

Flüchtige Metabolite als Infochemikalien: Duftstoffe im Erdreich

MARCO KAI | KATRIN WENKE | BIRGIT PIECHULLA



Duftbouquets sind für die Erkennung, Anlockung und Abwehr von Organismen in ihrer ökologischen Nische essenziell. Duftstoffe kommen nicht nur in der Atmosphäre vor, sondern auch im Erdreich befindliche Organismen nutzen diese leicht flüchtigen Substanzen als Infochemikalien – und dies in viel umfangreichem Maße, als bisher angenommen wurde.

Bekanntermaßen ist der Geruchssinn des Menschen nicht besonders gut ausgeprägt, aber viele Tiere wie beispielsweise Insekten, Hunde, Rehe oder Fledermäuse können kleinste Mengen von Düften wahrnehmen. Sie eröffnen sich damit eine weitere Möglichkeit, mit anderen Organismen zu kommunizieren, indem sie Kontakt aufnehmen, angelockt werden oder abstoßend wirken. Während die Emission und Wahrnehmung von Düften im Tierreich seit langem bekannt und bereits gut untersucht ist, wurde die „Unterhaltung“ von Pflanzen via Duftstoffe („Talking Tree Phänomen“) erst seit wenigen Jahren nachgewiesen und dementsprechend sind noch viele Fragen offen. Auch Bakterien verfügen über ein großes Arsenal an Duftsubstanzen, wie kürzlich eindrucksvoll gezeigt werden konnte [1].

Die Möglichkeit, Duftstoffe als Informationsträger zwischen Organismen nutzen zu können, hängt mit den besonderen Eigenschaften dieser Moleküle zusammen. Sie haben eine geringe Molekülmasse (kleiner als 300 Dalton) und einen hohen Dampfdruck, der es ihnen ermöglicht, leicht in die Gasphase überzugehen. Es

handelt sich um Substanzen mit eher lipophilem als hydrophilem Charakter (Abkürzung: VOCs = volatile organic compounds). Sie gehören unterschiedlichen Substanzklassen an, beispielsweise Terpenoiden, Phenylpropanen oder Benzenoiden und Fettsäurederivaten. Duftstoffe eignen sich sehr gut als Mediatoren zwischen Organismen, weil sie in geringen Mengen wahrgenommen werden und sich über weite Strecken in der Atmosphäre ausbreiten können. Insbesondere wegen der letztgenannten Fähigkeit konzentrierte sich bis vor kurzem die gesamte Forschung an Duftstoffen auf oberirdisch lebende Organismen oder Organismen-teile. Neue Befunde zeigen jedoch, dass auch im Erdreich lebende Organismen die Fähigkeit der Duftstoff-synthese, -emission und -perzeption besitzen. Anhand einiger ausgewählter Beispiele soll dieser für VOCs „neu entdeckte Raum“ und das darin befindliche Potenzial für vielfältige Interaktionen vorgestellt werden.

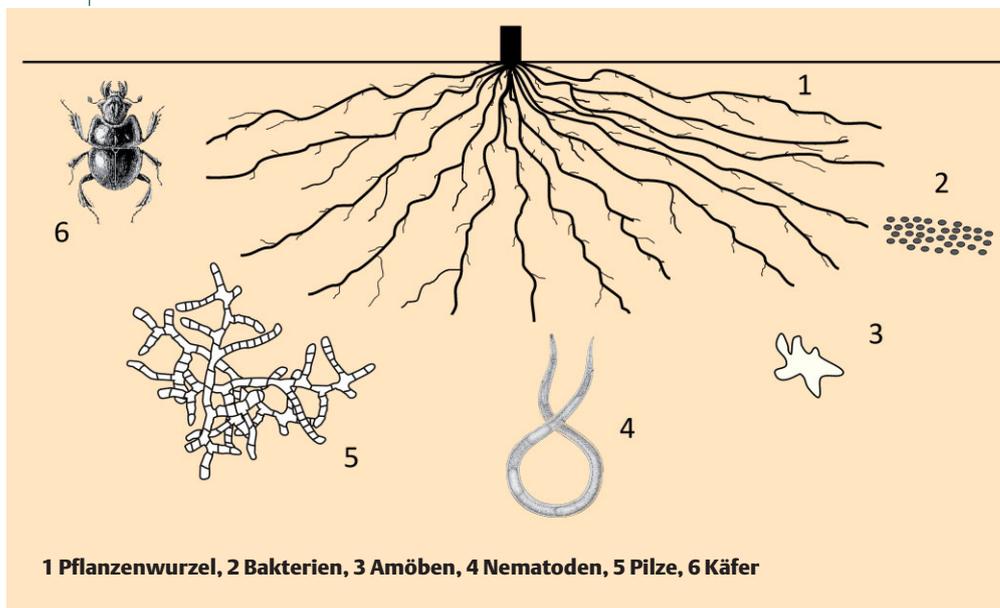
Pflanzendüfte

Aufgrund ihrer sessilen Lebensweise sind Pflanzen darauf angewiesen, mobile Signale an ihre Umwelt abzugeben, die über weite Distanzen wahrgenommen werden können. Im oberirdischen Bereich stellt die Anlockung von Bestäubern über vielfältige Blütenduftstoffe das vermutlich anschaulichste Beispiel für die Kommunikation zwischen Pflanzen und anderen Organismen dar. Das reichhaltige Repertoire an Blütenduftbouquets ist eine bedeutende Möglichkeit für die Tierwelt, um sich in der Pflanzenwelt zu orientieren und Nahrungsquellen zu finden.

Mittlerweile ist man sich aber bewusst, dass darüber hinaus eine Auseinandersetzung von Pflanzen mit anderen Lebewesen im Boden einen enorm wichtigen As-

ABB. 1 Kommunikation im Untergrund: Flüchtige Verbindungen spielen im Erdreich eine ebenso große Rolle für den Informationsaustausch, wie dies für oberirdische Lebensräume gezeigt werden konnte. Bild: blacksock – Fotolia.

ABB. 2 | IM ERDREICH LEBENDE ORGANISMEN



1 Pflanzenwurzel, 2 Bakterien, 3 Amöben, 4 Nematoden, 5 Pilze, 6 Käfer

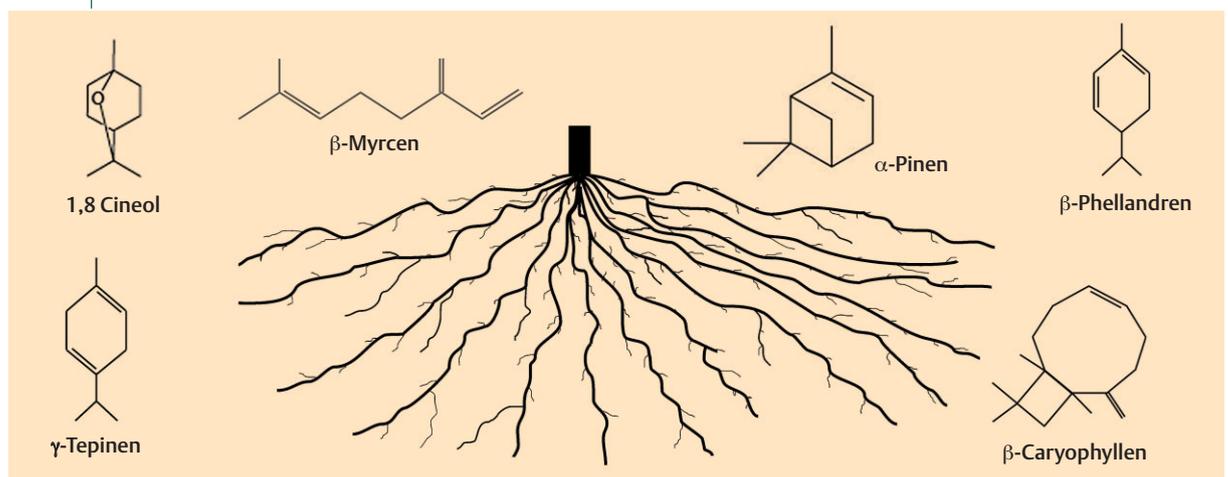
pekt für das pflanzliche Überleben darstellt. Der Bereich um die Pflanzenwurzeln (Rhizosphäre) bietet einen attraktiven Lebensraum für eine Vielzahl von anderen Organismen (Abbildung 2). Ursache für diesen Effekt ist die Abgabe von nahrhaften Wurzelexsudaten, über die Keimlinge bis zu 40 % des photosynthetisch fixierten Kohlenstoffs freisetzen, ältere Pflanzen maximal 20 %. Mittels dieser Metabolite ist es Pflanzen möglich, einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Gemeinschaft bodenbürtiger Organismen auszuüben. Ziel der Pflanzen ist dabei unter anderem die Abwehr von Herbivoren und pflanzenpathogenen Pilzen sowie Bakterien, die Unterstützung nützlicher Symbiosen und die Bekämpfung konkurrierender Pflanzenarten [2]. Für diese äußerst spezifischen Absichten steht der Pflanze eine große, chemische Vielfalt an Wurzelexsudaten zur

Verfügung - wie beispielsweise Aminosäuren und Amide, Proteine, Einfach- und Mehrfachzucker, organischen Säuren, Phenole sowie unterschiedliche Sekundärmetabolite. All diese Metabolite werden in Wasser gelöst und durch Diffusion im Boden weiter getragen. Auch über den Luftraum im Boden können flüchtige Wurzelsignale an weiter entfernte Empfänger transportiert werden [3].

Sehr wichtig für das Verständnis pflanzlicher Interaktionen im Bodenbereich ist die Frage, ob Pflanzen flüchtige Metabolite in Reaktion auf eine veränderte Umwelt bilden beziehungsweise freisetzen. Im Zuge dessen wurde anhand der Modellpflanze Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) getestet, wie sich biotischer und abiotischer

Stress auf die Emission der Wurzel auswirken [4]. Tatsächlich induziert die Interaktion der Pflanzenwurzel mit Pathogenen einen schnellen Anstieg der Ethanol-Emission, vermutlich aufgrund der Umstellung auf Gärungsprozesse. In Reaktion auf die Blattlaus *Diuraphis noxia* setzt *A. thaliana* unter anderem Acetaldehyd über die Wurzel frei, wobei bisher keine insektizide, stattdessen eine antifungische Wirkung von Acetaldehyd gegen die Pilze *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea* und *Colletotrichum acutatum* bekannt ist. Die für die Pflanze-Insekt-Interaktion bedeutsame Verbindung 1,8-Cineol scheint dagegen in Reaktion auf bakterielle wie auch pilzliche Pathogene und Wurzel fressende Insekten abgegeben zu werden (Abbildung 3). Dieses flüchtige Monoterpen wirkt antimikrobiell gegen verschiedene Bakterien wie *Bacillus subtilis*, *Sta-*

ABB. 3 | TYPISCHE DUFTSTOFFE VON PFLANZENWURZELN



phylococcus aureus, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* und Pilze wie *Candida albicans* und *Rhizotorula rubra*.

Durch Festphasenmikroextraktion (solid phase micro extraction – SPME) konnte nachgewiesen werden, dass die Gelbdolde *Smyrniololus sativum* β -Phellandren, β -Caryophyllen, Myrcen sowie Furanodien über ihre Wurzel freisetzt. Neben dem für die Abwehr von Herbivoren bedeutsamen β -Caryophyllen stellen β -Phellandren und Myrcen ebenso ökologisch relevante Verbindungen dar: während sich ersteres als wirksam gegen den wurzelpathogenen Pilz *Fomes annosus* erwies, ist Myrcen giftig für den Borkenkäfer *Dendroctonus brevicornis*. Weiterhin wird Furanodien eine antifungische und cytotoxische Aktivität zugeschrieben. Gleiches wird für Curzeren beschrieben, welches sich im Wurzelöl der Gelbdolde befindet.

Eine direkte Verbindung zwischen der Duftstoffkomposition und der Wahl von Wirtspflanzen (Karotten *Daucus carota* ssp. *sativus* oder Eichenwurzeln *Quercus* sp.) wurde mit den Larven des Maikäfers (*Melolontha hippocastani*) gezeigt. Diese bevorzugten eindeutig Karotte, die hauptsächlich Monoterpene emittiert, im Vergleich zur Eichenwurzel, die in erster Linie Fettsäurederivate freisetzt. Das Muster der emittierten Verbindungen ist nicht allein abhängig von der Pflanzenart, sondern ebenso von dem physiologischen Zustand der Wurzeln (mechanische Verwundung, Fraßschäden, Kolonisation durch Mikroorganismen). Verletzte Karotten setzen vermehrt Sesquiterpenoide frei und beschädigte Eichenwurzeln Phenole und Monoterpene.

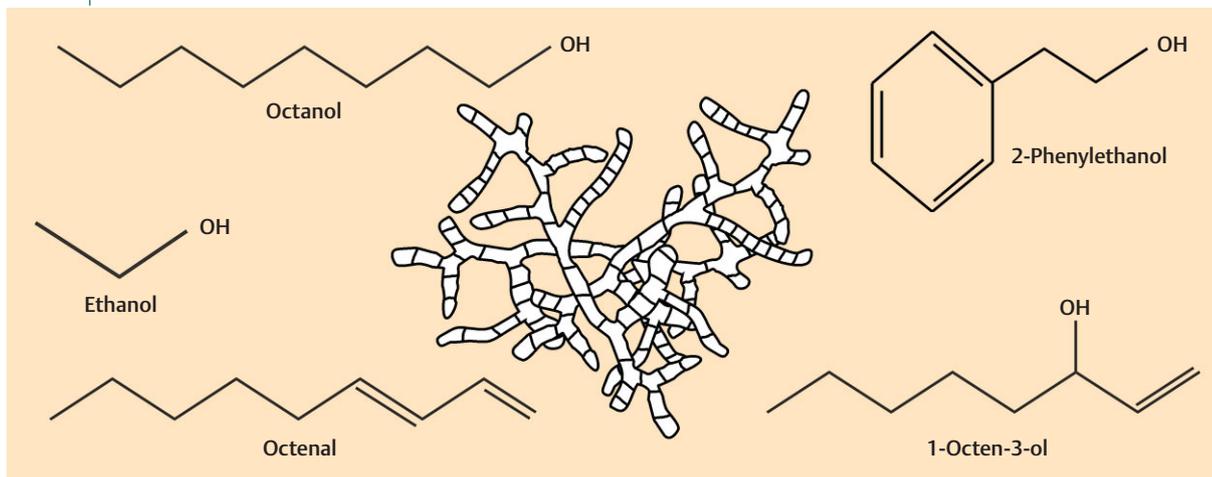
Die Fähigkeit, auf Fraßschäden mit einem veränderten Wurzelduftbouquet zu reagieren, kann von der Pflanze für die indirekte Abwehr bodenbürtiger Feinde genutzt werden. Diese Form der Verteidigung ist gekennzeichnet durch die Anlockung von Fraßfeinden des Herbivors. Als erste beschrieben van Tol et al. 2001

[5] dieses Phänomen bei dem immergrünen Lebensbaum *Thuja occidentalis*, der nach Befall durch den Dickmaulrüssler *Otiobryncbus sulcatus* Stoffe zur Anlockung des parasitären Nematoden *Heterorhabditis megidis* abgibt. Angelockt durch (E)- β -Caryophyllen, welches bei Fraßschäden von der Maiswurzel freigesetzt wird, schützt *H. megidis* gleichfalls Mais vor dem Westlichen Maiswurzelbohrer *Diabrotica virgifera virgifera*, einem sich weltweit stark ausbreitenden Maisschädling [6].

Die von Pflanzen gebildeten, bioaktiven Substanzen in Wurzeln sind sehr vielfältig. Beispielsweise bildet die Hirschwurzel *Rhaponticum carthamoides* aus der Familie der Korbblütler ein Öl mit insgesamt 30 flüchtigen Komponenten. Dieses Wurzelöl zeigt toxische Eigenschaften gegen verschiedene bakterielle Humanpathogene (*Enterococcus faecalis*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*) und gegen die Hefe *Candida albicans*. Die Hauptkomponenten 13-Norcyperen-1(5),11(12)-dien, Cyperen und Aplotaxen sind allerdings inaktiv gegen die getesteten Organismen, sodass davon ausgegangen werden muss, dass entweder in geringen Mengen vorkommende Volatile oder ein Gemisch aus mehreren Substanzen biologisch wirksam sind. Zum Beispiel könnten das in Spuren vorkommende und auch an der indirekten Pflanzenabwehr beteiligte β -Caryophyllen sowie die antifungischen Verbindungen α -Pinen und β -Pinen beteiligt sein. Beta-Caryophyllen ist ebenfalls zu 13,2 % im Wurzelöl des Bittereschengewächses *Simaba moiana* nachgewiesen worden.

Eine andere flüchtige Verbindung mit einer toxischen Wirkung auf Insekten ist in dem Wurzelöl des zu den Hülsenfrüchtlern zählenden Baumes *Bowdichia virgilioides* enthalten: das gegen den landwirtschaftlich bedeutungsvollen Pflanzenschädling *Heliothis zea* (Eulenfalter) und gegen Spinnmilben wirksame, schwach antimykotische 2-Tridecanon, welches bei

ABB. 4 | TYPISCHE DUFTSTOFFE VON IM BODEN LEBENDEN PILZEN



spielsweise die Wildtomate *Lycopersicum* spp. vor pilzlichen und tierischen Pathogenen schützt.

Betrachtet man das Erdreich als Raum für wirksame, flüchtige Metabolite, so sind neben der Wurzel auch Rhizome als Quelle bioaktiver, flüchtiger Metabolite einzubeziehen. Insgesamt 86 Verbindungen ließen sich sowohl im ätherischen Öl als auch im umgebenen Luftraum des Rhizoms des zu den Dickblattgewächsen zählenden Rosenwurz *Rhodiola rosea* detektieren. Biologisch wirksame Verbindungen sind unter anderem die antifungischen α -Pinen und β -Pinen, α -Terpineol, Linalool, Cinnamaldehyd und β -Phellandren, die gegen Bakterien wirksamen α -Terpineol und γ -Terpinen sowie mehrere für den Borkenkäfer *D. brevicornis* giftige Monoterpene wie Limonen und Myrcen.

Pilzdüfte

Wildschweine nutzen die Duftstoffe des unterirdisch wachsenden Trüffelpilzes (*Tuber* spp.) zur Suche dieser Delikatesse. Trüffel können bis zu 200 flüchtige Metabolite abgeben. Typische Duftkomponenten haben eine Moleküllänge von acht Kohlenstoffatomen wie beispielsweise trans-2-Octenal, 1-Octen-3-ol und Octanol. Sie sind die Hauptbestandteile des charakteristischen Pilzgeruchs (Abbildung 4).

Die verschiedenen Trüffelarten unterscheiden sich jedoch in ihrem Duftspektrum. Der Geruch von *Tuber borchii* und *Tuber melanosporum* ist durch die unterschiedlichen Anteile von schwefelhaltigen Substanzen deutlich vom Geruch von *Tuber indicum* verschieden. Ebenso duften das Mycel und der Fruchtkörper der Pilze nicht gleich. Es ließ sich bis heute auch noch nicht feststellen, welche Duftkomponenten Wildschweine bei der Trüffelsuche nutzen. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Trüffelpilze mit verschiedenen Hefen in Symbiose leben und diese das Duftbouquet ergänzen [7].

Dass Pilze typische Gerüche abgeben, ist jedem durch das Verschimmeln von Lebensmitteln bekannt. Die Lebensmittelindustrie nutzt diese Gerüche und kann dadurch den Pilzbefall von beispielsweise Fleisch, Brot, Gemüse und Obst feststellen und somit die Lebensmittelqualität überprüfen. Schimmelige Räume in Häusern können ebenfalls durch die Duftstoffabgabe der Pilze gut ausfindig gemacht werden.

Auch im Boden lebende Pilze sind in der Lage, flüchtige Metabolite abzugeben. Die biologische Bedeutung dieser Emissionen ist bisher jedoch nur an wenigen Beispielen aufgeklärt worden. Die VOCs können für die sexuelle Fortpflanzung der Pilze wichtig sein, denn die flüchtigen Metabolite unterstützen das Auffinden des richtigen Paarungspartners. Sie werden aber auch bei der interspezifischen Erkennung genutzt: Wenn Hyphen verschiedener Pilze (beispielsweise der Grünblättrige Schwefelkopf *Hypholoma fasciculare* und der Zweifarbige Harz-Rindenpilz *Resinicium bico-*

lor) Kontakt aufgenommen haben, signalisieren sie dies durch die Emission eines anderen Sets von Duftstoffen [8]. Letztere führen unter anderem zur Wachstumsverminderung beider Pilze, sodass sich beide „aus dem Weg“ gehen können. Im Allgemeinen wird Pilzwachstumsinhibition in Böden (Fungistase) unter anderem durch die Präsenz von bakteriellen und pilzlichen, flüchtigen Substanzen, beispielsweise Trimethylamin, Benzaldehyd und N,N-Dimethyloctylamin, vermittelt [3, 9].

Sekundärmetabolite sind an der Interaktion von Pflanzenwurzeln (beispielsweise Bäumen) und Mykorrhiza-Pilzen beteiligt. Für mehr als 800 Arten von Landpflanzen wurde bereits ein Zusammenleben mit Pilzen dokumentiert. In der Regel führt diese Symbiose zu einer besseren Versorgung mit Phosphat, Stickstoff und Wasser und damit zu verstärktem Pflanzenwachstum. Schon 1971 gab es Hinweise, dass die VOC-Kommunikation zwischen der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und dem Sandröhrling *Boletus variegatus* zur Inhibition von phytopathogenen Pilzen führt und die mykorrhizierenden Pilze im Wachstum genau in Schach gehalten werden können [10]. Aber nicht nur positive Effekte für die Pflanzen sind möglich. So kann die Emission der Trüffel-VOCs zum Sterben von krautigen Pflanzen („burnt area“) führen, denn nachweislich inhibieren künstlich zusammengesetzte „Trüffel-VOC-Gemische“ das Wachstum der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana* im Labor [11].

Bakteriendüfte

Das Reich der Bakterien ist ebenfalls eine reichhaltige Quelle flüchtiger Verbindungen, die noch nicht sehr umfassend untersucht wurden. Bislang wurden mindestens 350 bakterielle, flüchtige Verbindungen beschrieben, die von verschiedenen Bakterienarten emittiert werden [12]. Diese Verbindungen lassen sich in folgende Substanzklassen unterteilen: Fettsäurederivate, aromatische Verbindungen, stickstoffhaltige Verbindungen, Schwefelverbindungen und Terpenoide. Zahlreiche im Duftspektrum befindliche Substanzen konnten bislang aufgrund unzureichender Detektions- und/oder Identifikationsmöglichkeiten nicht bestimmt werden. Folglich sind die Funktionen dieser Duftstoffe auch weitestgehend unbekannt. Aufgrund einiger Beispiele und durch Vergleiche mit Duftstofffunktionen in anderen Organismengruppen wird vermutet, dass die bakteriellen Duftstoffe als Signalverbindungen für die inter- und intraspezifische Kommunikation oder als Zell-zu-Zell-Signale fungieren, der Entsorgung überschüssiger Kohlenstoffverbindungen dienen oder wachstumsfördernde beziehungsweise -hemmende Substanzen sind.

Als wohl bekanntester Duftstoff, der von bodenlebenden Bakterien emittiert wird, ist das Geosmin zu nennen. Sein typisch erdiger Geruch wird unter ande-

rem auch von kontaminierten Lebensmitteln, Wein und Wasser als so genannter „off flavor“-Duft abgegeben. Gebildet wird das Sesquiterpen Geosmin überwiegend von den zu den Actinobacteria zählenden *Streptomyces*-Arten, aber auch von Cyanobakterien, Myxobakterien, vom Lebermoos und von bodenlebenden und aquatischen Pilzen.

Rhizobakterien, die im Boden eng assoziiert mit Pflanzenwurzeln angesiedelt sind, konnten auch als Produzenten flüchtiger Verbindungen ausgemacht werden. Es handelt sich vorrangig um Bakterien der Gattungen *Bacillus*, *Serratia* und *Pseudomonas*. Viele Vertreter dieser Bodenorganismen sind bereits durch ihre das Pflanzenwachstum unterstützenden und Pflanzenpathogene hemmenden Fähigkeiten (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) aufgefallen und werden teilweise als „biocontrol agents“ in der Landwirtschaft eingesetzt. Typischerweise produzieren diese PGPR antifungische Metabolite, Antibiotika oder Toxine, chitinolytische Enzyme (Chitinasen, Glucanasen) oder entlassen Substanzen, die die Aufnahme von Mikronährstoffen erleichtern.

2003 wurde erstmals gezeigt, dass flüchtige Verbindungen der PGPR das Pflanzenwachstum fördern. Die von zwei *Bacillus* spp. emittierten Verbindungen 2,3-Butandiol und Acetoin förderten das Wachstum von *Arabidopsis thaliana* [13], indem sie deren Auxin-Homöostase und Zellexpansion regulierten. Zusätzlich zu dieser direkten Wachstumspromotion waren die beiden Substanzen auch in der Lage, die Resistenz in *A. thaliana* zu induzieren. Ein weiterer Effekt wird dem gesamten Duftbouquet eines *Bacillus*-Stammes zugeordnet. Basilikumpflanzen, welche in Co-Kultur mit *Bacillus subtilis* wuchsen, zeigten eine Akkumulation von ätherischen Ölen, die unter anderem α -Terpineol und Eugenol enthielten. Hierbei handelt es sich um antimikrobielle Substanzen. Andere antagonistische Rhizo-

bakterien zeigten allerdings eine gegenteilige Wirkungsweise: Co-Kultivierungen von *Serratia* spp., *Pseudomonas* spp. und *Stenotrophomonas* spp. mit *A. thaliana*, bei denen nur die flüchtigen Substanzen als wirkende Mediatoren in Frage kamen, führten zu einer dramatischen Wachstumsinhibition der Pflanze [14].

Die Wachstumsbeeinflussung von phytopathogenen (beispielsweise *Rhizoctonia solani*, *Verticillium dahliae*, *Sclerotinia sclerotiorum*) und pflanzenneutralen (beispielsweise *Aspergillus niger*, *Neurospora crassa*, *Paecilomyces carneus*, *Phoma betae*) Pilzen durch flüchtige Metabolite von Rhizobakterien ist durch viele Beispiele belegt [14]. Auch hier konnten sowohl supprimierende als auch stimulierende Effekte nachgewiesen werden. Die Mehrzahl der bisher untersuchten Bakterien übt jedoch negative Einflüsse auf das Mycelwachstum, die Sporulation und die Sporeneimung der Pilze aus. Da bisher mit komplexen VOC-Gemischen gearbeitet wurde, müssen die biologisch wirksamen Substanzen noch ermittelt werden. Negative Bioaktivität zeigten Trimethylamin, Benzaldehyd, Cyclohexanol, Decanol und Dimethyldisulfid (Abbildung 5) [9].

Bakterielle flüchtige Verbindungen mit positiven Effekten auf die Entstehung der Sklerotien (Dauermycel) und der Fruchtkörper sowie auf das Mycelwachstum wurden bei Pseudomonaden und nicht weiter identifizierten Bakterien beobachtet. Das Mykorrhiza-Helfer-Bakterium (MHB) *Pseudomonas monteilii* ist mit seinen flüchtigen Verbindungen in der Lage, das Hyphenwachstum von *Pisolithus albus* (Gattung der Erbsenstreulinge) positiv zu unterstützen. Dies könnte eine gesteigerte Entwicklung der Mykorrhiza zur Folge haben, die wiederum das Pflanzenwachstum positiv beeinflusst.

Neben den Pilzen sind auch ein- beziehungsweise mehrzellige tierische Organismen Mitglieder der Rhi-

ABB. 5 | TYPISCHE DUFTSTOFFE VON IM BODEN LEBENDEN BAKTERIEN

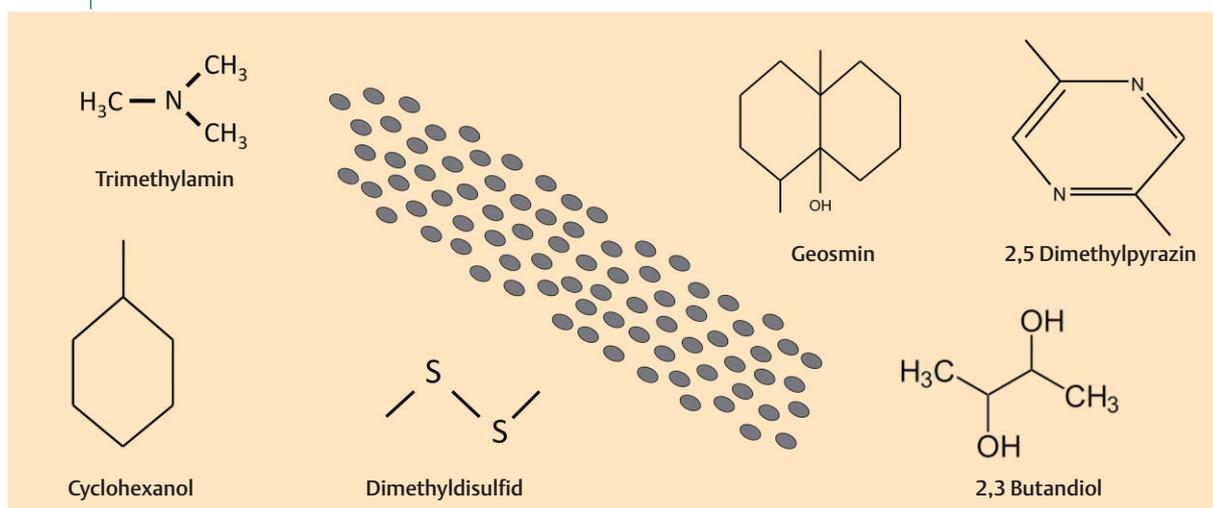
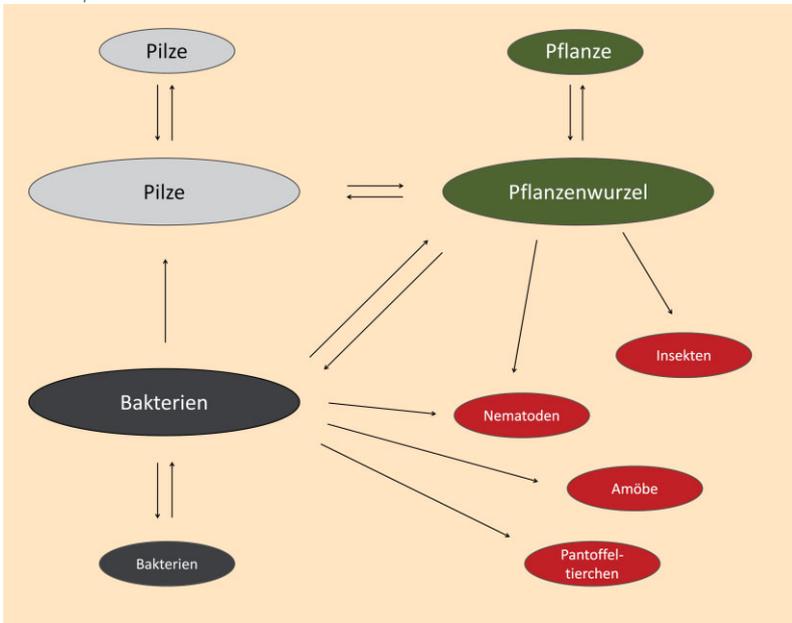


ABB. 6 AUF DUFTSTOFFKOMMUNIKATION BASIERENDE INTERAKTIONEN ZWISCHEN ORGANISMEN IM ERDREICH



zosphärengemeinschaft. Die Wirkung von volatilen Verbindungen auf das Wachstum dieser Organismengruppen ist bislang kaum untersucht. Eigene Arbeiten zeigen, dass der Nematode *Caenorhabditis elegans* durch bakterielle Duftstoffgemische von *Serratia odorifera* und *Pseudomonas fluorescens* angelockt wird. Beide Bakterienarten emittieren verschiedene Dimethylsulfide, die als Chemolockstoffe diskutiert werden. In einem größeren Versuchsansatz übten dagegen 149 beziehungsweise 165 von 200 aus der Rhizosphäre von Tabakpflanzen isolierte Bakterien (vorrangig *Bacillus* spp.) einen negativen Einfluss auf die Beweglichkeit der Nematoden *Panagrellus redivivus* und *Bursaphelenchus xylophilus* aus. Auch auf Protozoa können rhizobakterielle, volatile Substanzen wachstumshemmend wirken. Co-Kultivierungen der Bakterien-Arten *Serratia*, *Bacillus* und *Xanthomonas* mit der Amöbe *Acanthamoeba castellanii* und dem Pantoffeltierchen *Paramecium caudatum* wirkten auf die tierischen Einzel-ler letal [15].

Wie bereits erwähnt, können flüchtige Verbindungen auch als Signalstoffe für die Zell-zu-Zell-Kommunikation dienen. Indol, eine typische Duftkomponente des im Boden vorkommenden Bakteriums *Escherichia coli*, ist Regulator für verschiedene Gene und stellt einen Inhibitor der Biofilmbildung von *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens* und *Pseudomonas aeruginosa* dar. Obwohl Indol bisher nicht von in der Rhizosphäre lebenden Bakterien isoliert werden konnte, ist davon auszugehen, dass die Bakterien-Zell-Zell-Kommunikation (quorum sensing) eine weitere Funktion flüchtiger, bakterieller Metabolite im Wurzelreich ist.

Ausblick

Zukünftige Untersuchungen zur Emission und Perzeption flüchtiger Metabolite mit Organismen/Organismenteilen des „Untergrunds“ sind notwendig, um die unterirdischen Interaktionen vollständig verstehen zu können (Abbildung 6). Es wird spannend sein herauszufinden, welche flüchtigen Metabolite/-gemische und -konzentrationen für die Populationszusammensetzung von verschiedenen unterirdischen, ökologischen Nischen verantwortlich sind. Ziel wird es auch sein kennenzulernen, unter welchen Bedingungen welche flüchtigen Metabolite gebildet werden, um somit zugrundeliegende Regulationen verstehen zu können.

Denkbar ist auch, dass diese biologisch aktiven Substanzen eine neue Quelle für „Flüchtige Antibiotika“ im Einsatz gegen humane, tierische und pflanzliche Pathogene darstellen.

Zusammenfassung

Flüchtige Metabolite breiten sich nicht nur in der Atmosphäre aus und sind dort biologisch wirksam, sondern auch unterirdisch lebende Organismen nutzen die flüchtigen Substanzen als Kommunikationsmittel, zur Abwehr und Anlockung und zur Zell-Zell-Erkennung. Dabei sind verschiedene Eukaryoten (beispielsweise Pflanzen(wurzeln), Invertebraten, Pilze), aber auch Prokaryoten (beispielsweise Rhizobakterien) an Interaktionen, die durch Duftstoffe vermittelt werden, nachweislich beteiligt.

Summary

Volatile metabolites diffuse not only in the atmosphere to possess their actions aboveground, but also belowground living organisms benefit from volatiles in the soil since they can act as communication signals, defence and chemoattraction compounds, as well as mediators for cell-to-cell recognition. Various eucaryotes (e.g. plant (roots), invertebrates, fungi) and also procaryotes (e.g. rhizobacteria) are verifiable involved in these volatile mediated interactions.

Schlagworte

Volatile, Wurzelraum, Rhizobakterien

Literatur

- [1] M. Kai, U. Efmert, G. Berg, B. Piechulla, Volatiles of bacterial antagonists inhibit mycelial growth of the plant pathogen *Rhizoctonia solani*, Archives Microbiology 2007, 187, 351–360.
- [2] S. Nardi, G. Concheri, D. Pizzeghello, A. Sturaro, R. Rella, G. Parvoli, Soil organic matter mobilization by root exudates, Chemosphere 2000, 41, 653–658.
- [3] R. E. Wheatley, The consequences of volatile organic compound mediated bacterial and fungal interactions, Antonie van Leeuwenhoek 2002, 81, 357–364.
- [4] M. Steeghs, H. Pal Bais, J. de Gouw, P. Goldan, W. Kuster, M. Northway, R. Fall, J. M. Vivanco, Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry as a new tool for real time analysis of root secreted volatile organic compounds in Arabidopsis, Plant Physiology 2004, 135, 47–58.

- [5] R. W. H. M. van Tol, A. T. C. van der Sommen, M. I. C. Boff, J. van Bezooijen, M. W. Sabelis, P. H. Smits, Plants protect their roots by alerting the enemies of grubs, *Ecology Letters* 2001, 4, 292–294.
- [6] S. Rasmann, T. G. Köllner, J. Degenhardt, I. Hiltbold, S. Toepfer, U. Kuhlmann, J. Gershenzon, T. C. J. Turlings, Recruitment of entomopathogenic nematodes by insect-damaged maize roots, *Nature* 2005, 434, 732–737.
- [7] P. Buzzini, C. Gasparetti, B. Turchetti, M. R. Cramarossa, A. Vaughan-Martini, A. Martini, U. M. Pagnoni, L. Forti, Production of volatile organic compounds (VOCs) by yeasts isolated from the ascocarps of black (*Tuber melanosporum* Vitt.) and white (*Tuber magnatum* Pico) truffles, *Arch. Microbiol.* 2005, 184, 187–193.
- [8] J. Hynes, C. T. Muller, T. H. Jones, L. Boddy, Changes in volatile production during the course of fungal mycelial interactions between *Hypholoma fasciculare* and *Resinicium bicolor*, *J. Chem. Ecol.* 2007, 33, 43–57.
- [9] X. Chuankun, M. Minghe, Z. Leming, Z. Keqin, Soil volatile fungistasis and volatile fungistatic compounds, *Soil Biol. Biochem.* 2004, 36, 1997–2004.
- [10] S. Krupa, N. Fries, Studies on ectomycorrhizae of pine. I. Production of volatile organic compounds, *Can. J. Bot.* 1971, 49, 1425–1431.
- [11] R. Splivallo, M. Novero, C. M. Berteà, S. Bossi, P. Bonfante, Truffle volatiles inhibit growth and induce an oxidative burst in *Arabidopsis thaliana*, *New Phytol.* 2007, 175, 417–424.
- [12] S. Schulz, J. S. Dickschat, Bacterial volatiles: the smell of small organisms. *Nat. Prod. Rep.* 2007, 24, 814–842.
- [13] C. M. Ryu, M. F. Farag, C. H. Hu, M. S. Reddy, H. X. Wei, P. W. Paré, J. W. Kloepper, Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis*, *PNAS* 2003, 100/8, 4927–4932.
- [14] A. Vespermann, M. Kai, B. Piechulla, Rhizobacterial volatiles affect the growth of fungi and *Arabidopsis thaliana*, *Appl. Environ. Microbiol.* 2007, 73, 5639–5641.
- [15] M. Kai, M. Haustein, F. Molina, A. Petri, B. Scholz, B. Piechulla, Bacterial volatiles and their action potential, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2009, 81, 1001–1012.

Die Autoren



Birgit Piechulla, geb. 1956, studierte von 1975–1980 Diplombiologie an den Universitäten Oldenburg und Göttingen. Promotion 1983 am MPI f. experimentelle Medizin und Universität Göttingen. Postdoc (1984–1986) am Botany Dept., Univ. of California, Berkeley. Habilitation 1992 an der Universität Göttingen im Fach Biochemie. C4 Professur für Biochemie an der Universität Rostock seit 1996. Co-Editor „Plant Biology“, Co-Autor Lehrbuch „Pflanzenbiochemie“.



Marco Kai, geb. 1978, studierte Diplombiologie (1998–2005) an der Universität Rostock. Diplom im Fachbereich Biowissenschaften der Universität Rostock (2005) mit den Schwerpunktfächern Biochemie, Mikrobiologie, Immunbiologie und Biotechnologie. Seit 2006 Doktorand bei Prof. Birgit Piechulla in der Abteilung Biochemie der Universität Rostock. Promotionsarbeit über flüchtige Metabolite, die von Rhizobakterien emittiert werden.



Katrin Wenke, geb. 1983, studierte Diplombiologie (2002–2007) an der Universität Rostock. Diplom im Fachbereich Biowissenschaften der Universität Rostock (2007) mit den Schwerpunktfächern Biochemie, Molekularbiologie, Pharmakologie/Toxikologie. 2007 Verleihung des GBM-Diplompreises, seit 2007 Doktorandin bei Prof. Birgit Piechulla in der Abteilung Biochemie der Universität Rostock. Promotionsarbeit über die Wirkung bakterieller Volatile auf die Modellpflanze *Arabidopsis thaliana*.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Birgit Piechulla
Institut für Biowissenschaften
Universität Rostock
Albert-Einstein-Str. 3
18059 Rostock
Email: birgit.piechulla@uni-rostock.de