

Streifzüge durch Mikrobiome

Aus Florianne Koechlin's Buch *verwoben & verflochten*

Mikrobiome: das sind die Gemeinschaften winzig kleiner, von Auge nicht sichtbarer Lebewesen wie Bakterien oder Pilze. In ihrem neuen Buch *verwoben & verflochten* vermittelt Florianne Koechlin neuste wissenschaftliche Erkenntnisse über die Mikrowelt auf Erden. Sie tut das durch Besuche und Interviews bei und mit Forschenden. Aus zwei Kapiteln dieses Buches werden hier Berichte wiedergegeben, die für *Kultur und Politik* gekürzt und leicht bearbeitet wurden.

Lynn Margulis war eine Pionierin der modernen Biologie (1938–2011). Margulis war ihrer Zeit weit voraus. Sie wurde verspottet, harsch kritisiert oder schlicht nicht wahrgenommen. Erst im letzten Jahrzehnt ihres Lebens erhielt sie grosse Anerkennung und viele Preise.

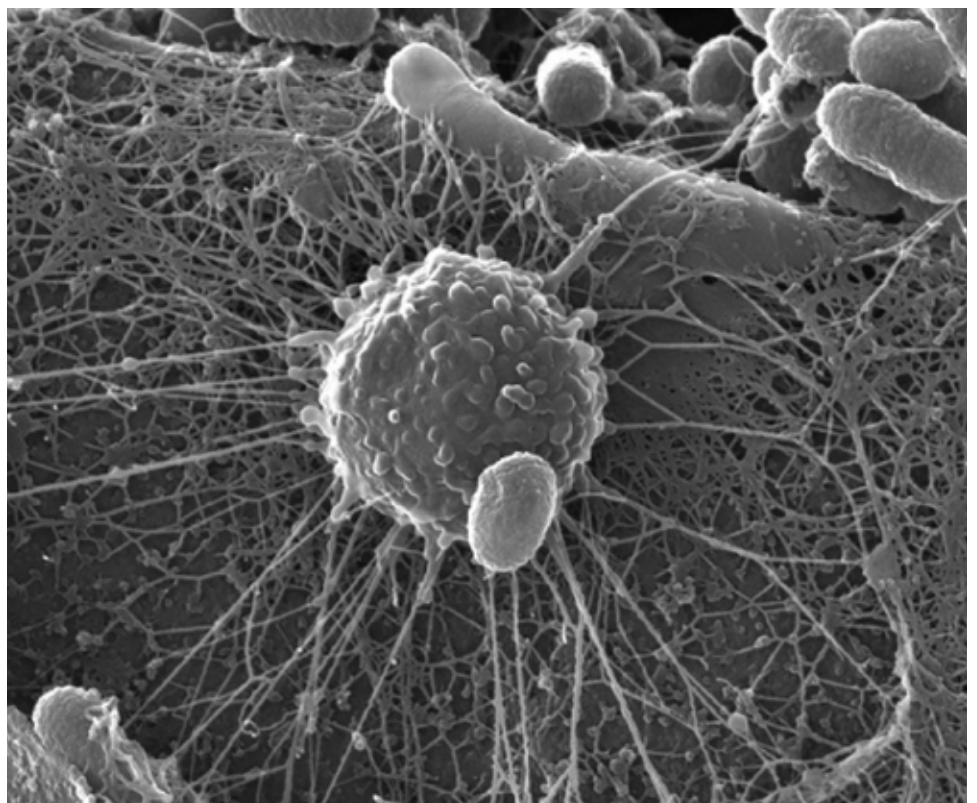
Wer war diese Frau? Für mein neues Buch sprach ich mit der Forscherin **Margaret McFall-Ngai am California Institute of Technology (CAL-Tech)**, die als junge Frau mit Lynn Margulis in Kontakt war.

«Mikroben», sagt Margaret McFall-Ngai, «waren ein paar Milliarden Jahre auf der Erde, bevor irgendein anderes Lebewesen auftauchte. Sie haben fast alles erfunden, was das Leben ausmacht – Stoffwechselvorgänge, die Zellatmung oder die Zellkommunikation und vieles mehr. Ohne die Mikrowelt gäbe es uns nicht. Sie stehen am Anfang von allem. So einfach ist das.» Gemäss Lynn Margulis sei jede Pflanze, jeder Pilz, jedes Tier und auch wir selber ein Set von verschiedenen Ökosystemen, die miteinander kommunizieren und interagieren, die zusammen gedeihen und zusammen gross werden. Wir alle sind wandelnde Gemeinschaften von Bakterien. Die Verbindung von uns zu diesen Mikroben ist so tief, so zentral, dass man es auch umgekehrt sehen kann: **Wir sind Ökosysteme, in denen die Mikrobengemeinschaften leben können.** Wir beeinflussen die Mikrowelt in und auf uns, so wie sie uns beeinflussen. Es ist ein Zusammenspiel, ein intimes Ineinander-verwoben-Sein. Dafür gebrauchte Lynn Margulis den Begriff **Holobiont**.¹

«Die zweite grosse These von Lynn Margulis war», so Margaret McFall-Ngai, «dass Symbiosen und Kooperationen zu fast allen grossen Evolutionssprüngen geführt haben.» Das wurde mir im Studium anders gelehrt. Wir kannten Symbiosen, klar, wie etwa Flechten, eine Symbiose zwischen Algen und Pilzen. Doch für die Evolution der Lebewesen galten Symbiosen als absolut nebensächlich. Der wahre Treiber für die Evolution neuer Arten sei die Konkurrenz.

Lynn Margulis drehte den Spiess um: Ihre These war, dass am Anfang aller grossen Lebensformen Symbiosen von Bakterien und anderen Mikroben gestanden hätten. Sie war überzeugt, dass die Zellen von Pflanzen und Tieren durch eine ganz bestimmte Abfolge von Verschmelzungen unterschiedlicher Bakterienarten entstanden seien. Grössere Zellen hätten sich kleinere Bakterien einverleibt und seien mit ihnen verschmolzen. Solche **Lebensgemeinschaften hätten sich durchgesetzt** und vermehrt sich. Beispiel hierfür sind die ersten Pflanzen, die vor etwa

450 Millionen Jahren vom Meer aufs Land kamen. Das war nur dank einer engen Symbiose zwischen Grünalgen und Pilzen möglich. Pilze bildeten an Land lange Zeit die «Wurzeln» des Holobionten Pflanze, mit denen sie sich an Felsen festhalten konnte. Irgendwann im Laufe der Evolution bildeten Pflanzen selber Wurzeln aus, doch die enge Partnerschaft mit Pilzen – die wir Mykorrhiza-Beziehungen nennen – ermöglicht immer noch über neunzig Prozent aller Pflanzen ein Überleben. Lynn Margulis schrieb 1998 in ihrem Buch *Der symbiotische Planet oder wie die Evolution wirklich verlief* (Westend Verlag, S. 72 und 73): «Der Baum des Lebens ist ein verwickeltes, verwobenes, pulsierendes Gebilde mit Wurzeln und Ästen, die sich unter der Erde und in der Luft treffen, um sonderbare neue Früchte und Kreuzungen hervorzu bringen. Diese netzbildenden Zweige [also **Querverbindungen** zwischen dem, was man sich als «Äste der Evolution» vorstellt] sind zwar nicht so häufig wie die Verzweigungen, aber von ebensolcher Bedeutung.»



Sieht Nervenzellen ähnlich: Mikrobennetz auf Biotit nahe Baumwurzel. Bild von Pacific Northwest National Laboratory und Dohnalkova et al. (2022): «Effects of microbial-mineral interactions on organic carbon stabilization in a ponderosa pine root zone.»

Das dritte grosse Vermächtnis von Lynn Margulis ist die **Gaia-Hypothese**, die sie etwa 1970 zusammen mit **James Lovelock** entwickelte. Gaia hiess die ursprüngliche Muttergöttin in der griechischen Mythologie. Ich selber war eher skeptisch gegenüber der Idee, dass da eine Grosse Mutter Erde irgendwie wie ein gottähnliches Wesen über allem schweben sollte – doch Lynn Margulis sah das anders: Für sie bedeutete Gaia eine Vielzahl von sich selbst regulierenden, interaktiven und **verbundenen Ökosystemen**. Lebewesen sind aber nicht nur untereinander vernetzt, sie sind auch abhängig von unbelebten Elementen wie Luft, Wasser, Sedimenten und dem Sonnenlicht. Sie reagieren mit diesen und verändern ihre Umwelt so, dass lebensfreundliche Bedingungen entstehen. So lebt und atmet die Erde seit vier Milliarden Jahren. Margaret McFall-Ngai ergänzt: «Man kann es auch so sagen: Die Erde selbst ist eine Menge von Rückkopplungssystemen mit Feedback-Schlaufen. Lebewesen und Systeme hängen von Veränderungen ab, die andere ausgelöst haben und auslösen. Das sehen wir jetzt natürlich mit dem Klimawandel in großem Stil.»

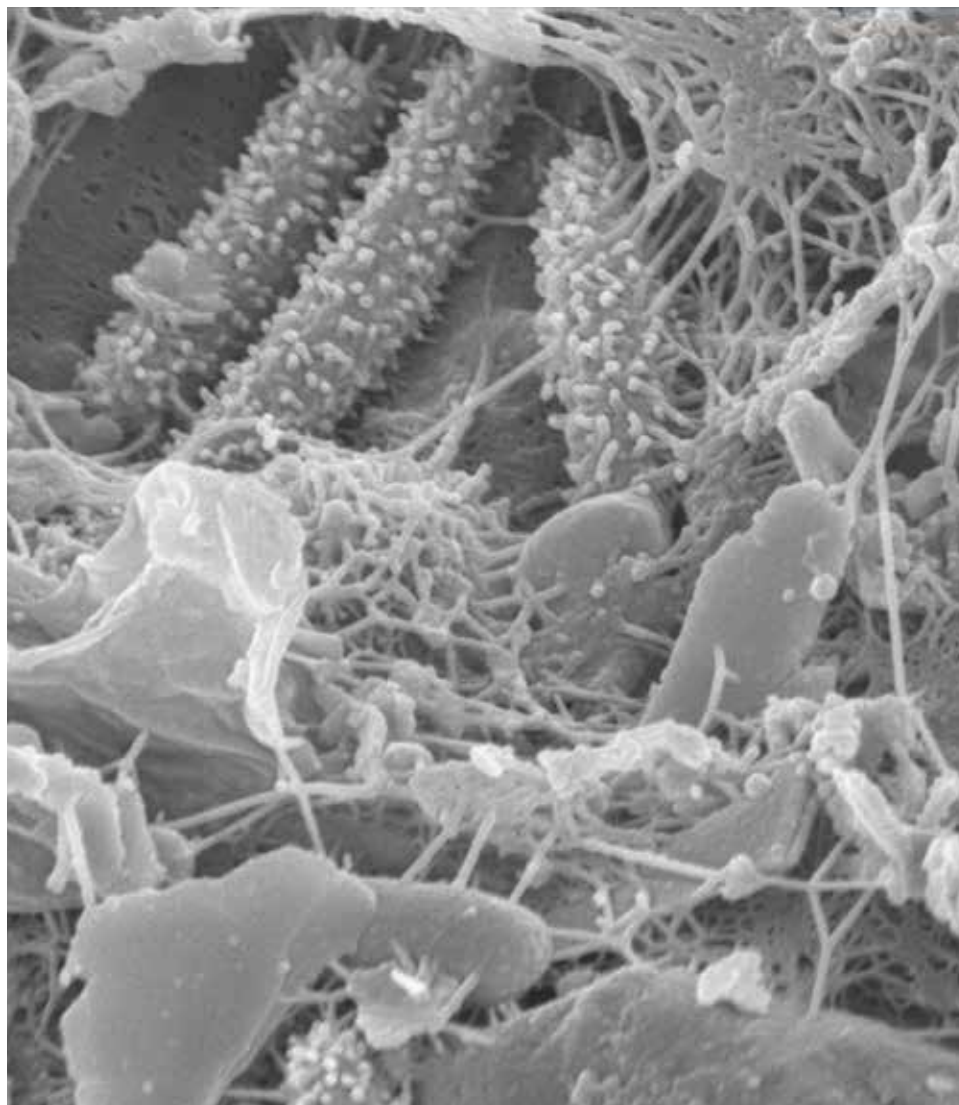
Ein Grossteil von Lynn Margulis' Thesen konnte ab 2006 verifiziert werden, als es dank technischer Durchbrüche möglich wurde, das Erbgut tausender Mikroben schnell und billig zu entschlüsseln. **Die Mikrobiomforschung hat seither einen enormen Aufschwung erlebt.**²

Margaret McFall-Ngai sagt: «Und nichts ist mehr so wie früher. Ja, das war die größte Veränderung unserer Sicht auf das Leben seit Darwin.»

Berg und die Rhizosphäre

Gabriele Berg ist eine der weltweit führenden Mikrobiom-Forscherinnen. Sie sagt: Mikroben besiedeln nicht nur unsern Darmtrakt, sondern «sie verbinden alles Leben. Sie verbinden den Boden mit den Pflanzen, mit den Tieren und mit uns selber». Für mein Buch *verwoben & verflochten* besuchte ich die Professorin am Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie in Potsdam nahe Berlin.

Das mit Abstand grösste und auch vielfältigste Mikrobiom befindet sich im **Boden**. Ein Löffel voll Erde zum Beispiel kann Milliarden Bakterien und diesen gleichsehenden Archaeen von 10'000 verschiedenen Arten enthalten, sowie viele andere Kleinstlebewesen.



Mikrobiom eines Sandkorns. Foto: Anthony D'Onofrio et al., Lewis Lab, Northeastern University (2010)

Würden alle Pilzfäden in diesem Löffel Erde aneinandergereiht, ergäbe das eine Strecke von mehreren hundert Kilometern – für uns sind das unvorstellbare Dimensionen.

Aus diesem riesigen Reservoir an Mikroben **suchen sich die Pflanzen ihr eigenes Mikrobiom heraus**; sie kultivieren es im Wurzelbereich, in den Früchten und in den Samen. Und wir, die wir Pflanzen essen, entnehmen daraus wieder Mikrobengruppen, die unsern Verdauungstrakt besiedeln und für unser Wohlergehen essentiell sind. «Die Mikrobengemeinschaften sind für alle Organismen, für Pflanzen, Tiere aber auch für Ökosysteme überlebenswichtig», so Gabriele Berg.

Alle Pflanzen kreieren im Wurzelstock eine nährstoffreiche Oase. Durch die Wurzeln schwitzen sie eine Vielzahl von Nährstoffen aus: Zuckerverbindungen, Aminosäuren und andere organische Säuren, Enzyme, verschiedene Signalstoffe. Damit füttern sie Abermillionen verschiedenartigster Lebewesen der

grossen Mikrobiom-Community im Wurzelbereich. Es gibt Pflanzen, die bis zu siebzig Prozent aller von ihnen durch die Photosynthese erzeugten Zuckerverbindungen an die Mikroben und andere Lebewesen im Boden abgeben. Weizen und Gerste investieren zwanzig bis dreissig Prozent davon in das unterirdische Netzwerk. Man kann also sagen, dass Pflanzen diese unterirdische Mikrobiom-Community regelrecht füttern und so für sie viele kleine Paradiese schaffen.

Im Austausch helfen Mikroben den Pflanzen, Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphat, Eisen und Spurenelemente sowie Wasser aus dem Boden zu gewinnen. Sie machen Pflanzen resistenter gegen Krankheiten, Hitze, Überflutung und Dürre, sie fördern das Wachstum und helfen bei der Keimung. Sie neutralisieren giftige Substanzen im Boden und stimulieren das pflanzliche Immunsystem. Pflanzen und ihre Mikroben sind intime Partnerinnen in jedem Lebensprozess, und das seit vielen Millionen Jahren.

«Dieses pflanzliche Mikrobiom ist keineswegs zufällig», sagt Gabriele Berg. «Die Pflanze kultiviert aktiv ein bestimmtes Set von Mikroben in ihrem Wurzelbereich. Sie nimmt nicht alle an, sondern nur eine bestimmte Diversität.» Gabriele Berg spricht von «**Filter**». Und vom **Wurzelbereich** lässt die Pflanze nur wenige in ihr **Gewebe** hinein. Da existiert ebenfalls ein Filter. Ein spezieller Filter besteht auch zwischen Gewebe und **Samen**. Aber darüber ist noch wenig bekannt.

Der Mikroben-Schatz im Innern

Wie aber wählt eine Pflanze ihr Mikrobiom aus, wie kann sie nützliche Mikroben herbeiziehen und andere, schädliche ausschliessen?

«Durch Kommunikation», betont die Professorin. «**Pflanzen kommunizieren immer und überall und mit ganz unterschiedlichen Lebewesen, auch mit den Mikroorganismen.**» Über der Erde würden sie mit Duftstoffen kommunizieren, unter der Erde mit in Wasser gelösten Signalmolekülen, die ihre Wurzeln ausscheiden. Auch die Mikroben kommunizieren aktiv mit den Pflanzen und mit ihresgleichen. Auch sie gestalten ihre eigenen Lebensräume. Und auch sie benutzen zur Kommunikation im Bodenwasser gelöste Signalmoleküle. «Erstaunlich ist», so die Forscherin, «dass **etwa ein Drittel aller Gene einer Mikrobe für die Kommunikation verantwortlich ist.** Ein Drittel! Kommunikation, Kooperationen



Die Pflanze-Boden-Einheit des Klees.

Foto: Imperial College, London, 2022

aufbauen, vernetzen ist auch für diese winzigen, von Auge nicht sichtbaren Einzeller das Fundament ihrer Existenz.»

Gabriele Berg und ihre Gruppe konnten auch nachweisen, dass Pflanzen ihr Mikrobiom über die Samen von einer Generation zur nächsten vererben. Bisher dachte man, Samen von Pflanzen seien steril, sie enthielten keine Mikroben. Was nicht stimmt. Alle Pflanzensamen enthalten eine grosse **Mikroben-Community, im Innern des Samens** und auch auf der Samenumhüllung. Man geht davon aus, dass ungefähr die Hälfte aller Mikroben über die Samen weitergegeben werden. Das nennt man vertikale Übertragung. Die andere Hälfte holen sich Pflanzen aus dem Boden im Wurzelbereich. Das ist die horizontale Übertragung. Und auch bei der Vererbung über die Samen ist nichts zufällig. Die Pflanze wählt aus, welche Bakterien und andere Mikroben sie an die nächste Generation weitergibt. Und wenn dann der Samen keimt, gehen bestimmte Mikroben in den Wurzelbereich, andere in den Stängel, in die Blätter, in die Früchte, überall hin. Das Mikrobiom von Pflanzen ist über Generationen hinweg relativ stabil.

Im Menschen

«Bei Menschen ist das nicht viel anders», sagt die Forscherin, «Auch ein Baby erbt einen Grossteil seines Darmmikrobioms von der Mutter.» Die Mutter gebe Teile ihres Mikrobioms während des Geburtsvorgangs und durch die Muttermilch an das Baby ab. Das sei extrem wichtig, man schätze, dass etwa fünfzig Prozent des Baby-Mikrobioms von der Mutter stammt, vergleichbar mit den Pflanzen. Darum seien natürliche Geburten und langes Stillen wichtig. Den Rest beziehe es aus der Nahrung und aus der Umgebung. Bis zu vierzehn Prozent aller Mikroben unserer Darmflora stammen direkt von Pflanzen; also von den Früchten oder vom Gemüse, das wir essen.

Und sie fährt fort: «Traurigerweise haben wir schon **sehr viel Mikroben in aus unserem Verdauungstrakt verloren.** Wir gehen davon aus, dass in der industrialisierten Welt bereits ein Drittel bis zur Hälfte der Vielfalt aller Mikroben im Darm verloren gegangen ist. Das kann dann längerfristig neue Krankheiten und moderne Plagen verursachen. Bei psychischen Erkrankungen oder Erkrankungen des Immunsystems und Allergien, auch bei Stoffwechselerkrankungen und sogar bei Krebs deuten



Florianne Koechlin (2024): *verwoben & verflochten. Was Mikroben, Tiere und Pflanzen eint und wie sie uns ernähren.* Lenos Verlag (lenos.ch)³

neueren Untersuchungen darauf hin, dass das Darmmikrobiom eine wichtige Rolle spielt.» Ein weiteres Problem sei, dass Bakterien durch übermässigen Einsatz von Antibiotika resistent wurden und nun überall im Boden, in den Pflanzen, Tieren, uns selber sind.

In der Landwirtschaft

Und wie steht es um die Vererbung von Mikrobiomen bei modernen **Kulturpflanzen?** Das untersuchte Gabriele Berg und ihr Team bei Samen von Äpfeln, Kürbissen oder Salaten. «Wir haben eigentlich immer das gleiche gefunden: Mit der Zucht in Richtung Grösse und mehr Ertrag sind die Pflanzenmikrobiome viel *einheitlicher geworden*, und ihre Samen enthalten eine viel geringere Anzahl nützlicher Mikroben. Sie sind **verarmt.**»

Nicht nur die Züchtung, auch die Art der Kultivierung spielt eine grosse Rolle. Mehrere Studien belegen inzwischen, dass Pflanzen, die in der Intensivlandwirtschaft mit synthetischem Dünger und Pestiziden behandelt werden, in ihrem Wurzelraum sehr viel weniger nützliche Mikroben kultivieren, viel weniger verschiedene Arten und auch viel kleinere Mengen – dafür dringen umso mehr Schädlinge und Krankheitserreger in den Wurzelraum ein und übernehmen den Platz



Wo das Bakterium *Sphingomonas meloni* mit den Samenkörnern von Reis vererbt wird, kann der weltweit im Reisanbau auftretende Erreger *Burkholderia plantarii* keinen Schaden mehr anrichten. Info aus Matsumoto et al. (2021): «Bacterial seed endophyte shapes disease resistance in rice.»

Foto: Quang Nguyen Vinh (Pixabay/pflanzenforschung.de).

der Fehlenden. Viele Krankheitserreger von Pflanzen sind schnellwachsende Generalisten und verbreiten sich rapide. Sie werden dann wieder mit Pestiziden bekämpft, wodurch die Boden- und Pflanzenmikrobiome noch mehr geschädigt werden, worauf noch mehr Krankheitserreger eindringen, was noch mehr Pestizide benötigt – es ist eine Endlosschleife nach unten. Der Einsatz von synthetischem Dünger fördert ebenfalls die Verbreitung von Krankheitserregern, auf Kosten von nützlichen Mikroben.

Ich wollte von Gabriele Berg zum Schluss noch wissen, was denn unsere **Zukunfts-perspektiven** sein können. Was ist zu tun? Ihre Antwort ist klar: «Viele Böden in der Landwirtschaft und auch im Wald sind schon extrem verarmt, da müssen wir unbedingt wieder mikrobielle Biodiversität hineinbringen. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Vielfalt im Boden zu fördern: Wir können Kompost oder andere organische Materialien, ganze Mikrobiome oder einzelne Mikroorganismen-

Kulturen zusetzen. Auch Mischkulturen jeglicher Art bereichern die Vielfalt im Boden. Wenn unterschiedliche Pflanzen zusammen wachsen, erhöht sich automatisch die Vielfalt unter dem Boden. Meine Vision ist also: Vielfalt auf allen Ebenen, im Boden, auf dem Feld, überall. Je vielfältiger, desto stabiler und gesünder ist ein Ökosystem, sei es im Boden, in den Pflanzen, in den Früchten oder in unserm Darm. Das ist das Allerwichtigste.» ●

¹ Der sich erst in den letzten Jahren auch im deutschsprachigen Raum etwas verbreitende Begriff Holobiont für Organismen mitsamt den sie bewohnenden Mikroben wurde im Jahr 1943 geprägt vom deutschen Naturphilosophen Adolf Meyer-Abich, der einer der frühen Theoretiker des biologischen Holismus war. Die britische Mikrobiologin Lynn Margulis verwendete diesen Begriff seit 1991. (red)

² Der Begriff Mikrobiom (microbiome) ist ein Nachfolger dessen, was man davor meist «Mikroflora», zum Beispiel «Darmflora», genannt hat. Das Wort wurde 1952 von John Mohr geprägt und es wird seit 1988 für die mikrobielle Lebensgemeinschaft zunächst vor allem bei Wurzeln (in der Rhizosphäre) verwendet. Heute meint «Mikrobiom» generell die Gemeinschaft der Mikrobiota (Kleinstlebewesen) mit dem von ihnen mitgeprägten Lebensraum (Habitat). (red)

³ Die Illustrationen zu diesem Artikel wurden von der Redaktion ausgewählt, das Buch von Florianne Koechlin hat 87 andere.