



Abb. 1: Das Sekret, mit dem Weibchen der Kiefernbuschhornblattwespe (*Diprion pini*) ihre Eier auf einer Kiefernadel befestigen, löst eine Änderung im Duftbouquet der Nadel aus und lockt auf diese Weise Eiparasitoide an.

Rundgespräch

Die Sprache der Moleküle

Eine Fachtagung im April 2016 gab Einsichten in die chemische Kommunikation in der Natur. Der zugehörige Berichtsband ist nun erschienen.

VON CLAUDIA DEIGELE

ALLE ORGANISMEN benutzen in irgendeiner Weise Moleküle als Signale, um Information auszutauschen. Diese „chemischen Sprachen“ sind die älteste Form der Kommunikation. Die Chemische Ökologie als eigenständige interdisziplinäre Forschungsrichtung befasst sich unter anderem mit der Identifizierung dieser Signale, mit der Aufklärung von Systemen zu ihrer Wahrnehmung und Weiterleitung in die Zelle bzw. den Organismus, aber auch mit den Wirkungen der Signale auf die Evolution, das Verhalten und die Ökologie der beteiligten Organismen. Die von Markus Riederer (Uni Würzburg) organisierte Fachtagung „Die Sprache der Moleküle – chemische Kommunikation in der Natur“ des Forums Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften zeigte neue und überraschende Ergebnisse aus diesem faszinierenden Forschungsfeld.

ABB.: GRUPPE MONIKA-HILKER, GRUPPE IAN BALDWIN

Wie sich Pflanzen gegen Fraßfeinde wehren

Der Feind meines Feindes ist mein Freund: Nach diesem Motto locken z. B. Pflanzen, deren Blätter durch Raupenfraß geschädigt werden, parasitische Wespen (Parasitoide) an, die ihre Eier in oder auf diesen Raupen ablegen (Abb. 2) und sie auf diese Weise letztlich abtöten. Dass dabei die Parasitoiden bereits durch die Eiablage auf Blättern angelockt werden, zeigt Monika Hilker (FU Berlin) anhand der Interaktionen zwischen der Waldkiefer, der Kiefernbuschhornblattwespe (*Diprion pini*) und einem Parasitoiden, der seine Eier in diejenigen von *D. pini* legt. Das Duftbouquet der Nadeln, die mit Eiern von *D. pini* belegt sind (Abb. 1), unterscheidet sich von dem eifreier Nadeln durch einen erhöhten Gehalt an (*E*)- β -Farnesen, einem Sesquiterpen. Auf diese Weise wird der Eiparasitoid angelockt. Interessanterweise spielt dabei der gesamte „Habitatduft“ des Kiefernwaldes eine Rolle, also der Duft sowohl eierbelegter als auch eifreier Nadeln.

Darüber hinaus können Eiablagen als eine Art „Frühwarnsignal“ dienen und so die pflanzliche Abwehr verstärken. Ulmen, die pro Saison von mehreren Generationen von Ulmenblattkäfern befallen werden, bilden durch die Eiablagen z. B. verstärkt bestimmte phenolische Verbindungen in den Blättern, wodurch die Mortalität der Larven, die an eierbelegten Blättern fressen, höher ist als diejenige von Larven, die an eifreien Blättern fressen. Die „Warnung“ geht jedoch noch weiter. So zeigt Axel Mithöfer (MPI für Chemische Ökologie, Jena), dass befallene Blätter über eine veränderte Duftstoffemission nicht nur unbefallene Blätter derselben Pflanzenart „warnen“ können, sondern dass sich auch die Aktivität bestimmter Enzyme ändert, die an der Bildung phenolischer Komponenten beteiligt sind, z. B. im Wilden Tabak (Familie der Nachtschattengewächse), wenn er in der Nähe eines mechanisch oder durch Herbivoren verwundeten Wüstenbeifußes (Familie der Asterngewächse) wächst. Pflanzen können also Signale über Artgrenzen hinweg empfangen und umsetzen. Die dabei verwendete „Sprache“ ist jedoch nicht bei allen Pflanzen(-familien) identisch. Ob es sich dabei tatsächlich um eine „Warnung“ der befallenen Pflanze an ihre Nachbarn handelt oder nicht vielleicht eher um ein „Belauschen“ von Seiten der unbefallenen Pflanze zu ihrem eigenen Vorteil, bleibt offen.

Sexualpheromone bei parasitischen Wespen

Um Parasitoide in großem Maßstab z. B. für die biologische Schädlingsbekämpfung einzusetzen, müssen für ihre erfolgreiche Massenzucht vor allem diejenigen Aspekte verstanden werden, die ihren Reproduktionserfolg beeinflussen. Wie komplex das Zusammenspiel der Sexualpheromone bei der parasitischen Wespe *Nasonia* ist, die ihre Eier in die Puppen verschiedener Fliegenarten legt, erläutert Joachim Ruther (Uni Regensburg). Zum Beispiel müssen Weibchen angelockt werden, die wiederum das Balzverhalten der Männchen auslösen, wodurch die Weibchen paarungsbereit werden – dies alles geschieht über chemische Verbindungen und sorgt letztlich unter anderem dafür, dass sich die innerhalb eines Wirtes geschlüpften Weibchen verschiedener *Nasonia*-Arten mit den jeweils „richtigen“ Männchen noch in dem Wirtsorganismus paaren können.

Wie sich die Chemie ändert, wenn Pflanzen die Welt erobern

Wie ändern sich pflanzliche Inhaltsstoffe, wenn sich gezielt eingeführte oder unbeabsichtigt eingeschleppte Pflanzen in ihrer neuen Heimat erfolgreich ausbreiten? Und welchen Einfluss hat dies auf die jeweiligen pflanzenfressenden Gegenspieler? Anhand von drei Beispielen

Abb. 2: Larve des Tabakschwärmers (*Manduca sexta*) mit Kokons der Großen Brackwespe (*Cotesia congregata*).



len erklärt Caroline Müller (Uni Bielefeld) die aktuellen Hypothesen aus der Forschung zur chemischen Ökologie invasiver Pflanzen. So ist der (Fraßfeinde abschreckende) Gehalt an sogenannten Glucosinolaten in invasiven Populationen der Pfeilkresse (*Lepidium draba*; Abb. 3) höher als in heimischen Populationen. Dies klingt zunächst überraschend, fehlen doch die

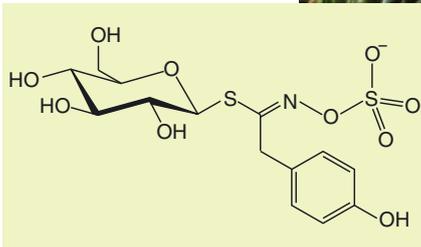


Abb. 3: Pfeilkresse (*Lepidium draba*) und die Strukturformel von Sinalbin. Glucosinolate (Senfölglykoside) kommen sonst nur in sehr wenigen anderen Pflanzenfamilien vor und stellen damit einen guten Schutz gegen Fraßfeinde dar.

auf die Pfeilkresse spezialisierten Fraßfeinde im neuen Gebiet. Glucosinolate (und deren toxische Abbauprodukte) stellen jedoch eine für die Pflanze relativ „billige“ Abwehr dar, die mit einem geringen zusätzlichen Energieaufwand verbunden ist. Durch ihre verstärkte Produktion ist die Pfeilkresse am neuen Standort besser gegen Generalisten unter den dort vorkommenden Pflanzenfressern (Herbivoren) geschützt. Am Heimatstandort haben sich dagegen im Laufe der Zeit herbivore Spezialisten entwickelt, die gelernt haben, diese chemischen Verbindungen zu entgiften, und sie nun sogar dazu nutzen, um ihre Wirtspflanzen aufzufinden.

Interaktionen im Meer: Schwämme, der Meersalat *Ulva* und ihre Bakterien

Schwämme (Abb. 4) bilden einen der ältesten Tierstämme; Fossilienfunde datieren bis zu 700 Millionen Jahre, zum Ende des Präkambriums, zurück. Zur Nahrungsaufnahme saugen sie über Öffnungen an ihrer Außenfläche Wasser ein, das ein verzweigtes Kammersystem im Schwamminneren durchfließt und über eine oder mehrere Ausstromöffnungen wieder ausgestoßen wird. Jeder Milliliter eingestrudelt Wasser enthält rund fünf Millionen Bakterien, die von Schwammzellen herausfiltriert werden; das ausgestoßene Wasser ist nahezu steril. Umso erstaunlicher ist es, dass Schwämme in ihrer Matrix große Mengen von Mikroorganismen beherbergen, die bis zu einem Drittel der Biomasse des Tieres ausmachen können und die nicht abgebaut werden. Mittlerweile sind Vertreter von 43 Bakterienstämmen bekannt,

ABB.: KARELI / PUBLIC DOMAIN; M. WEHRL



Abb. 4: Der Mittelmeerschwamm *Aplysina aerophoba* kann eine sogenannte aktivierte chemische Verteidigung durchführen, indem er inaktive Vorstufen in bioaktive Substanzen umwandelt, wenn er mechanisch verletzt oder von Fraßfeinden angeknabbert wird.

die wiederholt und hochgradig spezifisch in Schwämmen identifiziert wurden. Erst in den letzten Jahren wurde entdeckt, dass nicht nur die Schwämme selbst im Laufe der Evolution eine äußerst vielseitige chemische Verteidigung entwickelt haben, mit der sie sich gegen ihre Fraßfeinde und z. B. gegen Bakterienbefall wehren, sondern dass auch ihre mikrobiellen Symbionten wesentlich zu dieser Verteidigung beitragen. Ute Hentschel Humeida (GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel) stellt die spannende Suche nach neuen bakteriellen Wirkstoffen vor, die unter anderem gegen pathogene oder parasitische Infektionserreger eingesetzt werden könnten.

Thomas Wichard (Uni Jena) konzentriert sich in seiner Forschungsarbeit dagegen auf Bakterien, die die Alge *Ulva* (auch Meersalat genannt) „in Form bringen“: Zellkulturen von *Ulva*, die unter künstlichen Bedingungen bakterienfrei angezogen werden, entwickeln sich zu einem undifferenzierten Zellhaufen. Erst nach Zugabe von zwei bestimmten Bakterienarten bzw. der aus diesen Bakterien gewonnenen morphogenetisch wirksamen Substanzen bildet *Ulva* ihre normale bandförmige oder salatblattähnliche Form aus (Abb. 5). Auch hier ist das Verständnis der Fortpflanzungsbiologie eine Grundvoraussetzung für die weitere

Forschung: Erst wenn es gelingt, im Labor die massenhafte Freisetzung von Keimzellen kontrolliert zu induzieren, können aus ihnen bakterienfreie (axenische) Kulturen von *Ulva* in ausreichender Menge hergestellt werden.

Pflanzen und Mikroorganismen: Schäden ...

Neben ihrer zentralen Funktion bei der Einschränkung des Wasserverlustes bildet die Kutikula, die wie eine dünne Haut die Oberfläche von Pflanzen überzieht, eine Barriere gegen UV-Strahlung, mechanische Verletzungen und schädliche Organismen. Inwieweit die Zusammensetzung der kutikulären Wachskomponenten die Sporenkeimung von *Blumeria graminis* beeinflusst, dem Erreger des Echten Mehltaus bei Getreide und Gräsern, untersucht Ulrich Hildebrandt (Uni Würzburg). Das kutikuläre Wachs ist eine sehr komplexe Mischung aus unterschiedlichen Substanzklassen, die in verschiedenen Kettenlängen vorliegen. Interessanterweise wird die Keimung der Sporen von *B. graminis* durch langkettige Aldehyde im Wachs von Gerste und Weizen induziert. Bei Mutanten, die aufgrund eines fehlenden Enzyms deutlich geringere Mengen an Wachsen und langkettigen Aldehyden aufweisen, ist die Sporenkeimung entsprechend reduziert und die von *B. graminis* befallene Blattfläche geringer.

ABB.: TH. WICHARD; H. KRISP / PUBLIC DOMAIN; K. KRAUSE



Abb. 5: Die Makroalge *Ulva mutabilis* wächst bandförmig oder, wie hier zu sehen, salatblattähnlich – jedoch nur in Anwesenheit bestimmter Bakterien.



Abb. 6: Fruchtkörper des Bärtigen Ritterlings (*Tricholoma vaccinum*) und Querschnitt durch eine mykorrhizierete Kurzwurzel. Der Pilz umgibt die Wurzel mit einem dichten Netz an Hyphen, die zwischen den Wurzelzellen ins Wurzelinnere eindringen und dort den Stoffaustausch ermöglichen.

Abb. 7: Wurzelsystem mit Stickstoff fixierenden Bakterien (Rhizobien) in Wurzelknöllchen. Mithilfe der Entwicklung einfacher und effizienter Inokulationstechnologien und der entsprechenden Ausbildung von Kleinbauern konnte der Ertrag landwirtschaftlich wichtiger Leguminosen in verschiedenen afrikanischen Ländern bereits massiv verbessert werden.

... und Vorteile

Über 95 Prozent der Landpflanzen leben in einer Mykorrhizasymbiose, das heißt, der Pilz liefert der Wurzel Stoffe wie Stickstoff, Phosphor, Magnesium und andere Nährelemente, aber auch Wasser und erhält im Austausch Photosyntheseprodukte. Am Beispiel des Bärtigen Ritterlings (*Tricholoma vaccinum*), der an Fichten als Hauptwirt lebt (Abb. 6), stellt Erika Kothe (Uni Jena) die Signalmoleküle vor, die dabei zwischen Wirt und Pilz ausgetauscht werden. So können die Pilze Pflanzenhormone wie Indol-3-essigsäure produzieren und reagieren auch selbst auf diese Substanz. Gleichzeitig bilden sie volatile Substanzen, die beide Partner beeinflussen. Aber auch Substanzen, die von anderen Mikroorganismen in der Umgebung der Wurzel ausgeschieden werden, haben Einfluss auf die Mykorrhiza, indem sie z. B. die Indol-3-essigsäure-Produktion und damit die Fähigkeit des Mykorrhizapilzes, mit dem Baum zu interagieren, fördern.

In einer anderen, wirtschaftlich sehr bedeutenden Symbiose nehmen Leguminosen wie Erbsen, Klee und Sojabohnen spezielle Bakterien (Rhizobien) in ihre Zellen auf, die Stickstoff aus der Luft in Ammonium umwandeln und dieses der Pflanze zur Verfügung stellen (Abb. 7). Auch hier hat sich eine komplexe „chemische Sprache“ entwickelt, die Martin Parniske (Uni München) erläutert. Das Bakterium *Bradyrhizobium japonicum* reagiert z. B. auf das spezifische Flavonoidmuster der Sojabohne mit der Synthese des sogenannten Nod-Faktors. Dessen genaue Struktur wiederum (verschiedene Seitenketten, die an ein N-Acetylglucosamin-Tetra- bzw. -Pentamer angebracht sind) signalisiert der Pflanze, dass



ein zur Symbiose geeignetes Bakterium in der Nähe ist. Die Erkennung des Nod-Faktors durch entsprechende Rezeptorkomplexe der Wirtspflanze ist zwingend nötig, um in dieser die weiteren Reaktionen auszulösen und so die Infektion mit Rhizobien sowie die Ausbildung von Wurzelknöllchen voranzutreiben.

Die Sprache der Bakterien

Die Kommunikation zwischen Bakterien ist Grundlage bei einer Vielzahl von Phänomenen wie der Bildung von Biofilmen, der Biolumineszenz oder der Produktion von Virulenzfaktoren: Wenn eine bestimmte Zelldichte überschritten wird, kommt es zu einem Umschalten in den Eigenschaften der Population. Bei diesem als „Quorum Sensing“ bezeichneten Phänomen werden von *Vibrio harveyi*, einem gut untersuchten Modellorganismus, aber auch z. B. von *V. cholerae*, dem Erreger der Cholera, bestimmte Signalmoleküle über drei membranverankerte Rezeptoren wahrgenommen. Ihre Informationen werden in einer komplexen Kaskade im Zellinneren kanalisiert. Am Ende der Kaskade steht ein Masterregulator, der nur dann aktiv ist, wenn die Signalmoleküle in ausreichender Menge vorhanden sind, d. h. wenn die Bakterienpopulation eine gewisse Größe erreicht hat. Kirsten Jung (Uni München) stellt aber auch Strategien vor, mit denen Bakterien in die Kommunikation anderer Arten eingreifen und somit in der Konkurrenz um Lebensräume, Nischen, Nährstoffe etc. einen Vorteil für die eigene Art erreichen – möglicherweise ein viel versprechender Ansatz zur Entwicklung neuer antibakterieller Wirkstoffe.

DIE AUTORIN

Dr. Claudia Deigele ist wissenschaftliche Mitarbeiterin des Forums Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

Literatur und WWW

Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), Die Sprache der Moleküle – Chemische Kommunikation in der Natur (≈ Rundgespräche Forum Ökologie 45), Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München 2016, 144 S., ISBN 978-3-89937-214-4, 25 Euro. – Einzelne Beiträge unter www.pfeil-verlag.de und <http://publikationen.badw.de/de/index>