



Wenn Indianer unter Kopfschmerzen litten, verschafften sie sich Linderung, indem sie einen Brei aus Weidenrinde auf ihre Stirn strichen. Heute benutzen wir eine verfeinerte Form dieser Rezeptur. Sie heißt Aspirin, und ihr aktiver Bestandteil wurde nach der Weide, *Salix*, Salicylsäure genannt. Die Geschichte des Aspirins ist bemerkenswert – seit nahezu einem Jahrhundert ist es die erfolgreichste Medizin der Welt. Auch Pflanzen reagieren auf Aspirin. So sollen Schnittblumen länger frisch bleiben, wenn man dem Blumenwasser Aspirin zusetzt. In einem einfachen Versuch läßt sich diese Behauptung überprüfen: Man stellt eine Blume in Leitungswasser und vergleicht sie mit Blumen, die in Wasser mit einer halben, einer, fünf oder zehn aufgelösten Aspirin-tabletten stehen. Mit dieser Bandbreite können die Wirkungen der verschiedenen Aspirinkonzentrationen geprüft werden: einfach die Tage zählen, bis die Blumen die Farbe verlieren und welken!

WIE ASPIRIN BEI PFLANZEN WIRKT

Synthetisch hergestelltes Aspirin aktiviert bei Pflanzen u.a. auch die natürliche Abwehr gegen Mikroorganismen. Auf der Suche nach dem natürlich wirkenden Botenstoff stießen amerikanische Wissenschaftler Ende der 80er Jahre bei Untersuchungen an Tabakpflanzen wieder auf die Salicylsäure: In mit dem Tabakmosaikvirus infizierten Pflanzen stieg die Konzentration der Salicylsäure fast um das Fünffache, noch bevor irgendein Anzeichen einer Infektion entdeckt wurde. Dieser Anstieg wirkte wie ein Alarmsignal und

ähnlichen Schlußfolgerungen. Die dortigen Wissenschaftler identifizierten ebenfalls Salicylsäure als Botenstoff, der in Pilzinfizierten Kürbisgewächsen eine Resistenz hervorruft. Diese Entdeckungen ließen sich unter Umständen auch für die Landwirtschaft nutzen: Infizierte Feldfrüchte könnten mit Aspirin besprüht werden, um ihr Immunsystem zu aktivieren. Wie die Salicylsäure ihre Wirkungen in Pflanzen ausübt, ist noch weitgehend unbekannt. Interessant ist aber, daß Aspirin beim Menschen den Schmerz stillt, indem es schmerzauslösende Hormone (Prostaglandine) abfängt. In Pflanzen gibt es ein eng mit den Prostaglandinen verwandtes

AUFREGENDE CHEMIE – Verteidigungsstrategien im Pflanzenreich

Hormon, die Jasmonsäure. Ein Abkömmling der Jasmonsäure, das Methyljasmonat, löst ebenfalls die Abwehr einer Pflanze gegen Insekten oder Krankheiten aus. Noch ist allerdings nicht geklärt, ob die Salicylsäure in Pflanzen auf gleichem Wege wirkt wie beim Menschen, indem sie die Signale bestimmter Botenstoffe blockiert.

ERFOLGREICHE ZUSAMMENARBEIT

Auf der Suche nach den Wirkmechanismen der verschiedenen Pflanzeninhaltsstoffe haben sich in den letzten Jahren zwei verschiedene Disziplinen erfolgreich gegenseitig befruchtet: die Biochemie und die Ökologie. Die Erkenntnisse der Biochemie haben den Ökologen wertvolle Informationen über die

Chemische Ökologie – eine neue Disziplin

Die Entdeckung, daß Pflanzen über die Luft – in Form flüchtiger Signalstoffe – Information austauschen und bei der Abwehr von Insektenfraß mit einer verstärkten Synthese von Inhaltsstoffen reagieren, die auf Insekten beispielsweise wachstumshemmend wirken, hat unmittelbare Bedeutung für die Weiterentwicklung des Pflanzenschutzes in der Landwirtschaft. Am

Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena

haben sich die Wissenschaftler daher die Entschlüsselung dieser komplexen Signalketten sowie die Identifikation der Gene, die an der Synthese, Speicherung, Erkennung und am Stoffwechsel chemischer Signalmoleküle beteiligt sind, zum Ziel gesetzt. Darüber hinaus erhoffen sie sich neue Erkenntnisse, wie sich durch Evolutionsprozesse die Wechselbeziehungen zwischen den Organismen herausbilden.

A



löste die Produktion spezieller Proteine aus, um den Angriff durch die Viren zu bekämpfen. Damit stand fest, daß Salicylsäure als natürliches Hormon in Pflanzen vorkommt.

Zur gleichen Zeit kam man in den Labors des Pharmaherstellers Ciba-Geigy in Basel zu

Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Tieren geliefert, während ökologische Studien ihrerseits dem Biochemiker zum ersten Mal vernünftige und zufriedenstellende Erklärungen für zumindest einen Teil des enorm vielfältigen Stoffwechsels von Pflanzen eröffnet haben. →



GIFTIG, BITTER, STINKEND – SO SICHERN PFLANZEN IHR ÜBERLEBEN

Vier Fünftel aller bisher bekannten natürlichen Stoffwechselprodukte sind pflanzlichen Ursprungs. Da Pflanzen in der Erde wurzeln und sich nicht fortbewegen können, liegt der Zweck der Synthese komplexer Terpene, Alkaloide und Phenolverbindungen größtenteils in ihrer Verwendung als Abwehrstoffe beim Überlebenskampf der Pflanzen gegen Schädlinge (siehe Tabelle B). Pflanzen müssen sich nicht nur des Angriffs von Mikroben erwehren. Unter den fast 900.000 Insektenarten sind ebenfalls mindestens 300.000 pflanzenfressende Arten. Hinzu kommt eine zwar vergleichsweise bescheidene Zahl von ungefähr 5000 pflanzenfressenden Säugern, die jedoch eine große Biomasse an Pflanzen vertilgen können: So benötigt beispielsweise ein männlicher Elefant täglich 170kg Frischgewicht an Pflanzen.

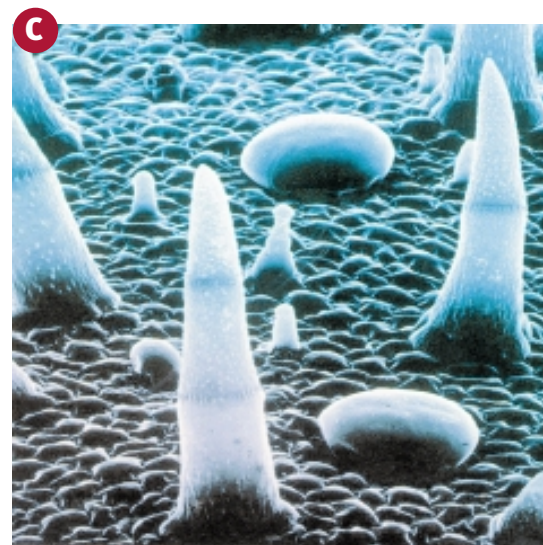
WETTRÜSTEN ZWISCHEN PFLANZEN UND TIEREN

Coevolution nennt man die Triebkraft, die einerseits die Gleichgewichte zwischen pflanzlichen Produzenten und tierischen Konsumenten einstellt, andererseits aber auch dafür sorgt, daß neue Arten entstehen. An-

hand einiger Beispiele läßt sich das Wechselspiel zwischen Anpassung, also **Adaptation**, und Gegenanpassung illustrieren.

Die Verteidigung der Pflanzen beruht teils auf anatomischen, teils auf chemischen Faktoren. Anatomische Abwehrmechanismen sind leicht zu erkennen: eine widerstandsfähige Epidermis, Cuticulaeinlagerungen, Dornen, Stacheln oder Brennhaare. Solche mechanischen Schutzmechanismen werden als **konstitutiv** bezeichnet, da sie bereits in der unverletzten Pflanze vorliegen. Dornen wirken vor allem gegenüber großen Säugern besonders effektiv. Giraffen gelingt es trotzdem, sich durch eine entsprechende Anpassung ihrer Mundwerkzeuge – eine lederartige Lippenregion und eine lange, bewegliche Zunge – von den dornenbewehrten Akazien in der Savanne zu ernähren. Es gibt also nie endgültige Lösungen, sondern immer nur solche, die **ökologische Nischen** schaffen.

Was makroskopisch funktioniert, geht auch im mikroskopischen Bereich, z.B. mit Drüsenhaaren auf der Blattoberfläche (Trichome), die giftige oder klebrige Substanzen absondern (Abbildung C). Der Abwehrstoff in den Drüsenhaaren der Wildkartoffel besteht aus



einem phenolhaltigen Sekret, verbunden mit einem besonderen Enzymsystem. Wenn eine Blattlaus das Drüsenhaar berührt, bricht die Haarspitze ab und das Enzym reagiert mit dem phenolischen Substrat. Es bildet sich ein braunes klebriges Harz. Die Blattlaus klebt fest, kann daher nicht weiterfressen und verhungert schließlich. Diese Abwehr muß recht wirkungsvoll sein, denn diese Wildkartoffel wird praktisch überhaupt nicht von Insekten angegriffen. Pflanzenzüchter haben daher schon in Betracht gezogen, diese Resistenz durch Kreuzung auf die Kulturkartoffel zu übertragen.

Abb.: Gershenzon et al., Analytical Biochemistry 2002;330:238 (1992)

B Pflanzenstoffe – die an Wechselbeziehungen zwischen Pflanzen und Tieren beteiligt sind

Klasse	Verbindungszahl/ca.	Verbreitung	physiologische Wirkung
Stickstoffverbindungen			
Alkaloide	10000	weit verbreitet bei Angiospermen	viele giftig und bitter schmeckend
Amine	100	weit verbreitet bei Angiospermen	viele abstoßend riechend, halluzinogen
Aminosäuren (freie)	400	besonders in Samen von Leguminosen	viele giftig
cyanogene Glykoside	40	vereinzelt, besonders in Früchten und Blättern	giftig
Glucosinolate	80	Brassicaceae	scharf und bitter
Terpenoide			
Monoterpene	1000	weit verbreitet	angenehm duftend
Sesquiterpenlactone	3000	Asteraceae und andere Angiospermen	einige bitter und giftig, auch allergen
Diterpenoide	2000	weit verbreitet	einige giftig
Saponine	600	in über 70 Pflanzenfamilien	hämolyisieren Blutzellen
Limonoide	100	in Rutaceae, Meliaceae, Simaroubaceae	bitter schmeckend
Cucurbitacine	50	Cucurbitaceae	bitter schmeckend und giftig
Cardenolide	150	Apocynaceae, Asclepiadaceae und Scrophulariaceae	giftig und bitter
Carotinoide	600	allgemein in Blättern, oft in Blüten und Früchten	farbig
Phenole			
einfache Phenole	200	allgemein in Blättern	antimikrobiell
Flavonoide	4000	bei Angiospermen, Gymnospermen und Farnen	oft farbig
Chinone	800	weit verbreitet	farbig
andere			
Polyacetylene	650	Asteraceae und Apiaceae	einige giftig

DIE „KLEBSTOFF-FALLE“

Auch die Milchsäfte der Wolfsmilchgewächse (Euphorbiaceen) spielen augenscheinlich eine Rolle bei der Abschreckung von Pflanzenfressern. Denn sobald der Milchsaft mit Luft in Kontakt gerät, beginnt er zu polymerisieren, d.h. es bilden sich lange Molekülketten, die wie ein Klebstoff wirken und die Mundwerkzeuge einer Blattkäferlarve unbrauchbar machen – ein äußerst wirksamer Fraßschutz: 12.000 Pflanzenarten produzieren daher diesen „Klebstoff“. Spezialisten schaffen es jedoch immer wieder, solche Fraßschutz-Barrieren zu durchbrechen. So haben sich bestimmte Blattkäferarten im Verlauf der Evolution in ihrem Verhalten angepaßt. Sie schneiden die Leitungsgefäße der Pflanzen, die Blattadern, entlang der Mittelrippe an. Das führt zu einem punktuellen Austritt des Milchsaftes, und so können die Käfer das Blatt gefahrlos von der Seite auffressen.

Auch der Einsatz von Giften bedeutet für viele Pflanzen keinen absoluten Schutz. Die wilde Tabakart *Nicotiana glauca* setzt beispielsweise das Alkaloid Nikotin als Fraßschutz ein. Bei Befall durch Raupen steigt der

Nikotingehalt über einen Zeitraum von fünf bis zehn Tagen in der gesamten Pflanze auf etwa 220 Prozent an. Mechanische Beschädigungen ohne Verletzung der sekundären Blattnerven lösen eine geringere Reaktion aus (Anstieg um 170 Prozent).

NIKOTIN – NICHT IMMER SCHÄDLICH

Raupen des Amerikanischen Tabakschwärmers *Manduca sexta* (Abbildung A) vermeiden es daher, die sekundären Blattnerven durchzuschneiden. Im Gegensatz zu anderen Insekten, die an dem hochgiftigen Nikotin zugrunde gehen, ist es ihnen gelungen, sich biochemisch auf die toxische Wirtspflanze umzustellen: Sie können sich ungestraft von Tabak ernähren, zum einen weil sie das Nikotin rasch wieder absondern, zum anderen weil ihre Nervenzellmembranen für das Gift undurchlässig sind. Auch Stubenfliegen, obwohl sie bei ihrer Ernährung nicht mit Nikotin in Kontakt kommen, verfügen über eine Methode, es zu entgiften – sie setzen es zu einem wesentlich ungiftigeren Stoff, dem Cotinin um.

Die Synthese von Abwehrstoffen sowie deren ständige Bereitstellung ist für die Pflanze teuer – sie muß die entsprechenden Bausteine herstellen und Energie in Form von Energieträgern (die Moleküle ATP und NADH) investieren. Die Photosynthese sichert ihr zwar einen größeren Vorrat an Vorstufen für Kohlenstoffverbindungen, die Aufnahme von Stickstoff durch die Pflanze dagegen ist begrenzt. Eine Möglichkeit, den Stoffwchelaufwand der Synthese und Speicherung von Abwehrstoffen zu reduzieren, besteht darin, den Stoff nur dann zu produzieren, wenn er tatsächlich gebraucht wird – d.h. als direkte Reaktion auf Tierfraß. In diesem Fall spricht man von einer **induzierten chemischen Abwehr**. Diese Abwehr ist zwar auch nicht kostenlos, aber in vielen Fällen zumindest kostengünstiger.

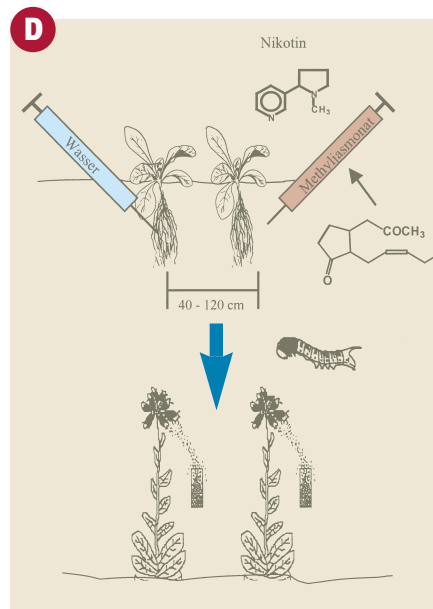
KOSTEN UND NUTZEN – AUCH BEI PFLANZEN EINE STANDORTFRAGE

Die Synthese von Nikotin als Fraßschutz ist ein Beispiel für eine induzierte chemische Abwehr. Im Verteidigungsfall steckt die Tabakpflanze rund 6 Prozent ihres gesamten Stickstoffgehaltes in die Nikotinsynthese! Dieser Stickstoff steht somit für andere Leistungen, wie beispielsweise Samenproduktion, nicht mehr zur Verfügung. Für die Meldung vom fraßgeschädigten Blatt zur Wurzel

ist ein Botenstoff, das bereits erwähnte Pflanzenhormon Jasmonsäure verantwortlich. Versorgt man die Wurzeln einer Tabakpflanze von außen mit Jasmonsäure, löst das auch bei einer völlig unverletzten Pflanze die Nikotinsynthese aus. Dies hat der Ökologe Ian Baldwin vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie bei seinen Freilanduntersuchungen im US-Bundesstaat Utah ausgenutzt. Er wählte mehrere Standorte des dort natürlich vorkommenden Tabaks und ordnete sie drei verschiedenen Kategorien zu: keine, mäßige und massive Fraßgefahr.

WACHSE ODER VERTEIDIGE DICH!

Die Wurzeln eines Teils der Pflanzen aus den drei Testkategorien behandelte Baldwin mit einem chemischen Abkömmling der Jasmonsäure, dem Methyljasmonat; die anderen Pflanzen bekamen zur Kontrolle jeweils reines Wasser gespritzt (Abbildung D). Die ökologischen Auswirkungen der Nikotinabwehr wurden bei der massiv attackierten Pflanzenpopulation besonders deutlich: Innerhalb von zehn Tagen hatte jede dritte Versuchspflanze, deren Wurzeln nur Wasser bekommen hatten, knapp die Hälfte ihres Blattwerks an Fraßfeinde verloren. Dagegen trugen die mit Jasmonsäure behandelten Tabakpflanzen am gleichen Ort nur ein Prozent Fraßschäden davon. Doch ihre Verteidigung kam sie teuer zu stehen – 80 Prozent der Pflanzen konnten keine lebensfähigen Samen ausbilden. Dies muß kein Nachteil sein, denn in einer stark mit Fraßfeinden belasteten Umgebung haben Jungpflanzen ohnehin kaum Überlebenschancen.



Anhand der Pflanzen, die unter dem anderen Extrem heranwuchsen, also keiner nennenswerten Fraßgefahr ausgesetzt waren, demonstrierte Baldwin, wie sehr die induzierte Nikotinsynthese im Stoffwechsel zu Buche schlägt: Die mit Jasmonsäure behandelten Tabakpflanzen dieser Population brachten, verglichen mit den unbehandelten Kontrollpflanzen, 25 Prozent weniger keimfähige Samen hervor. Soviel „kostet“ also die Synthese des Abwehrstoffs Nikotin. Eine induzierte Abwehr lohnt sich vor allem für Pflanzen in einer Umgebung mit mäßigem Feinddruck. Hier produzieren mit Jasmonsäure vorbehandelte Tabakpflanzen elf Prozent mehr keimfähige Samen als die Kontrollpflanzen. Die variable Abwehrstrategie „Wachse oder verteidige Dich!“ ist somit nichts anderes als eine optimierte **Kosten-Nutzen-Rechnung**, die das Überleben der Pflanzen sichert und die man auch als **ökologische Fitness** bezeichnet.

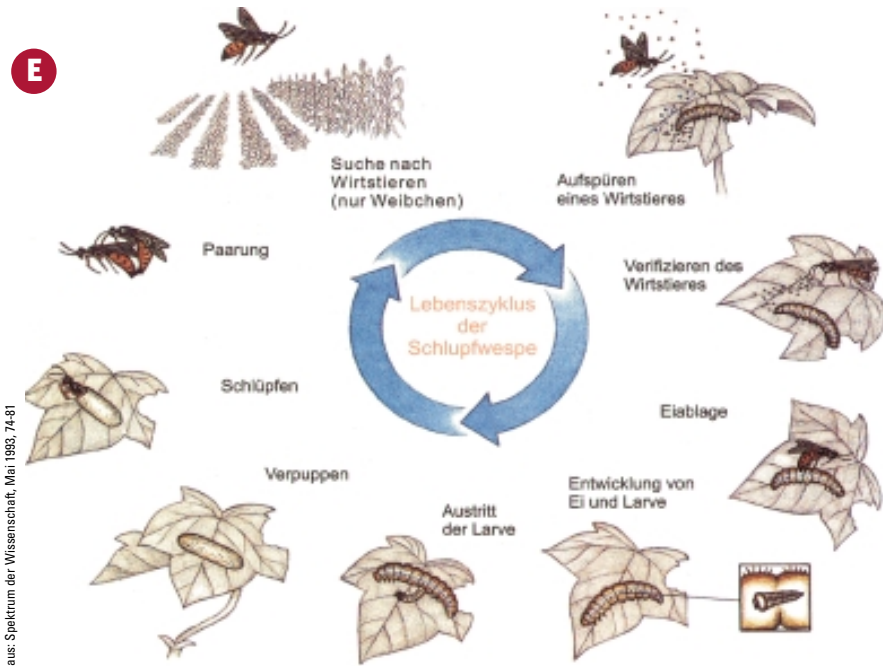
WOZU SICH PFLANZEN PARFÜMIEREN

Der Mensch macht sich schon seit langer Zeit Blütendüfte für die Parfümherstellung zunutze. Die meisten modernen Parfüms sind zwar synthetischen Ursprungs, doch haben natürliche Blütenduftextrakte nach wie vor ihre Bedeutung, weil sie die Wirkung der synthetischen Mixturen steigern. Im Pflanzenreich spielt der Duft einer Blüte eine wichtige Rolle als Lockmittel für bestäubende Insekten. Bienen reagieren vor allem auf Blütendüfte, die wir als wohlriechend empfinden, und viele Bienenblumen wie z.B. das Gartenveilchen duften stark.

In manchen Fällen ist eine einzelne Komponente für einen bestimmten Blütenduft verantwortlich: cis-Jasmon ist wesentlicher Bestandteil des Duftstoffs der Jasminblüten und wurde schon von den Römern zur Parfümherstellung verwendet; er fließt auch in das Parfum Hypre, das man seit dem 14. Jahrhundert kennt, ein. In vielen anderen Fällen sorgt eine Mischung aus verschiedenen, manchmal bis zu 100 Komponenten für den charakteristischen Duft.

EIN „DUFTENDER“ HILFERUF

Im Kampf gegen ihre Fraßfeinde setzen Pflanzen auch Duftsignale frei, um räuberische oder parasitäre Insekten anzulocken. Solche sogenannten **Infomone** (Signalmoleküle für die Kommunikation zwischen den Individuen verschiedener Arten) werden

E

aus: Spektrum der Wissenschaft, Mai 1993, 74-81

➔ als „pflanzlicher Hilferuf“ interpretiert, dienen sie doch Insekten als Wegweiser zu ihrer Nahrung bzw. ihrem Wirt: So legen Schlupfwespen ihre Eier bevorzugt in Schmetterlingsraupen ab. Die frisch geschlüpfte Schlupfwespenlarve frisst die Raupe von innen her auf und tötet sie damit. Um ihren Wirt zu finden, benötigt die Schlupfwespe neben den chemischen Signalen, die von der Raupe ausgehen, zusätzliche Signale von der befallenen Pflanze (Abbildung E).

STECKNADEL IM HEUHAUFEN

In Windkanal-Experimenten stellten amerikanische Wissenschaftler Schlupfwespenweibchen vor die Wahl, zur Duftfahne einer unverletzten oder einer verletzten Pflanze zu fliegen. In den ersten zwei Stunden nach Befall durch die Raupe wurde die verletzte Pflanze nicht meßbar bevorzugt. Doch im weiteren Verlauf gewann die befallene Pflanze an Attraktivität für die Schlupfwespe und wurde deutlich häufiger angefliegen.

Daraus schlossen die Wissenschaftler, daß der Fraßschaden in der Pflanze die Biosynthese von Duftkomponenten ausgelöst haben mußte, die für die Schlupfwespe interessant sind. Die Schlupfwespe nutzt also den Alarmcode der Pflanze, um die sprichwörtliche „Stecknadel im Heuhaufen“ zu finden, nämlich eine winzige Raupe in einem unüberschaubaren Pflanzenfeld – ein Problem, das auf visueller Basis kaum zu lösen wäre. Anhand der Duftwolke kann das anfliegende Schlupfwespenweibchen die befallene Pflanze und damit die Raupe auch aus großer Entfernung aufspüren. Die Pflan-

ze ihrerseits entledigt sich auf diese Art und Weise ihres Freßfeindes, der Raupe.

VORSICHT FRESSFEIND!

Der Duft attackierter Pflanzen scheint sogar in der Lage zu sein, z.B. über Ethylen, Methyljasmonat oder Methylsalicylat benachbarte, gesunde Pflanzen zu alarmieren und vorbeugend in Verteidigungshaltung zu versetzen. Ian Baldwin fand dafür ebenfalls erste, zumindest experimentelle Hinweise: Er brachte einen frisch entblätternen Zweig gemeinsam mit einem unbeschädigten Zweig in einen geschlossenen Behälter. Offensichtlich setzte der entblätternen Trieb Duftmoleküle frei, denn der noch unbeschädigte Trieb entwickelte nun seinerseits chemische Stoffe, mit denen Fraßschädlinge wirksam abgewehrt werden konnten.

In Sellerie oder Petersilie (beide Küchenkräuter gehören zur Familie der Apiaceen) läßt sich, wie Wilhelm Boland und seine Mitarbeiter vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie zeigen konnten, durch Bestimmen mit gasförmigem Methyljasmonat die Biosynthese sogenannter Furanocumarine innerhalb von zwei bis drei Tagen anschalten. Diese werden zu etwa 30% auch an die Blattoberfläche transportiert und schützen so die Pflanze nicht nur im Gewebe, sondern bereits als Kontaktgift gegen anfliegende Insekten. Wie formulierte doch der amerikanische Dichter John Updike so treffend: „*Bäume, so scheint es seit neuestem, kommunizieren und werden ängstlich, wenn die Kettensäge kommt.*“

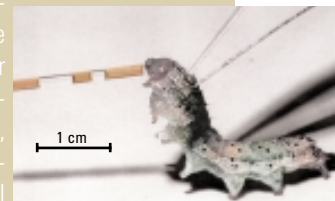
WO SITZT DER „DUFT-SCHALTER“?

Bleibt die Frage, wie die Pflanze einen Fraßschaden erkennen kann? Wilhelm Boland und seine Mitarbeiter haben sich auf „Spurensuche“ begeben – und sind fündig geworden. Bei dem pflanzenparasitischen Pilz *Trichoderma viride* identifizierten sie das Cellulysin, einen Enzymcocktail aus Cellulasen und Endoglucanasen, der die Zellwände von Pflanzen auflöst. Stellt man Limabohnen in eine Nährlösung mit Cellulysin, so werden die Pflanzen in Alarmzustand versetzt und produzieren eine große Zahl von Duftstoffen, darunter das bereits erwähnte cis-Jasmon. Cellulysin ist also ein Signalgeber, der eine Reihe von Veränderungen im Stoffwechsel der Pflanze auslöst. Der Botenstoff Jasmonsäure scheint dabei auf eine noch unbekannte Art und Weise, die Gene anzuschalten, die die Information für den Aufbau neuer Proteine enthalten, aus denen sich das Duftsignal zusammensetzt. Hat die Jasmonsäure einmal als Signal gewirkt, so muß sie wieder unwirksam gemacht werden – d.h. der „Schalter“ wird in die Ausgangsposition zurückgelegt, im anderen Fall bliebe die Signalkette ununterbrochen angeschaltet. Einer dieser Abbaupfade führt dabei offensichtlich zu dem bekannten Blütenduftstoff cis-Jasmon. Ziel der Forscher in den nächsten Jahren ist es, die komplexen Signalketten weiter zu entschlüsseln und die beteiligten Gene zu identifizieren.

Schlagwörter: Coevolution, Adaptation, ökologische Nische, konstitutive Abwehr, induzierte Abwehr, Kosten-Nutzen-Analyse, ökologische Fitness, Infomone
Lesempfehlung: Jeffrey B. Harborne, *Ökologische Biochemie*, Spektrum Akademischer Verlag 1995

Mit dem Gaschromatographen auf Spurensuche

Die Induktion, also das Auslösen einer Abwehrreaktion bei Pflanzen erfolgt über Inhaltsstoffe, die sich im Speichel des Freßfeindes, hier der Amerikanischen Tabakeule *Heliothis virescens*, befinden. Zur Analyse dieser Inhaltsstoffe im Labor wird die Raupe mittels einer Pinzette durch leichten Druck gereizt und der dabei abgegebene Flüssigkeitstropfen mit einer Glaskapillare aufgenommen. Bei der heute zur Verfügung stehenden hochsensiblen Analysetechnik genügen für die Untersuchung bekannter Substanzen bereits kleinste Mengen des Sekrets, 5 µl oder anders ausgedrückt fünf Tausendstel Milliliter. Lediglich bei der Suche nach neuen, noch unbekanntem Substanzen muß etwas mehr Flüssigkeit gesammelt werden – 0,5 bis 1 ml.



Text: Dr. Christina Beck | Gestaltung: HAAK & NAKAT, München | Weitere Exemplare können Sie kostenlos anfordern: Max-Planck-Gesellschaft, Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Hofgartenstraße 8, 80539 München