrät besiedelte Bereiche aktiver Wurzelknöllchen (**Abb. 1**). Die N_2 -Fixierung benötigt viel Energie, weshalb die Pflanze die Zahl der Knöllchen reguliert; gealterte verfärben sich grün und werden abgebaut.

Wie konnte ein so komplexes System entstehen? Vor rund 100 Millionen Jahren erwarb eine einzelne Vorgängerin der Leguminosen das Vermögen, sich mit Bakterien einlassen zu können. Dies führte vor etwa 55 Millionen Jahren zur ersten Lebensgemeinschaft mit Rhizobien. Später ging die Fähigkeit manchmal verloren, entstand mehrfach wieder, und in einigen Pflanzen blieb sie ungenutzt [4]. So



◀ **Abb. 1:** Wurzelknöllchen des Rotklee (*Trifolium pratense*). Der von Bakteroiden bewohnte Bereich ist durch Leghämoglobin rötlich gefärbt (Fotos: Harald Engelhardt, Martinsried).

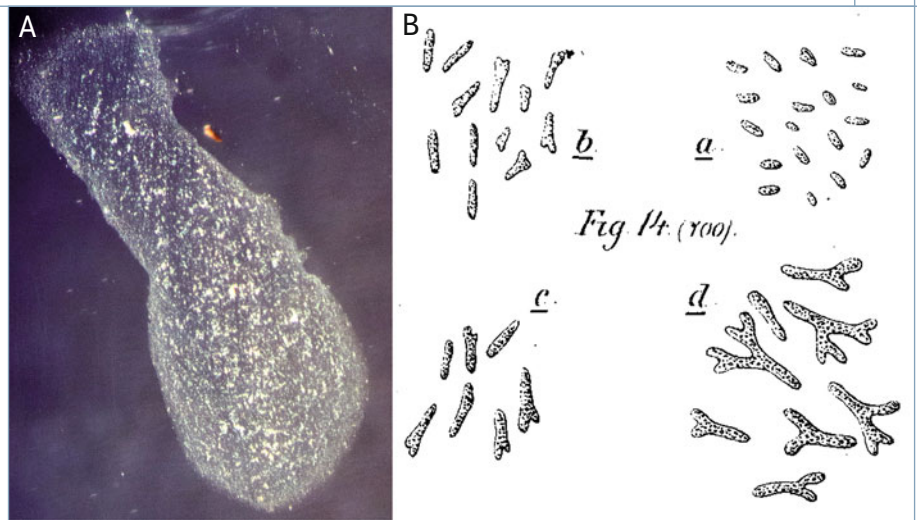


▲ **Abb. 2:** Entstehende Knöllchen in der Wurzel des Schneckenklee (*Medicago truncatula*). Querschnitte nach zwei (links), 14 (Mitte) und 28 Tagen (rechts) ab Infektion mit *Sinorhizobium meliloti* (grün). Ausgewachsenes Knöllchen: 3 mm (Fotos: Ulrike Mathesius, Canberra).

entstanden Varianten des Infektionsablaufs und Rhizobien mit unterschiedlicher Genausstattung. Sie verteilt sich bei *Rhizobium* auf mehrere kleine Chromosomen, die den natürlichen Genaustausch und die Evolution beförderten. Die Symbiose ist eine Erfolgsgeschichte. Leguminosen gehören mit etwa 18.000 Arten zu den größten Familien der Blütenpflanzen.

Auch die Entdeckung der Symbiose ist spannend. Wurzelknöllchen fanden Botaniker bereits im 16. Jahrhundert, doch erst der Mediziner Malpighi sah in der Entstehung der „Gallen“ eine fremde Ursache [5]. Dass Bakterien die Knöllchen besiedeln, erkannte der russische Botaniker Woronin 1866 und prägte den Namen Knöllchenbakterien [6]. Bereits vorher war vermutet worden, dass Leguminosen Luftstickstoff nutzen können, Getreide dagegen nicht. Die Ursache klärten 20 Jahre später die Agrarforscher Hermann Hellriegel und Hermann Wilfarth auf; sie fanden das Zusammenspiel von Pflanzenwachstum, N_2 -Fixierung, Knöllchenbildung und Bakterieneinfluss (Abb. 4, [7]). Der Mikrobiologe Martinus Beyerinck beschrieb im gleichen Jahr ausführlich Bakteroiden (Abb. 3) und isolierte die Knöllchenbakterien [8]. Ein weiterer Forscher, Bernhard Frank, verlieh ihnen 1889 ihren Namen: *Rhizobium leguminosarum* [9]. Allerdings bezweifelten beide Wissenschaftler, dass der Mikroorganismus N_2 fixiert. Wie so oft, wandelte ein Dritter Kenntnis in Nutzen. Der junge Bakteriologe Lorenz Hiltner untersuchte die Wirtsspezifität von Rhizobien und sah die Bedeutung der Beimpfung von Leguminosensaaten. 1896 erhielt er für das Verfahren und die Impfkultur „Nitragin“ ein Patent [10]. Unter diesem Namen kann man N_2 -Fixierer noch heute kaufen.

Menschen profitierten schon von *Rhizobium*, als sie noch Früchte sammelten, besonders aber, seitdem sie Ackerbau betreiben. Die Mehrfelderwirtschaft mit Brachen, auf denen genügsame Leguminosen wuchsen, bewahrte die Ertragsfähigkeit der Böden bereits im Römischen Imperium. Bis heute fördern ausgesuchte Fruchtfolgen und Anbau von Rotklee, Lupine und Ackerbohne zur Gründung die Bodenqualität im ökologischen Landbau und in Entwicklungsländern. Jährlich binden landlebende Bakterien ungefähr 170 Millionen Tonnen N_2 und führen sie dem Boden und der Vegetation zu; fast ein Viertel entfällt auf Agrarflächen [11]. Seit 100 Jahren ergänzt das industrielle Haber-Bosch-Verfahren die natürliche N_2 -Fixierung und



▲ **Abb. 3:** Bakteroiden aus Leguminosen **A**, Bakteroiden-Tasche eines Klee-Knöllchens (Foto: Harald Engelhardt, Martinsried). **B**, Bakteroiden der Futterwicke (*Vicia sativa*), wie sie Martinus Beyerinck 1888 sah und zeichnete (aus [8], Ausschnitt von Tafel XI).

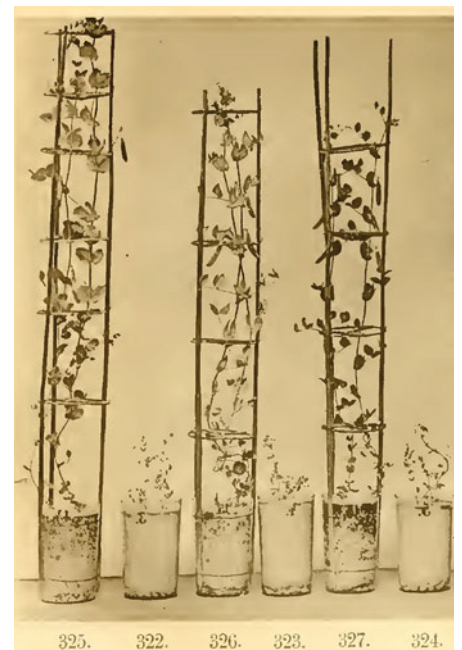
konkurriert mit ihr. Denn Leguminosen nehmen lieber Stickstoffsalze auf, ehe sie sich *Rhizobium* zuwenden. Künstliche Düngung ist unverzichtbar, doch Nitrat belastet die Gewässer. Zum nachhaltigen Umgang mit Dünger zählen nach wie vor natürliche Verfahren, deren Möglichkeiten noch nicht ausgereizt sind. So steigert die Anreicherung des Bodens mit Rhizobien und anderen Bakterien der Rhizosphäre den Ertrag von Leguminosen; man sucht nach leistungsfähigeren Rhizobienstämmen; und die Hoffnung, auch Getreide direkt durch Bakterien mit atmosphärischem Stickstoff versorgen zu können, hält die Forschung in Gang.

Leguminosen haben seit jeher einen unmittelbaren und mittelbaren Anteil an der Ernährung der Menschen – und *Rhizobium* trägt immer noch dazu bei, uns satt werden zu lassen.

Lesen Sie mehr zu *Rhizobium* im Artikel von Anke Becker auf S. 151 und unter www.mikrobe-des-jahres.de. ■

Literatur

- [1] Denison RF (2000) Legume sanctions and the evolution of symbiotic cooperation by rhizobia. *Am Natural* 156:567–576
- [2] Untergasser A, Bisseling T, Geurts R (2009) Making *Rhizobium*-infected root nodules. *Microbiol Monogr* 8:45–69
- [3] Kundu S, Trent JT, Hargrove MS (2003) Plants, humans and hemoglobins. *Trends Plant Sci* 8:387–393
- [4] Werner GDA, Cornwell WK, Sprent J et al. (2014) A single evolutionary innovation drives the deep evolution of symbiotic N_2 -fixation in angiosperms. *Nat Commun* 5:4087–4095
- [5] Malpighi M (1679) *Anatomes Plantarum Pars Altera*. *Phil Trans Roy Soc, London*
- [6] Benson DR (1985) Consumption of atmospheric nitrogen. In: Leadbetter ER, Poindexter JS (Hrsg) *Bacteria in Nature*, Vol. 1. Plenum Press, New York, S 155–198
- [7] Hellriegel H, Wilfarth H (1888) Untersuchungen über die Stickstoffnahrung der Gramineen und Leguminosen. *Zeitschr Ver Rübenzuckerindustrie D R 38* (Beilagenheft): 1–234
- [8] Beijerinck MW (1888) Die Bacterien der Papilionaceen-Knöllchen. *Bot Zeitg* 46:725–735, 741–750, 757–771, 797–804
- [9] Frank B (1889) Ueber die Pilzsymbiose der Leguminosen. *Berichte Deut Bot Ges* 7:332–346



▲ **Abb. 4:** Wachstum von Erbsen (*Pisum sativum*) in sterilem Sand ohne Stickstoffquelle und ohne (322, 323, 324) oder mit (325, 326, 327) Zugabe einer Bakteriensuspension aus natürlichen Böden. Originalfoto von 1888 (aus [7], Ausschnitt von Tafel III).

[10] Hartmann A (2005) Lorenz Hiltner, Pionier der Bodenbakteriologie und Rhizosphärenforschung. *BIOspektrum* 2:191–192

[11] Voroney P, Derry D (2008) Origin and distribution of nitrogen in soil. In: Schepers JS, Raun WR (Hrsg) *Nitrogen in Agricultural Systems*. *Am Soc Agronomy, Madison*, S 1–30

Korrespondenzadresse:



Dr. Harald Engelhardt
Max-Planck-Institut für
Biochemie
Am Klopferspitz 18
D-82152 Martinsried
Tel.: 089-85782650
Fax: 089-8578-2641
engelhar@biochem.mpg.de