

Mykosphäre

Pilze als Beweger und Gestalter im Untergrund

LUKAS Y. WICK

HELMHOLTZ ZENTRUM FÜR UMWELTFORSCHUNG – UFZ, DEPARTMENT UMWELT-MIKROBIOLOGIE, LEIPZIG

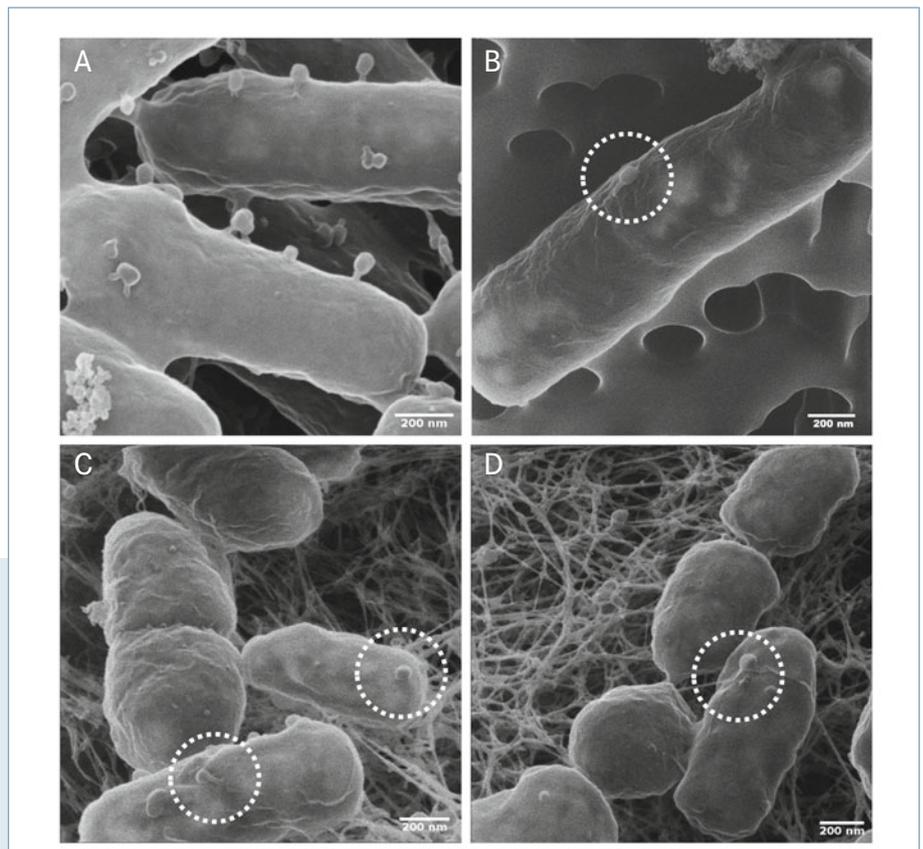
Mycelial networks allow fungi to spread efficiently and traverse air-filled pores. By transporting nutrients from nutrient-rich and to nutrient-poor areas, they also promote bacterial growth and cometabolic degradation of contaminants. Mycelia likewise connect microhabitats and act as dispersal vectors (fungal highways) for aerobic and anaerobic bacteria. Co-transport with hyphal-riding bacteria allows phages to move in water-poor habitats and enhances the fitness of invading bacteria in host precolonised zones.

DOI: 10.1007/s12268-023-2041-5
© Der Autor 2023

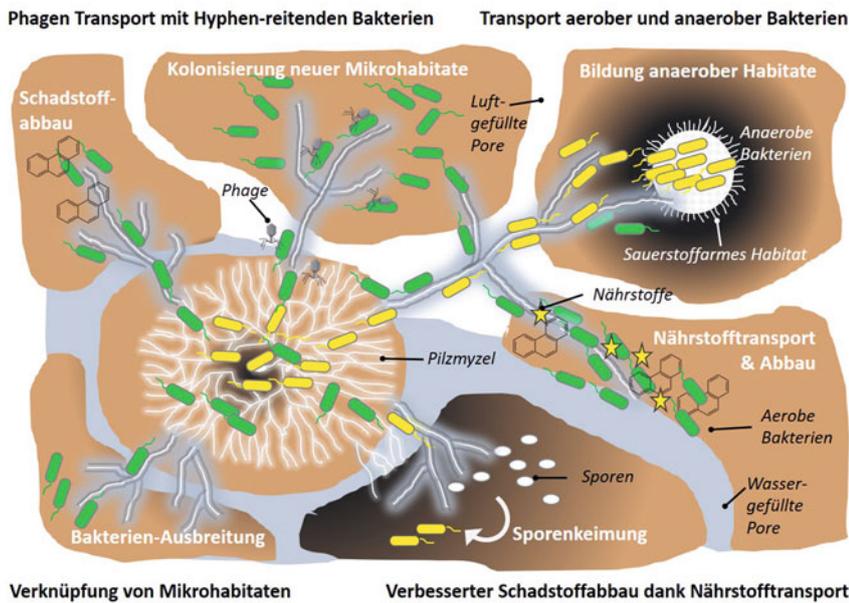
■ Die jährliche Wertschöpfung von Pilzen wird auf etwa 55 Billionen US-Dollar geschätzt [1]. 95 Prozent der ökonomischen Dienstleistungen finden jedoch nicht bei der Erzeugung von Nahrungsmitteln oder Pharmazeutika, sondern versteckt im Untergrund statt: Pilze sind wichtige Treiber biogeochemischer Prozesse und in Lebensgemeinschaft mit Wurzeln essenziell für das Wachstum von Bäumen und deren Speicherung von CO₂. Ein alleiniger Blick auf biogeochemische Eigenschaften vernachlässigt jedoch die außergewöhnliche physikalische Struktur von Pilzhyphen und ihren engmaschigen, sich dynamisch ihren Umweltbedingungen anpassenden Netzwerken (Myzelien). So werden Myzelien beispielsweise zur Nachstellung menschlicher Transportinfrastrukturen oder als pilzbasierte „Computer“ zur Vorhersage kürzester Transportwege verwendet.

Im natürlichen Untergrund kann ein Myzel sich über mehrere Quadratkilometer ausdehnen und dabei dennoch auf der

Mikrometerskala gestaltend wirken. Mit bis zu mehreren Hundert Metern Länge pro Gramm Boden sind Myzelien dabei bestens an heterogene Umgebungen angepasst und können selbst durch luftgefüllte Bereiche hindurchwachsen. Dabei verbinden sie mikrobielle Lebensräume (Mikrohabitate) und bilden so ein logistisches Netz von Transportwegen, auf denen Bakterien sich ähnlich unterirdischer Autobahnen (*fungal highways* [2]) fortbewegen und neue Gebiete kolonisieren können. *Fungal highway*-Effekte wurden schon in der Umwelt- und Lebensmittelmikrobiologie, etwa beim Schadstoffabbau, der Bereitstellung von N und P im Wurzelbereich oder der Käseherstellung [3–5] beschrieben. Mit der ihnen inhärenten zytoplasmatischen Strömung können Myzelien auch Wasser, Nährstoffe und Chemikalien zwischen Mikrohabitaten transportieren und mikrobielle Aktivität begünstigen [6]. Myzelien beeinflus-



► **Abb. 1:** Visualisierung der Adsorption von Phagen an *Escherichia coli* mittels Helium-Ionen-Mikroskopie. **A**, *Escherichia*-Virus-T4-Phagen (T4) infizieren ihre Wirte mit den Enden ihrer Schwanzfasern. **B–D**, Zur Nutzung einer „Mitfahrgelegenheit“ lagern sich T4-Phagen mit dem Kopf an Hyphen-reitende Nicht-Wirtsbakterien (*Pseudomonas putida* KT 2440) an und bleiben dabei infektiös. Foto: UFZ/ISME Journal/CC BY 4.0.



▲ **Abb. 2:** Pilzmyzelien passen sich gut an ihre heterogenen Habitate an und sind, wie in der Abbildung skizziert, Treiber vieler Prozesse im Untergrund. Sie ermöglichen den Transport aerober und anaerober Bakterien und verknüpfen unterschiedliche mikrobielle Lebensräume. Hyphen-reitende Bakterien können auch Phagen mobilisieren. Dies erlaubt ihnen, neue Habitate zu kolonisieren und sich in ihnen auszubreiten. Myzelien transportieren zudem Nährstoffe und verbessern so das Wachstum und den Schadstoffabbau von Bakterien. Abbildung verändert nach [10]: UFZ / mBio/CC BY 4.0 DEED.

sen und gestalten aber auch ihre unmittelbare Umgebung, die Mykosphäre. Dabei ermöglichen sie die Solubilisierung von Nährstoffen oder den enzymatischen Abbau von polymeren Verbindungen oder Schadstoffen.

Pilze gehen dabei komplexe Wechselwirkungen mit anderen Mikroorganismen ein und werden daher auch als Metaorganismen bezeichnet. In unserer Forschung versuchen wir, die biophysikalischen und biogeochemischen Grundlagen mikrobieller Interaktionen in der Mykosphäre zu verstehen und für bio- und umwelttechnologische Anwendungen, wie den Schadstoffabbau, nutzbar zu machen. Drei Beispiele aus unserer Erforschung der Mykosphäre erläutern wir hier.

Pilze ernähren Bakterien beim Schadstoffabbau

Die Biotransformation von Schadstoffen wird häufig durch einen Mangel bzw. eine ungleiche Verteilung von Nährstoffen im Boden behindert. Eine ausreichende Versorgung ist dabei besonders für Schadstoffe relevant, die ko-metabolisch abgebaut werden oder aufgrund niedriger Konzentrationen nur unwesentlich zum Wachstum bakterieller Abbaubereitungen beitragen. Können Myzelien also Nährstoffe transportieren und diese Bakterien für einen verbesserten Schadstoffabbau in der Mykosphäre zur Verfügung stellen?

Um diese Frage zu beantworten, testeten wir, ob pilzlicher Nährstofftransfer den bakteriellen Abbau eines Organochlor-Pestizids (Lindan) in einem nährstoffarmen Lebensraum befördert [7]. Dazu isolierten wir aus einem Pestizid-verschmutzten Boden einen Pilz (*Fusarium equiseti* K3), der Lindan nicht verwertet und ein mit ihm assoziiertes Bakterium (*Sphingobium* sp. S8), das ko-metabolisch Lindan abbaut. Den Pilz ließen wir auf einem mit ^{13}C angereicherten Substrat wachsen und analysierten mittels Protein-SIP-Techniken (SIP = *stable isotope probing*) den aus Pilzmetaboliten stammenden ^{13}C -Einbau in räumlich entfernte Bakterien. In Gegenwart des Pilzes fanden wir nicht nur erhöhtes Bakterienwachstum und einen deutlichen ^{13}C -Einbau in die bakterielle Schlüsselenzyme des Lindan-Abbaus, sondern auch einen doppelt so guten Pestizidabbau im Vergleich zu pilzfremen Systemen. Ähnlich einem Laufband im Sushi-Restaurant kann hyphenge-tragener Nährstofftransport nicht nur Bakterien in der Mykosphäre ernähren, sondern auch eine bislang übersehene Rolle beim ko-metabolischen Abbau von Schadstoffen spielen. Gerade für die Entfernung von Schadstoffen, die in sehr kleinen Konzentrationen in der Umwelt vorkommen (Mikroverunreinigungen), können Pilz-Bakterien-Interaktionen daher eine besonders wichtige Rolle spielen.

Phagen nutzen Hyphen-reitende Bakterien als Mitfahrgelegenheit

In einem Gramm Boden gibt es bis zu einer Milliarde Viren und Phagen (Bakterien-befallende Viren). Gibt es daher neben Bakterien auch noch weitere potenzielle Nutznießer unterirdischer Pilzgeflechte? Während temperente Phagen im Erbgut von Bakterien eingebaut schlummern, sind lytische Phagen „intelligente Nanopartikel“, die ihre Wirte erst noch infizieren müssen. Da Phagenpartikel unbeweglich sind, sind sie auf der Suche nach ihrem Wirt auf Trägerorganismen und Wasser angewiesen. Trockene Zonen und luftgefüllte Bodenporen stellen für sie also unüberwindbare Hindernisse dar. Auf der Suche nach neuen Phagentransportwegen konnten wir zeigen, dass Phagen sich an Hyphen-reitende Nicht-Wirtsbakterien anhaften und mit diesen, quasi per Anhalter, selbst über Luftporen hinweg transportiert werden, ohne dabei ihre Infektiosität für ihre künftigen Wirte einzubüßen [8]. Helium-Ionen-Mikroskopie zeigte, dass *Escherichia*-Virus-T4-Phagen (T4) sich mit dem Kopf an ihren Nicht-Wirtsbakterien (*Pseudomonas putida* KT 2440) anlagern, während T4-Phagen ihren Wirt mit den Enden ihrer Schwanzfasern infizieren (**Abb. 1**). Phagen mitzunehmen hat aber auch für die Bakterien Vorteile, denn dank ihrer stillen Gäste können sie sich effizienter in Lebensräumen ausbreiten, die bereits durch Wirte ihrer Gäste besetzt sind. Zum Beispiel erhöhte der Transport von T4-Phagen die Fitness Hyphen-reitender *P. putida*-KT-2440-Bakterien und ermöglichte, dank Phagenlyse, deren Invasion und Etablierung in Biofilmen von T4-Wirtszellen.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis entwickelten wir einen Ansatz, um gezielt Bakterien aus Böden zu isolieren, die Phagen transportieren bzw. als Shuttle für Phagenabgabe verwendet werden könnten [9]. Die Idee testeten wir anhand Modellphagen mit unterschiedlicher Oberflächenhydrophobizität. Dabei identifizierten wir fünf Gattungen (*Viridibacillus* sp., *Enterobacter* sp., *Serratia* sp., *Bacillus* sp., *Janthinobacterium* sp.), die Phagen effizient aufnehmen und transportieren können. Hydrophobe Phagen haften in Sorptionsversuchen dabei etwas besser an Bakterienoberflächen als Hydrophile.

Die Sorption der Phagen an *Viridibacillus* sp. ist sogar doppelt so gut wie an ihre jeweiligen Wirte. Es scheint also, dass auch Nicht-Wirtsbakterien als Phagen-Superspreeder und somit als bislang wenig beachtete Trei-

ber bakterieller Gemeinschaften agieren können.

Hyphen mobilisieren anaerobe Bakterien in aeroben Habitaten

Während Pilze meist als aerob und die Mykosphäre als typischer Lebensraum für aerobe Bakterien beschrieben sind, können Pilzbiofilme auch die Anwesenheit anaerober Bakterien begünstigen. Mittels hochauflösender Sauerstoffsensoren konnten wir nachweisen, dass auch einzelne Hyphen eines strohzersetzenden Pilzes (*Coprinopsis cinerea*) die Sporen eines strikt anaeroben und biotechnologisch wichtigen Bodenbakteriums (*Clostridium acetobutylicum*) zum Keimen und Wachsen bringen können; und dies selbst in einem gut belüfteten Pilzhabitat [10]!

Die Sporenkeimung beginnt dabei bereits in etwa 13 Mikrometer Entfernung von einer herannahenden Hyphenspitze. Das deutet darauf hin, dass der Sauerstoffverbrauch der Hyphen ähnliche Bereiche erfasst, wie sie für pH-Veränderungen, enzymatische Aktivität und die Ausbreitung hyphenreitender Bakterien beschrieben wurden. Wir beobachteten außerdem aktives Schwimmen der Clostridien entlang luftexponierter Hyphen über Distanzen bis zu fünf Millimeter. Da strikt anaerobe Bakterien oft eine kurzfristige Sauerstofftoleranz aufweisen, scheinen Myzelien auch gute Netzwerke für die Aktivität und räumliche Ausbreitung von aeroben und anaeroben Bakterien zu sein (**Abb. 2**). Diese Erkenntnis ist besonders für den Untergrund wichtig, da Böden auf kleiner Skala oft stark zониert sind und dynamischen Umweltbedingungen unterliegen. Dabei darf nicht vergessen werden, dass lokalisierte mikrobielle Aktivität selbst ein wichtiger Treiber von Sauerstoffgradienten sein kann. Die Erforschung der Mykosphäre über traditionell angenommenen Grenzen hinaus ist also wichtig, um die Funktionsweise und Stabilität von Pilz-Bakterien-

Gemeinschaften in ihren Ökosystemen weiter zu entschlüsseln bzw. die Dienstleistungen des Pilz-Metaorganismus technologisch anzuwenden. ■

Literatur

- [1] Niego AGT, Lambert, C Mortimer P et al. (2023) The contribution of fungi to the global economy. *Fung Diversity* 121: 95–137
- [2] Kohlmeier S, Smits THM, Ford RM et al. (2005) Taking the fungal highway: mobilization of pollutant-degrading bacteria by fungi. *Environ Sci Technol* 39: 4640–4646
- [3] Harms H, Schlosser D, Wick LY (2011) Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nat Rev Microbiol* 9: 177–192
- [4] Jiang FY, Zhang L, Zhou JC et al. (2020) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytol* 230: 304–315
- [5] Zhang Y, Kastman EK, Guasto JS et al. (2018) Fungal networks shape dynamics of bacterial dispersal and community assembly in cheese rind microbiomes. *Nat Commun* 9: 336
- [6] Worrlich A, Stryhanyuk H, Musat N et al. (2017) Mycelium-mediated transfer of water and nutrients stimulates bacterial activity in dry and oligotrophic environments. *Nat Commun* 8: 15472
- [7] Khan N, Muge E, Mulaa FJ et al. (2023) Mycelial nutrient transfer promotes bacterial co-metabolic organochlorine pesticide degradation in nutrient-deprived environments. *ISME J* 17: 570–578
- [8] You X, Kallies R., Kühn I et al. (2022) Phage co-transport with hyphal-riding bacteria fuels bacterial invasion in a water-unsaturated microbial model system. *ISME J* 16: 1275–1283
- [9] You X, Klose N, Kallies R et al. (2022) Mycelia-assisted isolation of non-host bacteria able to co-transport phages. *Viruses* 14: 195
- [10] Xiong BJ, Kleinstaub S, Sträuber H et al. (2022) Impact of fungal hyphae on growth and dispersal of obligate anaerobic bacteria in aerated habitats. *mBio* 13: e00769-22

Funding note: Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.
Open Access: Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen. Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Korrespondenzadresse:

Dr. Lukas Y. Wick
Department Umweltmikrobiologie
Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ
Permoserstraße 15
D-04318 Leipzig
lukas.wick@ufz.de
www.ufz.de/index.php?de=13567

AUTOR



Lukas Y. Wick

1984–1989 Chemiestudium und 1994 Promotion, Universität Basel, Schweiz. 1995–1998 PostDoc, Massachusetts Institute of Technology, USA, und EAWAG, Dübendorf, Schweiz. 1999–2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Schweiz. Seit 2004 Gruppen- und stellvertretender Departmentleiter, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig. 2012–2015 Adjunkt-Professor, University of Alberta, Edmonton, Kanada. Seit 2021 Chair der integrierten Plattform “Taping Nature’s Potential for Sustainable Production and a Healthy Environment” am UFZ.

Hier steht eine Anzeige.

 Springer