

Natur und Agrikultur

Silvia Dorn (Zürich)

Zusammenfassung

In prähistorischer Zeit bot die Natur der spärlichen Bevölkerung mit nomadisierenden Jägern und Sammlern eine Lebensbasis, doch erst mit der bahnbrechenden Entwicklung des Ackerbaus konnten die Menschen sesshaft werden. Dank der Agrikultur, also der Landwirtschaft und der damit verbundenen verlässlicheren Nahrungsgrundlage, bildeten sich Städte und die Zivilisation. Heute ist die Weltbevölkerung auf 7 Milliarden Menschen angewachsen. Damit steht jedem Menschen im Durchschnitt nur noch knapp die halbe Fläche eines Fussballfelds zur Verfügung, um alle Nahrungsmittel anzubauen. Obwohl die verfügbare Fläche pro Mensch noch 1960 mehr als doppelt so gross war, hungert heute ein wesentlich kleinerer Prozentsatz der Menschheit als damals, und dies ist der sich stets verbessernden Agrikultur zu verdanken. Beispiele aus dem Fachgebiet der Insekten-Pflanzen-Beziehungen verdeutlichen die Fortschritte in Forschung und Praxis: Erkenntnisse über das Flugverhalten von Schadinsekten verbessern den Einsatz moderner, umweltfreundlicher Bekämpfungsmethoden. Eine Doppelstrategie mit Nutzinsekten und neuen Pflanzensorten ermöglicht es Kleinbauern in den Tropen, ihre Ernte sicher zu lagern. Die Förderung einer reichen Bestäuberfauna in Agrarlandschaften belegt, dass Agrikultur im besten Sinn gleichzeitig Nutzung und Bewahrung natürlicher Ressourcen ermöglichen kann.

Dieser Artikel basiert auf der Abschiedsvorlesung von Silvia Dorn vom 25. März 2013 an der ETH Zürich.

Nature and agriculture

In prehistoric times, nature provided a suitable basis for life to the sparse population consisting of hunters and gatherers, but it was the ground-breaking development of agriculture which allowed people to become sedentary. Thanks to agriculture cities and the civilisation evolved. By today, the world population grew to 7 billion people. On the average, each person has only nearly half the area of a soccer field available to cultivate all food products. Although back in 1960 the available area per person was over twice as big, a much lower percentage of mankind suffers hunger today. This favourable development is due to a continuously improving agriculture. Examples from insect-plant-interactions illustrate the progress achieved: Novel findings on flight behaviour of pest insects lead to substantial improvements of modern, environmentally sound pest management tactics. A combined strategy with beneficial insects and new plant cultivars enables now small-scale farmers in the tropics to safely store their harvested commodities. Enhancement of a rich pollinator fauna in agricultural landscapes underlines that agriculture at its best allows simultaneous use and preservation of natural resources.

This article is based on the farewell lecture by Silvia Dorn presented on March 25, 2013, at ETH Zurich.

Schlagwörter: Insekten-Pflanzen-Beziehungen – Flugverhalten – Chemische Ökologie – Biologische Bekämpfung – Biodiversität – Fruchtwickler – Schlupfwespen – Wildbienen
Keywords: insect-plant-interactions – flight behaviour – chemical ecology – biological control – biodiversity – moths – parasitoids – wild bees

1 VON DER NATUR ZUR AGRIKULTUR

Am Anfang war die Natur. Sie bedeckte das Land als urwüchsige Wildnis, und Wildtiere besiedelten die weiten Lebensräume. Seit zehntausenden von Jahren gehört auch der Mensch zur Natur, er wurde fester Bestandteil der Diversität. Die Menschen nutzten die Natur vorerst durch Jagen und Sammeln, und die verfügbaren Territorien dazu waren riesig. Nach heutigen Schätzungen beherbergte die Erde zur Jäger- und Sammlerzeit lediglich maximal fünf bis zehn Millionen Menschen (www.berlin-institut.org). Konkret würde dies bedeuten, dass sich die Bevölkerung eines heutigen grösseren Dorfs zur Nahrungssuche auf die gesamte Fläche der Schweiz verteilen könnte. Damit wird klar: Die Wildnis bot eine Lebensbasis, wenn auch nur für eine spärliche Bevölkerungsdichte.

Ein grundlegender Wandel setzte etwa vor 10'000 Jahren mit der bahnbrechenden Entwicklung des Ackerbaus ein. Keimzellen der Agrikultur, also der Landwirtschaft, entstanden an drei verschiedenen Orten auf der Erde: im östlichen Mittelmeerraum, in Mittelamerika und in Südostasien. Das Gezüchtete, das Kultivierte setzte sich erfolgreich gegen das Ursprüngliche, Wilde durch. Die Agrikultur führte zu einer verlässlicheren Nahrungsgrundlage, die Menschen erlaubte, sich sesshaft niederzulassen. Mit der Agrikultur entstanden grössere Siedlungen, Städte und die Zivilisation (www.berlin-institut.org).

Längst könnten wir nicht mehr vom Jagen und Sammeln leben. Bei der heutigen Weltbevölkerung von 7 Milliarden Menschen steht jedem und jeder von uns im Durchschnitt nur noch knapp die halbe Fläche eines Fussballfelds zur Verfügung, um alle Nahrungsmittel anzubauen. Noch 1960 war die entsprechende Fläche pro Mensch mehr als doppelt so gross (4500 m² gegenüber 2000 m² pro Mensch und Jahr; www.faostat.fao.org). Trotzdem hungern die meisten Menschen nicht, ja, der Prozentsatz der global Hungernen halbierte sich in der gleichen Zeitspanne, also seit den 1960er Jahren, von über 26 auf rund 13% (www.welthungerhilfe.de). Diese Entwicklung verdanken wir einer sich stets verbessernden Agrikultur.

2 ZIEL: NACHHALTIGE AGRARÖKOSYSTEME

Das mit diesem Erfolg erreichte Etappenziel ermutigt uns, auch die künftigen Herausforderungen entschieden anzugehen: die Weltbevölkerung wächst weiter, die Landfläche jedoch nicht. Die Klimaveränderung schreitet fort, der Hunger jedoch soll weiter abnehmen. Die Globalisierung bringt

invasive Schädlinge ins Land, der Ertrag unserer Kulturpflanzen soll jedoch erhalten bleiben. Und bei all diesen Ansprüchen an die Nutzung möchten wir die natürlichen Ressourcen gleichzeitig bewahren. Meine Vision deckt sich mit dem Brundtland Report, der nachhaltige Entwicklung treffend so formuliert: Nachhaltige Entwicklung bedeutet *«die Bedürfnisse der Gegenwart abzudecken, ohne die Bedürfnisse künftiger Generationen zu gefährden»* (<http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>), d.h., natürliche Ressourcen gleichzeitig zu nutzen und zu bewahren. Doch welchen Zugang sollen wir wählen? Diese Herausforderung wird hier aus der Perspektive der Entomologie mit Schwerpunkt auf Insekten-Pflanzen-Beziehungen diskutiert und erläutert.

Eines ist klar: Der Weg zurück zur Natur ist keine Lösung. Wir erkennen immer besser, wie die Natur die Interaktionen zwischen Insekten und Nahrungspflanzen reguliert, nämlich längerfristig und oft grossräumig.

Beispielhaft ist die natürliche Regulierung der Miniermotte, welche Apfelbäume befällt. Stark befallene Bäume lassen die Blätter verfrüht fallen, eine natürliche Abwehrreaktion des Baums. Fast ohne Blätter produziert der Baum jedoch kaum Früchte, und noch im Folgejahr bleibt der Ertrag gering (MAIER 1983; DORN 1993). Wenn die Pflanze das Schadinsekt aushungert, mit dieser Abwehr aber auch den Ertrag drastisch reduziert, hungern schliesslich auch die Menschen. Daraus wird klar: Wenn Schadinsekten mit uns um die Nahrung konkurrieren, müssen wir lenkend eingreifen, um unsere Ernährung aus Agrarökosystemen verlässlich sicherzustellen. Eingreifen, aber wie?

Ein Blick zurück in die oft romantisierte *«gute alte Zeit»* vor der Einführung der synthetischen Insektizide erweist sich nach Sichtung belegter Befunde ebenfalls nicht als zukunftsweisend. Wohin wir auch schauen, auf die damalige Schädlingsbekämpfung mit Naturstoffen oder mit räuberischen Insekten, der Fokus blieb eng beschränkt auf das zu bekämpfende Schadinsekt. Die Pflanze selbst galt als passiver Organismus. Nebenwirkungen der Bekämpfung blieben ausgeklammert. Kritisch äusserte sich im Jahr 1938 der Schriftsteller Friedrich Glauser im Roman *«Der Chinese»*: *«Die Mittel, die zur Schädlingsbekämpfung verwendet werden, sind allesamt giftig. Gegen Läuse braucht man Nikotin, und zur Raupenvernichtung Arsenpräparate»* (GLAUSER, 1938). Das Spritzen dieser Naturstoffe war in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine international gebräuchliche Massnahme zur Ertragssicherung. Zuvor, vor dem 20. Jahrhundert, gab es vielfach Jahre mit Totalausfällen einer Ernte, was zu Hungersnöten führte.

Vor diesem Hintergrund können wir nachvollziehen, dass in Wissenschaft und Praxis schon das bloss Abtöten der Schadinsekten als Problemlösung galt.

Erst in den letzten Jahrzehnten entwickelte sich ein umfassenderes Problemverständnis. Es bezieht eine zunehmende Zahl von Einflussgrössen mit ein: Betrachtet wird nicht mehr bloss allein das Schadinsekt als zu bekämpfende Art, sondern auch sein Verhalten, seine Wechselbeziehung mit der Kulturpflanze. In den Fokus rückt auch die Reaktion dieser Beziehung auf Umwelteinflüsse (Abb. 1A). Dazu kommen die Interaktionen von befallener Pflanze mit natürlichen Gegenspielern. Sie umfassen neben den räuberischen Arten wie Marienkäfer auch die oft winzig kleinen parasitischen Schlupfwespen, deren Potenzial als Gegenspieler der Schadinsekten zunehmend erkannt und gewürdigt wird (Abb. 1B). Auf einem entsprechend ausgeweiteten Verständnis kann eine umweltfreundliche, nachhaltigere Schädlingsbekämpfung aufgebaut werden. Zunehmend rückt das gesamte Agrarökosystem ins Zentrum, samt Begleitflora und Bestäubern, zu denen auch unsere artenreichen Wildbienen gehören (Abb. 1C).

Zu all diesen Themenkreisen trug meine ETH-Forschungsgruppe in den letzten 20 Jahren mit innovativen Ansätzen und Arbeiten bei. Die nun folgenden Einblicke in diese Arbeiten sollen gleichzeitig wichtige Perspektiven für die Zukunft aufzeigen.

3 INSEKTENFLUG UND SCHÄDLINGS-BEKÄMPFUNG

Bei meinem Amtsantritt an der ETH Anfang der 1990er Jahre war Forschung über Schadinsekten fest in Männerhand. Aktuell waren Untersuchungen über das Verhalten

von männlichen Insekten im Zusammenhang mit der Begattung.

3.1 Flug der Falterweibchen

Das Verhalten der Weibchen auf der Suche nach Lebensräumen und Nahrung für ihre Nachkommen blieb dagegen weitgehend im Dunkeln. Bezeichnend war die Aussage eines Kollegen: «Männliche Falter fliegen zur Begattung aus, und die Weibchen sitzen ihr Leben lang auf der Pflanze und legen Eier.» Ich überlegte mir: Und wozu haben die Weibchen dann Flügel? Kenntnisse zum Flugverhalten der Schadinsekten wären gerade bei verschiedenen neueren, umweltfreundlichen Bekämpfungsmethoden vonnöten. So setzt beispielsweise ein erfolgreicher Einsatz der Pheromon-Verwirrungstechnik, welche die Begattung unterbindet, zwingend voraus, dass keine bereits befruchteten Weibchen ins behandelte Gebiet einfliegen, wo sie beachtlichen Schaden anrichten könnten. Unsere Frage lautete: Wie hoch ist die Flugkapazität der Weibchen im Vergleich zu jener der Männchen, welche dank Pheromonfallen in manchen Fällen bekannt ist?

Wir bauten im Labor eine Computer-verbundene Flugapparatur und untersuchten die Flugkapazität unterschiedlicher Fruchtwicklerarten.

Für den Apfelwickler, den globalen Primär-Schädling vieler Obstarten, fanden wir statistisch gesichert: Das Flugvermögen der Weibchen steht jenem der Männchen in keiner Weise nach. Es bleibt selbst kurz nach der Befruchtung unverändert hoch. Damit besteht ein Einflug-Risiko, denn befruchtete Weibchen könnten aus einer Distanz von mehreren hundert Metern in die mit Verwirrungstechnik behandelte Anlage einfliegen (SCHUMACHER et al., 1997; DORN et al., 1999). Ein verlässlicher Schutz der Früchte vor Apfelwicklerschaden lässt sich jedoch sicherstellen mit



Abb. 1. Insekten-Pflanzen-Beziehungen: (A) Fruchtwicklerweibchen und geschädigte Frucht. (B) Schlupfwespe auf der zu schützenden Bohne. (C) Wildbiene als Bestäuberin von Blütenpflanzen.

Fig. 1. Insect-plant relationships: (A) Female fruit moth and damaged fruit. (B) Parasitoid wasp on the bean to be protected. (C) Wild bee as a pollinator of flowering plants.

der Verwirrungstechnik im Verbund mit einer reduzierten Anzahl von Behandlungen mit biologischen oder synthetischen Mitteln.

3.2 Mobilität schwächt Nachkommenzahl

Anfangs der 2000er Jahre gewann unsere Arbeit zur Mobilität der Schadinsekten das besondere Interesse von FAO (der Ernährungs- und Agrikultur-Organisation der UNO) und ihrer Tochterorganisation IAEA. Sie luden mich ein, zur Wirkungsverbesserung der Sterilen Insektentechnik beizutragen, einer weiteren nachhaltigen Bekämpfungsmethode, die sie gerade auch in Entwicklungsländern stark fördern. Diese Technik funktioniert so: Schadinsekten werden in Massen angezchtet, sterilisiert und im Feld freigelassen, wo sie sich mit Wildinsekten paaren sollten, ohne lebensfähige Nachkommen zu erzeugen (BLOEM et al., 2006). Eine hervorragende Idee, doch leider blieb der Erfolg in der Fruchtwicklerbekämpfung hinter den Erwartungen zurück, und es war unklar, weshalb. Ich stellte die Frage: Könnte es sein, dass die angezchteten und sterilisierten Insekten in ihrer Mobilität beeinträchtigt sind, dass sie eine geringere Mobilität aufweisen als die Wildinsekten?

Mittels Computer-verbundener Flugapparatur entdeckten wir, dass die Mobilität der Individuen innerhalb einer Apfelwickler-Population stark variabel ist. Es gibt mobile Falter, die sich ausdauernd bewegen, und es gibt jene, die nach kurzer Bewegungsdauer aufgeben. Wir verpaarten einerseits die extrem mobilen untereinander und andererseits die extrem sessilen. So erreichten wir über wenige Generationen hinweg eine mehr mobile und eine mehr sessile Linie. Dies belegt, dass der Mobilitätsgrad vererbbar ist (KEIL et al., 2001). Mobilität bringt allerdings Fitnesskosten mit sich, wie unsere weiteren Experimente zeigten. Mobil zu sein bedeutet weniger Nachkommen zu haben. Umgekehrt haben die sessilen Falter eine grosse Nachkommenschaft, sie leiten ihre Ressourcen in die Reproduktion (GU et al., 2006). In Massenzuchten wird der sessile Typ daher rasch vorwiegen, der im Feld dann kaum mehr fliegen will.

Meine Empfehlung war, die Massenzucht für die Sterile Insektentechnik regelmässig mit mobilen Insekten vom Feld aufzufrischen. Um negative Auswirkungen der Sterilisation auf die Mobilität, die wir ebenfalls nachwiesen (BLOEM et al., 2006), abzupuffern, empfahl ich zudem eine Anzucht durch simulierte Winterbedingungen, was die Insekten robuster macht. Diese Empfehlung verbessert die

Sterile Insektentechnik massgeblich, die zur Zeit auf vier Kontinenten angewendet oder entwickelt wird.

Was wir lernten über das Flugverhalten von Schadinsekten ist also von grosser Bedeutung für zukunftsweisende Bekämpfungsstrategien. Verhaltensweisen der Falter brauchte man vor 100 Jahren beim Einsatz der hochtoxischen Arsenpräparate nicht zu kennen; diese Biozide töteten einfach die fressenden Raupen samt manchen Nicht-Ziel-Organismen ab. Die Folgerung ist: Wenn wir eine hochstehende, umweltfreundliche Agrikultur anstreben, müssen wir die grundlegenden natürlichen Prozesse verstehen. Solche Grundlagenforschung in der Agrikultur kann durchaus anwendungsinspiriert sein, wie das folgende Beispiel zeigt.

3.3 Mit Pflanzenduftstoffen Weibchen anlocken

Ein gutes Überwachungssystem gehört wesentlich zu einer nachhaltigen Schädlingsbekämpfung, gerade auch für invasive, also eingeschleppte, Schadinsekten. Es soll anzeigen, ob und wann eine Intervention erforderlich ist. Heute muss man sich weitgehend auf eine Überwachung der Männchen mit Pheromonfallen verlassen. Viel sinnvoller wäre jedoch eine Überwachung der Weibchen, da sie entscheiden, wo sie die Eier ablegen, wo also Schaden entstehen könnte. Wonach orientieren sich die weiblichen Fruchtwickler im Flug, der bei schwachen Sichtverhältnissen, nämlich in der Abenddämmerung, stattfindet? Wir vermuteten, dass sie sich leiten lassen von den Duftstoffen geeigneter Nahrungspflanzen für ihre Nachkommen.

Wir testeten diese Hypothese an einem mit dem Apfelwickler verwandten invasiven Schadinsekt, der «Oriental Fruit Moth». Wie der Name – übersetzt orientalischer Fruchtwickler – andeutet, ist diese Art heimisch im Osten. Tatsächlich wiesen wir einen Ursprung in Asien nach, wo seine Populationen gemäss unserer Studie mit molekularen Markern die grösste genetische Vielfalt aufweisen (KIRK et al., 2013). Dieser Fruchtwickler befällt vorzugsweise Pfirsich und wird daher auch Pfirsichwickler genannt. Von Asien wurde er verschleppt nach Australien und dann in die weiter entfernten Fruchtanbauggebiete. In Südeuropa fand man ihn erstmals in den 1920er Jahren. Meine italienischen Kollegen hatten beobachtet, dass dieses Schadinsekt, das mehrere Generationen pro Jahr macht, insbesondere nach der Pfirsichernte auf Birnen und Äpfel übergeht und damit auch nördlich der Alpen eine Bedrohung werden könnte. Höchste Zeit also, das spärliche Wissen über diesen hochinvasiven Falter zu erweitern.

In einem ersten Schritt wiesen wir experimentell nach, dass weibliche Falter von Pfirsichbaum-Duft angezogen werden. Darauf sammelten wir die Duftstoffe im Luftraum über dem Baum mit adsorbierendem Material und brachten sie zur Analyse ins Labor. Wir identifizierten rund zwanzig Verbindungen als Inhaltsstoffe, also ein recht komplexes Duftbouquet (NATALE et al., 2003). Unsere Hypothese war: Dieses komplexe Gemisch könnte für die Weibchen auch redundante Informationen enthalten. Das Weibchen braucht wohl nicht alle 20 Verbindungen, um zu reagieren. Schrittweise vereinfachten wir das Gemisch, wobei wir stets überprüften, dass die verbleibende Komposition die Weibchen weiterhin anzog (PIÑERO & DORN, 2007).

Schliesslich gelangten wir zu einem Gemisch aus fünf Verbindungen, das sich nicht mehr weiter vereinfachen liess ohne vollständigen Wirkungsverlust. Es war ebenso attraktiv wie das naturidentische Gemisch. Es enthielt drei sogenannte «Green leaf volatiles» (Derivate von C6 Alkenen) und zwei Aromaten, von denen Benzonitril nur in geringen Mengen vorkam. Liessen wir jedoch diesen winzigen Bestandteil (B), der für sich alleine wirkungslos war, fallen und testeten nur das verbleibende Gemisch (G) aus vier Verbindungen, ging die ganze Anziehungskraft verloren. Wenn wir aber die beiden Komponenten G und B, die für sich allein wirkungslos waren, wieder zusammenfügten, resultierte ein für die Weibchen hoch anziehendes Duftgemisch. Ein solcher Synergismus – inaktiv plus inaktiv gibt hochaktiv – war in diesem Zusammenhang völlig neuartig. Dieser Synergismus wurde mit neurophysiologischen Befunden weiter erhärtet (PIÑERO et al., 2008). Damit waren wir dem Verstehen eines natürlichen Prozesses ein grosses Stück näher gerückt. Wir hatten am Beispiel eines invasiven Fruchtwicklers aufgeklärt, wie sich die Weibchen an Pflanzenduftstoffen orientieren können. Ihr Verhalten ist äusserst Energie-effizient, denn sie reagieren erst, wenn zwei bestimmte Duftstoff-Komponenten gemeinsam vorliegen. Wir nehmen an, dass die beiden Komponenten im Verbund einen guten Lebensraum für die Nachkommenschaft signalisieren.

4 NATÜRLICHE GEGENSPIELER BEGÜNSTIGEN

Ein Schädlingsbefall kann in manchen Fällen durch natürliche Gegenspieler wie parasitische Schlupfwespen wirkungsvoll begrenzt werden. In den letzten Jahren zeigten wir mehrfach auf, wie wichtig es ist, sich stets vor Augen zu halten, dass Agrarökosysteme primär von Menschen komponierte Systeme sind. Erfolgsversprechend sind oft

Strategien, welche die richtigen Organismen zielgerichtet und wirkungsvoll zusammenführen.

Dies soll anhand eines anwendungsorientierten Projekts mit Entwicklungsländern verdeutlicht werden, das im Rahmen des von mir mitgegründeten und mitgeleiteten ETH Zentrums für Internationale Landwirtschaft verwirklicht wurde.

4.1 Nachernteschutz in Entwicklungsländern

Bis zur Ernte werden viele Ressourcen investiert, doch was geschieht danach? Nach der Ernte gehen weltweit erhebliche Anteile des Ertrags verloren, in den Tropen insbesondere auch durch Insektenbefall (FAO, 2011). Kleinbauern in Lateinamerika und Afrika sagten mir wiederholt, nach jeder Ernte könnten sie beobachten, dass Käfer ihre gelagerten Trockenbohnen zerstörten. Ohne Schutzmassnahmen kommt es innert weniger Wochen zum Totalverlust. Deshalb verkaufen die Kleinbauern ihre Bohnen gleich nach der Ernte, doch dann liegen die Marktpreise tief. Die Bauern verzichten sogar auf das Lagern von Bohnen zum Eigengebrauch als Nahrungsmittel oder als Saatgut. Da Bohnen und verwandte Trockenleguminosen das Fleisch der Armen im Tropengürtel sind, haben solche Verluste gravierende Konsequenzen: Armut, Hunger und Mangelernährung. Dringend erwünscht wäre also ein für Kleinbauernbetriebe geeigneter Vorratsschutz.

Ich diskutierte das Problem mit Kollegen im Rahmen eines europäischen Programms. Sie empfahlen mir, diesen Bauern zu raten, für eine bessere Hygiene in ihren Vorratsräumen zu sorgen. Das war nicht, was wir taten; einfach rasch eine Lösung vorzuschieben ohne das Problem wirklich verstanden zu haben führt allzu oft ins Leere. Wir wollten wissen, woher genau die Infektion stammt. Unser Befund nach der Entnahme zahlreicher Proben in Kolumbien war, dass bereits bei der Ernte 90% der Proben befallen waren (SCHMALE et al. 2002). Eine verbesserte Hygiene in den Vorratsräumen hätte dieses Problem eindeutig nicht gelöst. Der Speisebohnenkäfer ist als Larve im Inneren der Bohne versteckt und für die Bauern damit zum Zeitpunkt der Einlagerung noch unsichtbar. Erst ein paar Wochen später, im Lager, schlüpfen dann die ausgewachsenen Käfer. Damit hatten wir das Problem identifiziert und erkannten gleichzeitig den Ansatzpunkt zur Lösung: Wir müssen das Ausschlüpfen der ausgewachsenen Käfer verhindern, indem wir die Larven bekämpfen. Eine sinnvolle Strategie schien uns, regional verfügbare natürliche Ressourcen zu nutzen.

4.2 Einheimische Schlupfwespe und neue Pflanzensorten

In einem kolumbianischen Bohnengeschäft fand unser Team eine einheimische Schlupfwespenart, *Dinarmus basalis*. Diese Schlupfwespe legt ihre Eier auf die in den Bohnen versteckten Käferlarven, die anschliessend absterben. In aufwendiger Arbeit erprobten wir unterschiedliche Einsatzvarianten und führten schliesslich bei kolumbianischen Kleinbauern Feldversuche durch. Durch Schlupfwespeninsatz gelang uns bei mässigem Befall die rasche und komplette Ausrottung des Käfers. Bei starkem Befall wurde die Käferpopulation innert 16 Wochen um 90% reduziert (SCHMALE et al., 2007). Wir waren beeindruckt von diesem Ergebnis. Dies ist eine beachtliche Wirkung der Schlupfwespe, doch war eine weitere Wirkungssteigerung erwünscht. Die Kleinbauern sollten ihre Ernte bei jedem Befallsdruck sicher lagern können.

Unser Partner CIAT (das Centro Internacional de Agricultura Tropical mit Hauptsitz in Kolumbien) hatte neue Bohnensorten gezüchtet durch Einkreuzung des natürlichen Resistenzproteins Arcelin aus mexikanischen Wildbohnen. Diese neuen Sorten waren gegenüber dem mexikanischen Bohnenkäfer resistent, jedoch – zur Enttäuschung von CIAT – nicht gegen den global vorkommenden Speisebohnenkäfer (CARDONA & KORNEGAY, 1999). Arcelin erwies sich als harmlos für Menschen und ist gemäss unseren Ergebnissen auch neutral für die Lebensmittelverarbeitung (VELTEN et al., 2008). Wir entwickelten Hypothesen, wie die neuen Bohnensorten mit Arcelin zum erwünschten Fortschritt im Vorratsschutz bei Kleinbauern beitragen könnten.

Schliesslich erzielten wir eine weitere markante Befallsreduktion an Speisebohnenkäfern dank einer Doppelstrategie mit Schlupfwespe und Arcelin-angereicherten Bohnensorten. Die erwünschte Wirkungsstärke wurde mit der Kombination erreicht. Wir deckten auch die Erfolgsmechanismen auf: Die neuen Bohnensorten verzögern die Entwicklung der Speisebohnen-Käferlarven markant. Der Schlupfwespe bleibt damit eine grössere Zeitspanne, um mehr Käferlarven anzugreifen. Und dann sind dem Schlupfwespenweibchen die nur langsam gewachsenen Käferlarven zu klein, als dass es seine wertvollen Eier darauf ablegen möchte. Also saugt es die Käferlarven kurzentschlossen aus und beschleunigt dadurch das Austilgen der Schädlingspopulation erheblich (VELTEN et al., 2007). Unser Partner CIAT begann bereits mit der Umsetzung der neuen Erkenntnisse in die Praxis.

Ein besserer Nachernteschutz zugunsten von Kleinbauern in den Tropen ist damit in die Wege geleitet. Die positive Interaktion zwischen den eingesetzten natürlichen Ressourcen erwies sich als Schlüssel zum Erfolg. Ähnliche Wirkungsverstärkungen fanden wir mittlerweile auch in weiteren Systemen. Kulturpflanzendiversität im Verbund mit passenden weiteren Massnahmen ist eine wichtige Grundlage für nachhaltige Agrarökosysteme, und in dieser Richtung liegen noch viele ungenutzte Möglichkeiten.

5 BIODIVERSITÄT IN AGRARLANDSCHAFTEN

Vielfach wurde nun Diversität auf verschiedenen Ebenen angesprochen. Der Aspekt der Biodiversität im Sinne von Vielfalt an Arten soll anhand von Bestäubern erläutert werden.

Zahlreiche Wildbienenarten bestäuben unsere Wildpflanzen, und sie tragen auch zur Bestäubung der Kulturpflanzen bei. Wenn wir heute die Landwirtschaft in der Schweiz aufgäben, wäre das fruchtbare Land bald überwachsen von Wald, und wir verlören einen Grossteil unseres Wildbienenbestands. Die Agrikultur erst ermöglicht die heutige Biodiversität. Agrarlandschaften bieten daher grosse Chancen für die Biodiversität, vorausgesetzt, wir kennen und respektieren die Ansprüche der zu bewahrenden Arten. In der hochrangigen Fachzeitschrift «Ecology Letters» postulierte eine amerikanische Kollegin folgendes: «Landwirtschaft wirkt sich positiv auf Wildbienen aus, wenn Agrarlandschaften die Vielfalt der Lebensräume erhöhen und zwar innerhalb des Suchbereichs der Bienen.» (KREMEN et al., 2007). Doch wie gross ist dieser Suchbereich genau?

Erneut ist das räumliche Verhalten einer Insektengruppe angesprochen, und da wir hier auf einem beachtlichen Erfahrungsschatz aufbauen konnten, stiegen wir vor gut fünf Jahren in das Grossprojekt CCES-ENHANCE ein, das sich für erhöhte Nachhaltigkeit auf Ökosystemebene einsetzen wollte. Innerhalb des von mir geleiteten Forschungsbereichs beschäftigte sich meine Gruppe mit Fragen rund um Wildbienen.

Wildbienen leben im Gegensatz zu Honigbienen nicht in Kolonien, sondern jedes Weibchen sorgt allein für seine Nachkommen. Es benötigt zwei Hauptressourcen: einen geeigneten Nistplatz, beispielsweise Totholz, und geeignete Blütenpflanzen als Pollenquelle zur Aufzucht seiner Nachkommen.

Manche Arten sind hoch spezialisiert, indem sie oft nur eine einzige Pflanzengattung akzeptieren (SEDIVY et al.,

2008). Das Weibchen fliegt vom Nest zum Blütenpflanzenbestand, sammelt Pollen, bringt sie zurück zum Nest, und fliegt dutzende Male hin und her. Unsere Forschungsfrage war: Wie weit fliegen Wildbienen maximal, und was sind die Konsequenzen für die Landnutzung? Voraussagen aus der Literatur liessen vermuten, dass kleine Bienenarten etwa 150 m und grosse etwa 600 m weit fliegen, doch beruhten diese Angaben nicht auf direkten Messmethoden (GATHMANN & TSCHARNTKE, 2002). Wir wollten eine neuartige, direkte experimentelle Methode entwickeln.

Die Leitidee war: Ein blühender ökologischer Ausgleichstreifen kann für Bienen eine reichhaltige Pollenquelle darstellen, doch wo soll er liegen in Bezug zu anderen Landschaftsstrukturen wie beispielsweise einer Hecke? Wir überlegten: Im Prinzip könnten wir den blühenden Pflanzenbestand einfach über die Landschaft verschieben, um so die maximale Suchdistanz der Bienen zu ermitteln. Allerdings bräuchten wir dafür eine ganze Landschaft, offen, weiträumig und möglichst monoton. Dies stellte uns in der kleinräumig strukturierten Schweiz vor einige Probleme.

Fündig wurden wir schliesslich in einer Ackerbau-Region in der Solothurner Aare-Ebene. Sämtliche Betriebsleiter der Gegend unterstützten unser Vorhaben einhellig, und sie hielten für uns ihre Feldränder gegen ein kleines Entgelt von allen blühenden Pflanzen frei. Die einzigen Pollenquellen waren somit die von uns ins System gebrachten beweglichen Blütenpflanzen. Im folgenden Beispiel war dies eine *Allium*- (Zwiebel- oder Lauch-) Art, deren Pollen von der spezialisierten Lauch-Maskenbiene gesammelt werden. Sie nistet in Totholz, was wir nachbauten mit Holzblöcken, in die wir Löcher bohrten, ähnlich wie es holzbohrende Insekten täten. Zur Ermittlung der Maximaldistanz, welche die Bienenweibchen beim Sammelflug überwinden, verschoben wir den Pflanzenbestand auf einer Palette entlang eines geraden Feldwegs. Damit vergrösserte sich der Abstand zum Nistplatz schrittweise. Diese Methode greift das natürliche Verhalten der Wildbienen auf: Die Weibchen suchen und sammeln vorerst in Nestnähe, dann bei weiter entfernten Blüten. Während einer festgelegten Zeitspanne pro Pflanzenposition kontrollierte je ein Studierender den Pflanzenbestand oder den Nistplatz, um die Ankunft der zuvor individuell markierten Bienen festzuhalten (ZURBUCHEN et al., 2010a).

Die Befunde mit der genannten kleinen, seltenen Bienenart waren überraschend: Die maximale Suchdistanz betrug nicht etwa 150 m wie bisher prognostiziert, sondern einen vollen Kilometer. Allerdings flog nur ein kleiner Teil

der Individuen so weit, die Hälfte begnügte sich mit 200 m. Analog testeten wir weitere Arten; die grösste Art legte maximal 1.4 km zurück; die Hälfte der Individuen erreichte allerdings nur einige hundert Meter (ZURBUCHEN et al., 2010a). Eine Distanz von 1 – 1.5 km zwischen Nest und Pollenquelle liegt daher wahrscheinlich am Limit für das Überleben mancher Wildbienenarten. Wenn die Distanz auf wenige hundert Meter verkürzt wird, dürfte die Individuenzahl an Wildbienen markant zunehmen, wie dann auch unsere weiteren Versuche bestätigten (ZURBUCHEN et al., 2010b). Einen weiteren wichtigen Befund erhielten wir an der Südflanke der Alpen im Wallis, wo Grasland auf kleinem Raum unterschiedlich bewirtschaftet wird. Auf einer Fläche von nur 2 km² fanden wir gesamthaft 250 verschiedene Wildbienenarten (OERTLI et al., 2005). Mit struktureller Vielfalt kann eine Agrarlandschaft einen hohen Artenreichtum beispielsweise an Wildbienen ermöglichen (DORN et al., 2012). Es lohnt sich, in dieser Richtung weiter zu arbeiten.

Alle diese Untersuchungen mit Nutzinsekten wie auch mit Schadinsekten zeigen: Agrikultur im besten Sinn kann gleichzeitig Nutzung und Bewahrung natürlicher Ressourcen ermöglichen.

6 VERDANKUNGEN

Mein grosser Dank geht an alle, die mit mir zusammenarbeiteten: in meiner Gruppe, im ganzen ETH-Bereich, landesweit und international. Nur dank den Beiträgen und dem Zusammenwirken Vieler konnten wir erreichen, was heute zugunsten eines nachhaltigen Welternährungssystems verwirklicht ist.

7 LITERATUR

BLOEM, S., CARPENTER, J. E., and DORN, S. 2006. Mobility of mass-reared diapaused and nondiapaused *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae): Effect of mating status and treatment with gamma radiation. *Journal of Economical Entomology* 99, 699–706.

CARDONA, C., and KORNEGAY, J. 1999. Bean germplasm resources for insect resistance. In: «Global Plant Genetic Resources for Insect-Resistant Crops», S. L. CLEMENT, S. S. QUISENBERRY, pp. 85–99. CRC Press, Boca Raton, 320 pp.

DORN, S. 1993. Role of transformation inhibitors in fruit ecosystems. *Acta Horticulturae* 347, 245–252.

DORN, S., SCHUMACHER, P., ABIVARDI, C., and MEYHÖFER, R. 1999. Global and regional pest insects and their antagonists in or-

- chards: spatial dynamics. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 73, 111–118.
- DORN, S., ZURBUCHEN, A. and MÜLLER, A., 2012. Enhancing wild bees in agricultural landscapes. *IOBC/wprs Bulletin* 75, 65–68.
- GATHMANN, A., and TSCHARNTKE, T. 2002. Foraging ranges of solitary bees. *Journal of Animal Ecology* 71, 757–764.
- GLAUSER, F. 1938. *Der Chinese. Wachtmeister Studers dritter Fall*. Morgarten-Verlag AG, Zürich, 237 pp.
- GU, H., HUGHES, J. and DORN, S. 2006. Trade-off between mobility and fitness in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae). *Ecological Entomology* 31, 68–74.
- KEIL, S., GU, H., and DORN, S. 2001. Response of *Cydia pomonella* to selection on mobility: laboratory evaluation and field verification. *Ecological Entomology* 26, 1–7.
- KIRK, H., DORN, S. and MAZZI, D. 2013. Worldwide population genetic structure of the oriental fruit moth (*Grapholita molesta*), a globally invasive pest. *BMC Ecology*, doi: 10.1186/1472-6785-13-12.
- KREMEN, C., WILLIAMS N. M., AIZEN, M. A., GEMMILL-HERREN, B., LEBUHN, G., MINCKLEY, R., PACKER, L., POTTS, S. G., ROULSTON, T., STEFFAN-DEWENTER, I., VA'ZQUEZ, D. P., WINFREE, R., ADAMS, L., CRONE, E. E., GREENLEAF, S. S., KEITT, T. H., KLEIN, A.-M., REGETZ, J., and RICKETTS T. H. 2007. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters* 10, 299–314.
- MAIER, C. T. 1983. Effect of the apple blotch leafminer (Lepidoptera, Gracillariidae) on apple leaf abscission. *Journal of Economic Entomology* 76, 1265–1268.
- NATALE, D., MATTIACCI, L., HERN, A., PASQUALINI, E. and DORN, S. 2003. Response of female *Cydia molesta* (Lepidoptera: Tortricidae) to plant derived volatiles. *Bulletin of Entomological Research* 93, 335–342.
- OERTLI, S., MÜLLER, A., and DORN, S. 2005. Ecological and seasonal patterns in the diversity of a species-rich bee assemblage (Hymenoptera: Apoidea: Apiformes). *European Journal of Entomology* 102, 53–63.
- PIÑERO, J. C. and DORN, S. 2007. Synergism between aromatic compounds and green leaf volatiles derived from the host plant underlies female attraction in the oriental fruit moth. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 125, 185–194.
- PIÑERO, J. C., GALIZIA, C. G., and DORN, S. 2008. Synergistic behavioral responses of female oriental fruit moths (Lepidoptera: Tortricidae) to synthetic host plant-derived mixtures are mirrored by odor-evoked calcium activity in their antennal lobes. *Insect Physiology* 54, 333–343.
- SCHMALE, I., WÄCKERS, F. L., CARDONA, C., and DORN, S. 2002. Field infestation of *Phaseolus vulgaris* by *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Bruchidae), parasitoid abundance, and consequences for storage pest control. *Environmental Entomology* 31, 859–863.
- SCHMALE, I., WÄCKERS, F. L., CARDONA, C., and DORN, S. 2006. Biological control of the bean weevil, *Acanthoscelides obtectus* (Say) (Col.: Bruchidae), by the native parasitoid *Dinarmus basalis* (Rondani) (Hym.: Pteromalidae) on small-scale farms in Colombia. *Journal of Stored Products Research* 42, 31–41.
- SCHUMACHER, P., WEYENETH, A., WEBER, D. C., and DORN, S. 1997. Long flights in *Cydia pomonella* L. (Lepidoptera: Tortricidae) measured by a flight mill: influence of sex, mated status and age. *Physiological Entomology* 22, 149–160.
- SEDIVY, C., PRAZ, C.J., MUELLER, A., WIDMER, A. and DORN, S. 2008. Patterns of host-plant choice in bees of the genus *Chelostoma*: the constraint hypothesis of host-range evolution in bees. *Evolution* 62, 2487–2507.
- VELTEN, G., ROTT, A. S., CARDONA, C., and DORN, S. 2007. Effects of a plant resistance protein on parasitism of the common bean bruchid *Acanthoscelides obtectus* (Coleoptera: Bruchidae) by its natural enemy *Dinarmus basalis* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Biological Control* 43, 78–84.
- VELTEN, G., ROTT, A. S., CONDE PETIT, B. J., CARDONA, C., and DORN, S. 2008. Improved bruchid management through favorable host plant traits and natural enemies. *Biological Control* 47, 133–140.
- ZURBUCHEN, A., LANDERT, L., KLAIBER, J., MÜLLER, A., HEIN, S., and DORN, S. 2010a. Maximum foraging ranges in solitary bees: only few individuals have the capability to cover long foraging distances. *Biological Conservation* 143, 669–676.
- ZURBUCHEN, A., CHEESMAN, S., KLAIBER, J., MÜLLER, A., HEIN, S. and DORN, S. 2010b. Long foraging distances impose high costs on offspring production in solitary bees. *Journal of Animal Ecology* 79, 674–681.

Prof. em. Dr. Silvia Dorn, ETH Zürich, Institut für Agrarwissenschaften, Schmelzbergstrasse 9/LFO, 8092 Zürich, silvia.dorn@ipw.agrl.ethz.ch