

Print: ISSN 1867-0911
Internet: ISSN 1867-0938
Band 74 | Nr. 03-04
2022



Journal für Kulturpflanzen

Journal of Cultivated Plants



Zukünftige Wege des Pflanzenschutzes gegen Schadinsekten

Online Version: <https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal/index>

Journal für Kulturpflanzen vereint mit Pflanzenbauwissenschaften

Print: ISSN 1867-0911, Internet: ISSN 1867-0938

Website: <https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal>

Charakteristik

Bei uns steht die Kulturpflanze mit all ihren Facetten im Mittelpunkt. Alle publizierten Beiträge haben einen starken Bezug zur angewandten Forschung und unterstreichen die Bedeutung und Chancen der gewonnenen Erkenntnisse für die land- und gartenbauliche Praxis. Im Bereich der Forschung an Kulturpflanzen nehmen wir Beiträge aus allen einschlägigen Fachgebieten entgegen, z. B. Bodenkunde, Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft, Garten-, Obst- und Weinbau, Pflanzengenetik und Pflanzenzüchtung, Pflanzenschutz und Pflanzengesundheit sowie Agrartechnik.

Wir publizieren deutsch- und englischsprachige Original- und Übersichtsarbeiten sowie Kurzmitteilungen. Im redaktionellen Teil der Zeitschrift erscheinen außerdem Nachrichten, Personalien und Buchbesprechungen sowie Mitteilungen einschlägiger Fachgesellschaften.

Verantwortlicher Herausgeber / Editor-in-Chief

Prof. Dr. Frank Ordon, Präsident und Professor des Julius Kühn-Instituts – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg

Schriftleitung / Managing Editor

Dr. Anja Hühnlein, Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg, Tel.: 03946/47-2206, E-Mail: journal-kulturpflanzen@julius-kuehn.de

Co-Schriftleitung

Dr. Heike Riegler (JKI Quedlinburg)

Co-Schriftleitung Pflanzenbauwissenschaften

Prof. Dr. Hans-Peter Kaul (Universität für Bodenkultur Wien)

Redaktionsbeirat / Editorial Board

Prof. Dr. Henryk Flachowsky (JKI Dresden)

Prof. Dr. Simone Graeff-Hönniger (Universität Hohenheim)

Prof. Dr. Jörg Michael Greef (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Johannes Hallmann (JKI Braunschweig)

Dr. Olaf Hering (JKI Berlin)

Prof. Dr. Johannes Jehle (JKI Darmstadt)

Prof. Dr. Wilhelm Jelkmann (JKI Dossenheim)

Dr. Hella Kehlenbeck (JKI Kleinmachnow)

Dr. Heinz-Josef Koch (Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen)

Dr. Andrea Krähmer (JKI Berlin)

Prof. Dr. Carola Pekrun (Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen)

Dr. Jens Pistorius (JKI Braunschweig)

Dr. Bernhard Carl Schäfer (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Frank Marthe (JKI Quedlinburg)

Prof. Dr. Hartmut Stützel (Leibniz Universität Hannover)

Prof. Dr. Friedhelm Taube (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel)

Prof. Dr. Reinhard Töpfer (JKI Siebeldingen)

Dr. Ute Katharina Vogler (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Jens Karl Wegener (JKI Braunschweig)

Dr. Peter Wehling (JKI Groß Lüsewitz)

Dr. Ralf Wilhelm (JKI Quedlinburg)

Prof. Dr. Peter Zwerger (JKI Braunschweig)

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke (Georg-August-Universität Göttingen)

Prof. Dr. Klaus Dittert (Georg-August-Universität Göttingen)

Prof. Dr. Wolfgang Friedt (Justus-Liebig-Universität Gießen)

Prof. Dr. Bernward Märländer (Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen)

Elmar Pfülb (Bundessortenamt Hannover)

Mag. Astrid Plenk (AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH)

Dr. Ellen Richter (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

Prof. Dr. Joseph-Alexander Verreet (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel)

Manuskripteinreichung

Bitte reichen Sie Original- und Übersichtsarbeiten sowie Kurzmitteilungen und Nachrichten über das elektronische Zeitschriftenverwaltungssystem ein:

<https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal>.

Um die Einreichung zu beginnen, registrieren Sie sich als Nutzer der Zeitschrift über einen Klick auf „Registrieren“ im oberen rechten Bildschirmrand. Nach erfolgreicher Manuskripteinreichung erhalten Sie eine Bestätigung per E-Mail. Indem Sie sich mit Ihrem Benutzernamen und Passwort im System anmelden, können Sie jederzeit den Status Ihrer Einreichung einsehen.

Bei Fragen zur Manuskripteinreichung kontaktieren Sie gern die Schriftleiterin Dr. Anja Hühnlein (Tel.: 03946 47-2206, E-Mail: journal-kulturpflanzen@julius-kuehn.de).

Verlag

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg

Realisierung

Layout-Design: Anja Wolck (JKI Berlin)

Technische Implementierung und Produktion: mediaTEXT Jena GmbH, Richard-Sorge-Straße 6B, 07747 Jena.

Druck

ROCO Druck GmbH, Neuer Weg 48 A, 38302 Wolfenbüttel.

Copyright

Seit Januar 2019 werden alle Beiträge im Journal für Kulturpflanzen als Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Torsten Meiners¹, Torsten Will²

Zurück in die Zukunft ins Auenland?

Affiliationen

¹Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz, Berlin.

²Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Quedlinburg.

“Die Welt ist im Wandel. Ich spüre es im Wasser. Ich spüre es in der Erde. Ich rieche es in der Luft.“ Galadriel in JRR Tolkien: Herr der Ringe.

Mit dem Zitat wird in „Herr der Ringe“ auf die drohende Gefahr für „Mittelerde“ hingewiesen. Die Hobbits als Protagonisten kämpfen für den Erhalt ihrer Welt, sie kennen ihre natürliche Umwelt genau und achten sie. Ihre Heimat, das Auenland, ist extrem fruchtbar und fast alle angebauten Kulturpflanzen brauchen kaum Pflege. Die Antagonisten der Hobbits hingegen wollen alles Leben ihrer Herrschaft unterwerfen und ihre Umwelt nur zu ihren Zwecken benutzen oder sogar ganz ohne Grund zerstören. Tolkiens' Thematisierung ökologischer Problematik in Folge von Industrialisierung 1940 war seiner Zeit weit voraus (Geising, 2016). In „Herr der Ringe“ ist vor allem die Technologisierung der Menschen und die damit einhergehende Abwendung von der Natur Ziel der Kritik. Heutige Bedrohungen unserer Welt wie der von Menschen gemachte Klimawandel und der Verlust der Biodiversität sind deutlich zu spüren und zu sehen (und auch zu riechen). Mit einem Verständnis von Natur und Technik, das diese nicht als Gegensatzpaare begreift, können wir zum Erhalt der Nahrungssicherheit beitragen. Dieses versuchen wir in diesem Themenheft zu zukünftigen Wegen des Pflanzenschutzes gegen Insekten aufzuzeigen.

Das Gesamtaufkommen von Insekten in Deutschland ist nachweislich rückläufig. Parallel hierzu nehmen aber eine Reihe bereits bedeutender Schadinsekten (z. B. Blattläuse oder der Rapsdflöhen) weiter an Menge und Bedeutung zu, während gleichzeitig Neozoen hinzukommen. Gründe für den zunehmenden Druck durch Schadinsekten sind u. a. ihre schnellere Entwicklung aufgrund des Klimawandels, eine zunehmende Vereinfachung der Landschaft (engl. Landscape Simplification) und eine intensiviertere Landwirtschaft. Auch die Resistenzentwicklung gegen Insektizide, wie der Gruppe der Pyrethroide beim Rapsdflöhen und Kartoffelkäfer, spielt eine große Rolle. Mit der Zunahme von Virus-Vektoren wie Blattläusen und Zikaden nehmen auch Schäden durch Virusbefall als indirekte Folgen eines Schadinsektenbefalls zu und führen zu steigenden Ernteverlusten.

Parallel zu diesen Entwicklungen wird der Einsatz herkömmlicher chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel aufgrund von politischen Entscheidungen im Sinne des Umweltschutzes reduziert, da diese teils nicht zielgerichtet nur gegen Schadinsekten auf dem Feld wirken, sondern auch Nützlinge

und andere Nichtzielorganismen schädigen können. Auch ein gesellschaftlicher Druck hin zu mehr Nachhaltigkeit und die Bedürfnisse der Landwirte mit Hinblick u. a. auf ökonomische und ökologische Aspekte der Nahrungsmittelproduktion verlangen nach Veränderungen im Pflanzenschutz. Der Zielkonflikt zwischen dem Insektenschutz auf der einen und der Notwendigkeit einer verstärkten Kontrolle von Schadinsekten auf der anderen Seite zeigt sich u. a. in der intensiven Diskussion um den Einsatz chemisch-synthetischer Insektizide. In diesem Spannungsfeld werden im Sinne des Leitbildes des Integrierten Pflanzenschutzes neue Ansätze für einen nachhaltigen Pflanzenschutz benötigt, um Schadinsekten auch zukünftig zu kontrollieren. Mit dem Ziel der Entwicklung einer nachhaltig produzierenden Landwirtschaft, welche die Interessen der Produzenten, der Konsumenten aber auch der Umwelt (z. B. den Schutz der Biodiversität) mit einbezieht, wurden u. a. auf europäischer Ebene die „Farm-to-Fork“-Strategie und auf nationaler Ebene die Ackerbaustrategie 2035 formuliert. Das vorliegende Themenheft stellt vor diesem Hintergrund einige Möglichkeiten „zukünftiger Wege des Pflanzenschutzes gegen Schadinsekten“ vor.

Pflanzenschutzpraktiken entwickeln sich stetig weiter. Technische Innovationen in der Industrie sowie neue Erkenntnisse der Grundlagen- und angewandten Forschung an Universitäten und außeruniversitären Forschungsinstituten schaffen Möglichkeiten zur Verbesserung der Pflanzenschutztechniken und -maßnahmen. Forschungsbereiche, wie die chemische Ökologie, die Pflanzenzüchtung, der Biologische Pflanzenschutz, sowie die Anpassung ackerbaulicher Methoden und die Entwicklung von Pflanzenstärkungsmitteln und neuer Insektizide bieten hierfür die Grundlage. Die Anwendungsfelder der daraus entwickelten Pflanzenschutzpraktiken erstrecken sich über den Ackerbau, den Gartenbau bis hin zum Obstbau und können absehbar auch im Ökolandbau eingesetzt werden. Sie können dazu beitragen den Ertrag pro Fläche und hierdurch den Anteil des Ökolandbaus an der landwirtschaftlich genutzten Fläche bei vielen Kulturen zu erhöhen, indem hohe durch Insekten bedingte Ernteverluste, vermieden werden. Neben Maßnahmen des Pflanzenschutzes ist die Erhebung zum Aufkommen von Schadinsekten und von Insekten in der Agrarlandschaft allgemein von Bedeutung, um frühzeitig potentielle Schadinsekten identifizieren zu können und gleichzeitig Auswirkungen von Pflanzenschutzmaßnahmen auf die Insektendiversität beurteilen und gegebenenfalls korrigieren zu können.



(c) Die Autoren 2022

Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Vielversprechend für die Entwicklung von neuen Pflanzenschutzmethoden gegen Insekten sind die Omics-Ansätze. Nicht zielgerichtete Analysemethoden für alle Bereiche, von Metaboliten bis hin zu Genomen, haben die biologische Forschung revolutioniert und waren die Grundlage für die Einführung systembasierter Ansätze in der biologischen Forschung. Das Potenzial der Omics-basierten Technologien, Innovationen im Pflanzenschutz voranzutreiben, ist groß. Sie können zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und Schadinsekten sowie der genetischen Variation zwischen Pflanzengenotypen und Populationen von wirbellosen Zielorganismen eingesetzt werden. Sie bilden so die Grundlage für die Entwicklung von resistenten Sorten bis hin zu biobasierten Pflanzenschutzmitteln. Auch können sie der Entwicklung empfindlicherer Diagnosemethoden (sowohl DNA als auch Metaboliten) für den Einsatz auf dem Feld dienen.

Bestehende und neu entstehende Pflanzenschutzverfahren schließen Bereiche wie Ackerbau, mechanische Verfahren, Pflanzenzüchtung, Biologische Kontrolle, induzierte Resistenz, Anwendung ökologischer Prinzipien in diversifizierten Systemen, Präzisionslandwirtschaft und neue Pflanzenschutzmittel mit ein, wobei diese Liste sicherlich noch ergänzt werden kann. Im Bereich Ackerbau sind dies Anbauformen, die zu einer Reduktion des Schädlingsbefalls beitragen, wie erweiterte Fruchtwechsel, Begleitpflanzen und Untersaaten sowie die Anlage von Diversitäts- bzw. Blühstreifen/-flächen. Auch neue oder verbesserte mechanische Verfahren sowie ein biotechnologischer Pflanzenschutz können den Befall mit tierischen Schaderregern reduzieren helfen. Bei der Resistenzzüchtung gegen Schadinsekten gibt es vielversprechende Beispiele u. a. für Getreide, Raps, Kartoffeln und Salat, was zeigt, dass nicht nur flächenstarke Kulturen durch Resistenzzüchtung gestärkt werden können. Hier sind genaue Kenntnisse zur Biologie der Insekten notwendig, die aber oft noch fehlen. Darüber hinaus bedarf es neuer und hochdurchsatzfähiger Phänotypisierungsverfahren. Auch eine induzierte Resistenz nach Befall oder ein Immun-Priming gegen Insekten kann für zukünftige Ansätze der Kontrolle von Schadinsekten eine Rolle spielen. Die Fähigkeit von Pflanzen auf einen Priming-Stimulus zu reagieren, der sie schneller und/oder stärker gegen Schadinsekten reagieren lässt, kann bei der Entwicklung zukünftiger Sorten als Merkmal berücksichtigt werden. Ein besseres Verständnis mikrobieller Interaktionen mit Pflanzen, z. B. in der Rhizosphäre, Phyllosphäre und mit Endophytenorganismen, kann helfen Methoden und hierauf basierend Produkte zu entwickeln, die die Toleranz oder Pflanzenabwehr gegen Insekten positiv beeinflussen. Hierzu ergänzend kann Biologischer Pflanzenschutz ebenfalls helfen alte und neue Schädlinge (u. a. Neozoen) zu bekämpfen und so das Schadinsektenaufkommen effektiv unterhalb einer definierten wirtschaftlichen Schadschwelle zu halten. Auch hierbei spielt das Verständnis der Biologie der beteiligten Organismen und ihrer Interaktionen (Nützlinge vs. Schadinsekten) eine entscheidende Rolle. Die Verwirrmethode mittels Pheromonen oder Pflanzendüften sowie andere Techniken, die sich die chemische Ökologie zu Nutze machen, bieten weitere Möglichkeiten jenseits des synthetisch-chemischen Pflanzenschutzes gegen Insekten. Neue Pflanzenschutzmittel gegen Insekten schließen Wirkstoffgruppen, wie bakterielle kontraktile Phagenderivate oder die durch Sprühen applizier-

ten doppelsträngigen RNAs (dsRNA) mit ein, welche durch Nutzung natürlicher Mechanismen (RNA-Interferenz) hoch selektiv und aufgrund ihrer Natur leicht an neu auftretende Schadinsekten anpassbar sind. Beide werden voraussichtlich aufgrund ihres Potentials in absehbarer Zeit im Integrierten Pflanzenschutz Anwendung finden. Daneben können auch Biostimulanzien und Biologicals Pflanzen gegen den Befall von Insekten stärken.

Da wo der Wirkungsgrad der Alternativen nicht immer mit dem herkömmlicher chemisch-synthetischer Wirkstoffe vergleichbar ist, erscheint eine Kombination verschiedener Maßnahmen aus dieser „Werkzeugkiste“ sinnvoll und zielführend. Beispielsweise kann Insektenresistenz von Sorten mit Maßnahmen zur Reduktion eines Insektenbefalls, z. B. durch den Einsatz von Pheromonen, farbigen Bio-Folien oder dsRNA, kombiniert werden, um so eine Anpassung von Schadinsekten an Einzelmaßnahmen zu verzögern oder sogar zu verhindern. Neue Wege des Pflanzenschutzes lassen sich aber auch im Vorratsschutz anwenden, der bereits auf dem Feld durch Monitoring und Bekämpfung vorratsschädlicher Insekten ansetzen kann.

Die folgenden Artikel sollen für die Praxis verständlich aufzeigen, wie Erkenntnisse aus den jeweiligen Forschungsbereichen zukünftig eingesetzt werden können, um Schadinsekten verlässlich unter sich verändernden Rahmenbedingungen zu kontrollieren. Sie sind eine erste Auswahl von Themen zu zukünftigen Wegen des Pflanzenschutzes gegen Schadinsekten. Weitere Artikel sollen folgen um das breite Spektrum der hier skizzierten Ansätze abzudecken und fortlaufend neue Ansätze mit aufzunehmen. Dieses und zukünftige Themenhefte können so dazu beitragen die Ansätze zum Pflanzenschutz bekannter zu machen und erfolgreich in die Anwendung zu bringen.

Stukenberg & Niemann zeigen in ihrem Übersichtsartikel wie das Verständnis der visuellen Ökologie einschließlich der visuellen Wahrnehmung von Insekten und dem daraus folgenden Verhalten helfen kann Ansätze zur optischen Manipulation von Schadinsekten zu entwickeln. So kann durch repellent wirkende Materialien oder Nutzung von Kontrasteffekten ein Auffinden von Pflanzen durch Schadinsekten erschwert werden. Darüber hinaus eignen sich farbige Fallen und Leuchtdioden zum Abfangen dieser und somit für deren Monitoring.

Niemann et al. stellen in ihrer Arbeit zur optischen Manipulation von Schadinsekten vor, wie durch den Einsatz farbiger Mulchfolien die Landung und Ansiedlung von Blattläusen auf Eisbergsalat reduziert werden kann. Neuartige Sprühfolien werden dabei mit grünen und schwarzen konventionellen PE-Folien unter besonderer Berücksichtigung von Farbkontrasten und Lichtreflexion in Feldversuchen verglichen. Qualitätseinbußen durch die Sprühfolien konnten nicht festgestellt werden.

Eben et al. berichten in ihrem Übersichtsartikel über zwei gebietsfremde invasive Schadinsekten (Neozoen) und Ansätze ihrer Bekämpfung im Obstbau. Während es für die Kirschessigfliege bereits erste wirksame Regulierungsstrategien, sowie ein umfangreiches Wissen zur Biologie, Ökologie und Genetik gibt, werden invasive Schadwanzen derzeit an verschiedenen Standorten intensiv untersucht und potenziell

wirksame, alternative Methoden zur Regulierung aktuell in Forschungsprojekten erarbeitet.

Koch & Petschenka stellen in ihrem Übersichtartikel das Sprühen von RNA-basierten Wirkstoffen (RNA Sprays) gegen Insekten als eine innovative und vielversprechende Alternative zu konventionellen chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln für die Kontrolle von Schadinsekten in der Pflanzenproduktion vor. Sie gehen dabei auf die hohe Selektivität und die schnelle Anpassbarkeit der sequenzspezifischen und somit maßgeschneiderten RNAs ein. Da der Transfer von RNA-Sprays ins Freiland erst am Anfang steht, werden die damit verknüpften offenen Forschungsfragen sowie wissenschaftlich-technischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen adressiert.

Becker et al. informieren in ihrer Übersichtsarbeit über bakterielle kontraktile Phagenderivate (englisch CPTs) und ihr Potenzial als effiziente und Schadorganismus-spezifische Alternative zu konventionellen synthetisch-chemischen Pflanzenschutzmitteln. Sie beschreiben die Funktion der CPTs

für Bakterien im ökologischen Kontext und zeigen Beispiele, u. a. durch die Verwendung zweier Webservices, für den vielfältigen Einsatz von CPTs als leistungsfähige biologische Bekämpfungsmittel gegen Insekten in der nachhaltigen Pflanzenproduktion auf.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Geising, I., 2016: Fantasy-Wesen aus ökokritischer Sicht: Tolkiens *The Lord of the Rings* und Rowlings *Harry-Potter-Reihe*. Saarbrücker Digitale Interdisziplinäre Nachwuchsbeiträge zum Ecocriticism, Band 4, URL: https://www.uni-saarland.de/fileadmin/upload/lehrstuhl/solte-gresser/Dokumente/Fachschaft/Saardine/Saardine_Geising_final.pdf, Zugriff: 19.03.2022.

Niklas Stukenberg¹, Jan-Uwe Niemann^{2,3}

Anlocken, Verwirren, Abwehren: Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und Möglichkeiten der optischen Manipulation von Schadinsekten

Attract, confuse, repel: Basics of visual perception and possibilities of optical manipulation of insect pests

Affiliationen

¹Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, Braunschweig.

²Leibniz Universität Hannover, Institut für Gartenbauliche Produktionssysteme, Abteilung Phytomedizin Hannover.

³Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz, Braunschweig.

Kontaktanschrift

Dr. Niklas Stukenberg, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, E-Mail: niklas.stukenberg@julius-kuehn.de

Zusammenfassung

Die optische Manipulation von Schadinsekten stellt mit weiteren präventiven Maßnahmen eine Grundlage für integrierte Systeme zum Pflanzenschutz dar. Mittels der Manipulation der visuellen Wahrnehmung wird Insekten das Auffinden ihrer Wirte erschwert und somit die Zuflugsrate gesenkt. Besonders bei Insekten mit hohen Reproduktionsraten kann aber schon der verminderte Befallszuflug einen großen Einfluss auf die Einhaltung späterer Schadschwellen haben. Die Grundlage hierfür liegt in der visuellen Ökologie von Insekten und ihrer visuellen Wahrnehmung und dem daraus folgenden Verhalten. Die aus dieser Wahrnehmung hervorgehenden Ansätze zur optischen Manipulation reichen von der Nutzung von Kontrasteffekten, über farbige Fallen, bis zur Verwendung von repellent wirkenden Materialien. Durch die Entwicklungen im Bereich Leuchtdioden ist es zudem möglich schmalbandiges Licht für die optische Manipulation zu nutzen. Aktuelle Methoden der optischen Manipulation und ihre Anwendungsmöglichkeiten werden anhand von Beispielen beschrieben.

Stichwörter

Wirtspflanzenfindung, wellenlängenspezifisches Verhalten, Farbsehen, integrierter Pflanzenschutz, biologischer Pflanzenschutz, Blattläuse, Weiße Fliegen

Abstract

The optical manipulation of insect pests, together with other preventive measures, forms the basis for integrated crop protection systems. The manipulation of the visual perception makes it more difficult for insects to find their hosts and thus reduces the infestation rate. Particularly in the case of insects with high reproduction rates, the reduction in initial

infestation can already be decisive for keeping below later damage thresholds. The basis for this lies in the visual ecology of insects and their visual perception and subsequent behaviour. The approaches to optical manipulation that emerge from this perception range from the use of contrast effects to coloured traps and the use of repellent materials. Developments in the field of light-emitting diodes have also made it possible to use narrow-band light for optical manipulation. Current methods of optical manipulation and their possible applications are described using examples.

Keywords

Host plant detection, wavelength-specific behaviour, colour vision, integrated pest management, biological plant protection, aphids, whiteflies

1 Zunehmende Bedeutung alternativer Methoden im integrierten und biologischen Pflanzenschutz

Die Reduktion des Einsatzes von chemischen Pflanzenschutzmitteln ist für eine nachhaltige, ressourcenschonende und zukunftsfähige Pflanzenproduktion notwendig. Dies wird gesellschaftlich sowie durch die EU-Gesetzgebung und die Zukunftsstrategien der Bundesregierung (Nationale Politikstrategie Bioökonomie, Nationale Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln) gefördert und gefordert. Durch den Wegfall von Insektiziden kommt alternativen Methoden eine steigende Bedeutung zu. Zum einen werden altbekannte Maßnahmen, die aufgrund des zeitlichen Aufwandes und/oder der Kosten vorher nicht durchgeführt wurden, wie beispielsweise das konsequente systematische Monitoring mit Gelbtafeln, wieder verstärkt durchgeführt, um die Zahl der notwendigen Insektizidapplikationen zu mi-



(c) Die Autoren 2022

Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen: 9. Dezember 2021/23. Februar 2022

nimieren. Zum anderen werden aber auch vorbeugende und interventive Maßnahmen (physikalisch, biologisch) immer häufiger eingesetzt werden, um Insektizidapplikationen vermeiden zu können.

2 Bedeutung der visuellen Ökologie von Schadinsekten für den Pflanzenschutz

2.1 Visuelle und chemische Wirtspflanzenfindung im Zusammenspiel

Die Wirtspflanzenfindung durch mobile (fliegende) Schadinsekten ist eine Voraussetzung für das Auftreten von Schäden an Kulturpflanzen und somit ein Ansatzpunkt für Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Auswahl von potentiellen Wirten erfolgt dabei sensorisch sowohl über visuelle als auch chemische Reize. In einer Theorie von Finch & Collier (2000) wird die visuelle Rezeption von Wirtspflanzen als zentrales Bindeglied zwischen der potentiellen olfaktorischen Rezeption und der gustatorischen Rezeption bei Wirtskontakt angesehen. Olfaktorische Reize durch Pflanzenvolatile können zunächst die Nähe zu geeigneten Wirtspflanzen signalisieren, das Landeverhalten allgemein stimulieren und in begrenztem Umfang Richtungsinformationen liefern. Für die zielgerichtete Landung werden jedoch visuelle Reize der zumeist grünen Pflanzenteile genutzt. Die Orientierung in Richtung Wirt (Wirtsfindung) erfolgt daher je nach Insektenart weitgehend visuell (Dixon, 2012) oder als Mischform aus beiden Sinnen (Butler, 1938; Prokopy & Owens, 1983; Finch & Collier, 2000). Die visuelle Wirtspflanzenfindung beschreibt dabei die rein visuelle Wahrnehmung eines potentiellen Wirtes und eine gezielte Bewegung in Richtung dieses Reizes. Nach dem Landen entscheiden Kontaktreize, die meist über Chemorezeptoren an den Tarsen, Mundwerkzeugen oder Antennen wahrgenommen werden, über die Eignung als Wirtspflanze und nachfolgende Verhaltensweisen. Ein bekanntes Beispiel dieser allgemeinen Verhaltensabfolge ist die Wirtsfindung und -Akzeptanz von geflügelten Blattläusen, die in den Arbeiten von Moericke (1955) eingehend beobachtet wurde. Die Phase der Wirtsfindung ist mit dem physischen Kontakt zur Pflanze abgeschlossen. Es folgt mit dem Probesaugen die Phase der Wirtsakzeptanz, die dann zur Besiedelung (Wirt akzeptiert) oder erneutem Auffliegen (Wirt nicht akzeptiert) führt. Weitere Definitionen und Modelle dieser Verhaltensmuster sind ebenfalls vorhanden (Kennedy et al., 1961). Ein weiteres Beispiel für das Zusammenspiel visueller und chemischer Reize ist die Wirtspflanzenfindung des Großen Kohlweißlings (*Pieris brassicae*) zur Eiablage. Die grüne Farbe löst zunächst die Landung und ein spezielles Tasten (Trommeln) mit den Antennen aus. Werden dabei spezifische Senfölglykoside wahrgenommen, kommt es zur Eiablage, andernfalls zum Weiterfliegen (Scherer & Kolb, 1987).

Unabhängig von der Wirtspflanzenfindung orientieren sich Insekten während des Fluges ebenfalls visuell anhand von ultravioletter (UV) Strahlung, die mit dem Sonnenlicht assoziiert ist (Briscoe & Chittka, 2001). Die Umgebungsstrahlung beeinflusst daher das Flug-, Migrations- und Dispersionsverhalten und ist somit indirekt auch am Auffinden neuer Wirte durch

Insekten beteiligt. Die Reaktion auf UV-Strahlung, die sich von der Verhaltensreaktion auf farbige Objekte unterscheidet, wurde bei einigen Schadinsekten untersucht und gezeigt (Coombe, 1981; Stukenberg & Poehling, 2019; Stukenberg et al., 2020).

2.2 Optische Manipulation als Methode des integrierten Pflanzenschutzes

Die optische Manipulation von Schadinsekten bildet mit anderen Kulturmaßnahmen die Basis der vom IOBC (IOBC-WPRS, IBMA, PAN-Europe, 2019) beschriebenen Pyramide zum integrierten Pflanzenschutz (IPM). Sie ist theoretisch mit allen anderen Maßnahmen zum integrierten Pflanzenschutz kompatibel und damit vielseitig einsetzbar. Die optische Manipulation kann die Zahl der zufliegenden Schadinsekten deutlich senken, jedoch den Zuflug nicht vollständig unterbinden. Zum einen wird zwar mit jedem Schadinsekt, das die Kulturpflanze nicht findet und keine Population aufbaut, ein potenziell großer Schaden abgewendet, zum anderen ist die Reproduktionsrate vieler Schadinsekten jedoch so hoch, dass ein Monitoring und/oder andere Maßnahmen in einem System zum integrierten Pflanzenschutz gebündelt werden müssen, damit ein Befall unter der Schadschwelle gehalten werden kann. Die optische Manipulation ist damit ein potenziell wichtiger Teil eines Systems zum Integrierten Pflanzenschutz, kann als alleinige Maßnahme aber nicht immer mit den hohen Wirkungsgraden von Insektiziden konkurrieren. In einer Anbausituation in der die Schadinsekten Pflanzenviren übertragen, können optische Methoden jedoch auch effektiver sein, als die rein chemische Behandlung (Kirchner et al., 2014).

Neue Technologien und Materialien wie beispielsweise Leuchtdioden (LEDs) und spezielle Folien sowie moderne Anbausysteme (Gewächshaus, Folientunnel etc.) ermöglichen die Ausweitung und Anwendung der optischen Manipulation in der Praxis. Die Prinzipien bzw. deren Wirkung sind teilweise bereits seit langem bekannt. Durch das zunehmende physiologische und verhaltensbiologische Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen können die Prinzipien in Zukunft gezielter angewendet werden.

3 Visuelle Wahrnehmung und Verhalten von Schadinsekten

3.1 Facettenaugen und Ozellen

Die Wahrnehmung von Licht, entweder direkt von der Sonne oder reflektiert von Objekten, erfolgt durch die Fotorezeptorzellen in der Netzhaut des Facettenauges und in den dorsalen Ozellen (Warrant & Nilsson, 2006). Obwohl die allgemeinen Strukturen der Facettenaugen ähnlich sind, gibt es viele artspezifische Unterschiede und Variationen. Diese Unterschiede betreffen den optischen Aufbau und die spektrale Empfindlichkeit der enthaltenen Fotorezeptorpigmente. Insbesondere die neuronale Verarbeitung und die Reaktion auf Lichtreize unterscheidet sich zwischen den Arten (Briscoe & Chittka, 2001). Facettenaugen bestehen aus zahlreichen un-

abhängigen optischen Einheiten, den sogenannten Ommatidien. Die Anzahl der Ommatidien, ihre Größe und ihr Winkel zueinander bestimmt das räumliche Auflösungsvermögen (Land, 1997).

Die Morphologie der Facettenaugen ist bei Bestäubern und weiteren Modellinsekten relativ gut untersucht (Spaethe & Chittka, 2003). Das Auge einer räuberischen und hochmobilen Libelle enthält beispielsweise die maximale Anzahl von bis zu ca. 30.000 Ommatidien (Cronin et al., 2014). Im Vergleich dazu gibt es nur wenige morphologische Studien zu eher einfachen herbivoren Insekten. Die Gewächshaus-Weiße Fliege (*Trialeurodes vaporariorum*) besitzt nur etwa 84 Ommatidien pro Auge. Außerdem ist es unterteilt in einen dorsalen (54 Ommatidien) und einen ventralen Teil (30 Ommatidien), die zudem unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten aufweisen (Mellor et al., 1997). Der Kalifornische Blütenthrips, *Frankliniella occidentalis*, weist etwa 60 Ommatidien pro Auge auf (Matteson et al., 1992). Das Komplexauge von Aphiden dagegen ist sphärisch aufgebaut und in einer Studie von Döring & Spaethe (2009) wurde bei der Untersuchung von 14 Spezies ein Median von 165 Ommatidien gezählt. Diese müssten theoretisch auch zu einer besseren räumlichen Wahrnehmung durch die Aphiden (verglichen mit Weißen Fliegen und Thripsen) führen.

Die dorsalen Ozellen sind zwei oder drei sehr kleine Organe, deren Grundbausteine den Ommatidien ähneln, jedoch viel kleiner sind. Die Ozellen ermöglichen keine räumliche Auflösung, sind aber sehr empfindlich für UV- und sichtbares Licht und haben eine hohe Signalübertragungsgeschwindigkeit. Als separater Wahrnehmungskanal haben sie die Aufgabe, allgemeine Informationen für die Navigation und Orientierung während des Flugs zu liefern (Lazzari et al., 2011).

3.2 Fotorezeptoren und spektrale Sensitivitäten

Die Grundstruktur der Fotorezeptorpigmente ist allen Tieren gemeinsam und enthält ein Chromophor, das an ein Opsinprotein gebunden ist (Briscoe & Chittka, 2001). Pigmente die auf demselben Chromophor basieren, haben eine ähnlich geformte spektrale Empfindlichkeitskurve, die durch Template-Formeln beschrieben werden kann (Stavenga et al., 1993; Govardovskii et al., 2000). Die Unterschiede in der spektralen Empfindlichkeit resultieren aus unterschiedlichen Aminosäuresequenzen im Opsinprotein. Bei der Wahrnehmung von Licht bewirken Photonen eine Veränderung der Konformation des Opsinproteins und lösen die visuelle Signaltransduktionskaskade aus. Das Signal wird dann über die Axone der Fotorezeptorzellen an die Neuronen höherer Ordnung weitergeleitet und dort weiterverarbeitet (Warrant & Nilsson, 2006; Cronin et al., 2014). Eine Vielzahl untersuchter Insekten haben drei unterschiedliche Typen an Fotorezeptoren mit maximaler Sensitivität im ultravioletten (UV), blauen und grünen Spektralbereich; diese Ausstattung an Fotorezeptortypen wird trichromatisch genannt. Viele Insekten haben jedoch auch vier und mehr verschiedene Typen an Fotorezeptoren, jedoch haben alle bisher untersuchten Arten einen UV-sensitiven Rezeptor (Briscoe & Chittka, 2001).

Elektrophysiologische Studien zu spektralen Sensitivitäten existieren nur für wenige Schadinsekten. Mit Hilfe des Elek-

troretinogramms (ERG) wurden bei *T. vaporariorum* maximale spektrale Effizienzen im grüngelben (520 nm) und im UV-Bereich (340 nm) festgestellt (Mellor et al., 1997). Bei *Frankliniella occidentalis* wurde ebenfalls Maxima im grüngelben (ca. 540 nm) und im UV-Bereich festgestellt (Matteson et al., 1992). Bei der Erbsenblattlaus (*Acyrtosiphon pisum*) wurde ein Grünrezeptor mit einer Maximalempfindlichkeit bei 518 nm identifiziert (Döring et al., 2011). Nur für die grüne Pflanzschädling (*Myzus persicae*) gibt es physiologische Belege für einen trichromatischen Rezeptoraufbau mit Maximalempfindlichkeiten im UV- (340 nm), Blau- (490 nm) und Grünbereich (530 nm) (Kirchner et al., 2005). Hinsichtlich der Wellenlängen eng nebeneinanderliegende Sensitivitäten der Blau- und Grünrezeptoren konnten in den meisten physiologischen Studien nicht getrennt nachgewiesen werden. Farbwahlstudien und empirische Modelle konnten jedoch für alle genannten Insekten überzeugende Hinweise für einen trichromatischen Rezeptoraufbau mit Maximalempfindlichkeiten im UV-, Blau- und Grünbereich liefern (siehe 3.4)

3.3 Rolle der Fotorezeptoren für das Farbsehen

Das Vorhandensein verschiedener Fotorezeptoren bildet lediglich die Grundlage für die Wahrnehmung von Farben. Nach dem sogenannten Prinzip der Univarianz ist ein einzelner Rezeptor farbenblind, da er wie ein Photonen-zähler fungiert und nicht zwischen Photonen verschiedener Wellenlängen unterscheiden kann. Ein helles Licht, das nicht im Wellenlängenbereich der Maximalempfindlichkeit liegt, kann für einen einzelnen Fotorezeptor das gleiche Signal verursachen wie ein schwächeres Licht im Bereich der Maximalempfindlichkeit (Naka & Rushton, 1966; Döring & Chittka, 2007; Skorupski & Chittka, 2011). Auf einer einfachen Ebene resultiert ein farbenblindes Verhalten aus der Stimulation eines Rezeptors. Achromatische, rein intensitätsabhängige Mechanismen können auch auf der Summierung von Rezeptorsignalen beruhen. Wenn mehrere Rezeptoren direkt an der Unterscheidung von Farbreizen beteiligt sind, ist das Verhalten nicht mehr farbenblind, auch wenn die Rezeptoren nicht interagieren. Des Weiteren können Rezeptorsignale auf einer nachfolgenden neuronalen Stufe interagieren, was die Extraktion von Farbsignalen ermöglicht. Hemmende Interaktionen zwischen visuellen Neuronen ermöglichen den Vergleich von Rezeptorsignalen und die Extraktion konstanter chromatischer Signale unabhängig von der Intensität und sind daher Voraussetzung für die Wahrnehmung von Farben (Kelber et al., 2003; Skorupski & Chittka, 2011; Kemp et al., 2015).

Wenn die spektrale Empfindlichkeit eines Fotorezeptors bekannt ist, entweder aus physiologischen Untersuchungen oder durch Template-Formeln angenähert, kann der Photonenfang aus einem Lichtreiz mit bekannter Spektralverteilung berechnet werden (Kelber et al., 2003; Döring, 2014). In Kombination mit Verhaltensdaten aus Farbwahlexperimenten können die Fotorezeptoranregungen für die Modellierung möglicher chromatischer Interaktionen im Hinblick auf bestimmte Verhaltensweisen verwendet werden (Chittka, 1996; Döring et al., 2009).

Basierend auf diesen Mechanismen gibt es bei Insekten verschiedene Stufen der Komplexität des Farbsehens und -ver-

haltens. Die einfachste Form ist die farbabhängige Photokinese und Phototaxis, der jegliches räumliche Sehen fehlt. Die zweite Stufe sind angeborene farbabhängige Verhaltensreaktionen, die oft als wellenlängenspezifisches oder wellenlängenabhängiges Verhalten bezeichnet werden. Sie beinhalten die räumliche Auflösung und dienen der Objekterkennung. Sie können nicht durch Lernen oder Erfahrung verändert werden und sind insbesondere bei eher einfachen herbivoren Insekten vorzufinden. Die dritte Ebene umfasst das Lernen und Wiedererkennen von Farben und erhöht die Flexibilität bei der Objekterkennung. Sie wird insbesondere von blütenbesuchenden Insekten genutzt und ermöglicht beispielsweise die Verknüpfung von Farben mit bestimmten Nahrungsressourcen (Kelber & Osorio, 2010).

3.4 Farbwahlverhalten von herbivoren Insekten

Aufgrund unterschiedlicher Fotorezeptorsensitivitäten und Farbsehmechanismen sind die menschlichen Farbdefinitionen nicht auf die Wahrnehmung durch Insekten übertragbar und werden im Folgenden nur für das allgemeine Verständnis genutzt. Bei reinen Farben ist die Präferenz von vielen herbivoren Insekten im für Menschen gelben bis gelb-grünen Farbspektrum (~550 nm) angesiedelt (Vaishampayan et al., 1975b; Moericke, 1955; 1969; Shimoda & Honda, 2013; Zhang et al., 2020). Dies entspricht ziemlich genau dem maximalen Reflektions- und Transmissionsgrad von grünen Blättern und lässt vermuten, dass die visuellen Systeme von Herbivoren an die Erkennung von Wirtspflanzen angepasst sind (Prokopy & Owens, 1983; Döring et al., 2009; Kelber & Osorio, 2010). Ausnahmen bestätigen auch hier die Regel und sind scheinbar der speziellen Färbung der Wirtspflanzen geschuldet (Döring & Chittka, 2007; Straw et al., 2011; Farnier et al., 2014). Die Farben selbst weisen wieder Parameter auf, die sie definieren (Vaishampayan et al., 1975a):

- a) Farbton (ergibt sich aus dem dominant reflektierten Wellenlängen von einer Oberfläche);
- b) Helligkeit (Intensität) der Gesamtreflexion;
- c) Farbsättigung oder Reinheit des Farbtons.

Zum Beispiel führt die Zugabe von Weiß zu Gelb zu einem signifikanten Anstieg im blau-violetten Bereich. Alle drei Parameter können theoretisch unabhängig voneinander verändert werden. Neben bevorzugten Wellenlängen gibt es jedoch auch Insekten, auf die spezifische Wellenlängen repellente Wirkung zeigen. Affeldt et al. (1983) zeigten, dass Wellenlängen von 400 bis 490 nm eine repellente Wirkung auf *T. vaporariorum* und *Liriomyza sativae* haben. Der Anteil dieser Wellenlängen am Gesamtspektrum hat somit auch einen Einfluss auf die Attraktivität einer Farbe, wie es für *T. vaporariorum* gezeigt wurde (Stukenberg et al., 2015).

Insbesondere das Farbwahlverhalten von Schadinsekten wie geflügelten Blattläusen oder Weißen Fliegen bei der Wirtspflanzenfindung ist ein bekanntes Beispiel für ein sogenanntes wellenlängenspezifisches Verhalten. Es wurde gezeigt, dass das Lande- bzw. Ansiedlungsverhalten von Blattläusen, Weißen Fliegen und dem Rapsglanzkäfer durch eine hemmende Interaktion zweier Fotorezeptoren mit maximalen Sensitivitäten im blauen und grünen Spektralbereich gesteuert wird. Bei diesem sogenannten Blau-Grün-Antagonismus

(blue-green opponency) ist das Signal des blausensitiven Rezeptors hemmend, während das Signal des grünsensitiven Rezeptors erregend ist, sodass die Verhaltensreaktion durch eine antagonistische Wirkung beider Rezeptortypen ausgelöst wird. Dies wurde durch Verhaltensexperimente mit farbigen Reizen und anschließender empirischer Modellierung auf der Grundlage physiologischer Daten gezeigt. Außerdem lieferten die Modellierungen indirekte Beweise für das Vorhandensein beider Rezeptoren und ihrer Interaktion bei verschiedenen Blattlausarten, *T. vaporariorum* und dem Rapsglanzkäfer *Brassicogethes aeneus* (Döring et al., 2009; Döring et al., 2012; Stukenberg & Poehling, 2019), die bei den physiologischen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden konnten (siehe 3.2). Dieser universale Mechanismus ermöglicht es den Herbivoren das mit den Wirtspflanzen assoziierte Farbsignal zu extrahieren, indem reflektiertes langwelliges Licht (Grün-Gelb) unabhängig von der Beleuchtungsintensität von kurzwelligem (blauem) oder breitbandigem (weißem) Licht unterschieden wird. Eine Auswirkung dieses dichromatischen Mechanismus ist die allgemein bekannte Präferenz von Gelb gegenüber Grün bei vielen herbivoren Insekten. Sie lässt sich durch eine höhere Reflexion von Gelb gegenüber Grün im relevanten Grünbereich erklären, da der einfache Farbwahlmechanismus in Bezug auf die Erregungsverhältnisse der Fotorezeptoren und das dadurch ausgelöste Verhalten offenbar eine Intensitätsabhängigkeit aufweist (Döring & Chittka, 2007; Kelber & Osorio, 2010; Skorupski & Chittka, 2011). Gelb ist demnach für Herbivore ein übernatürlicher Reiz, der aufgrund des Fehlens eines rotsensitiven Fotorezeptors im übertragenen Sinne als „helles Grün“ wahrgenommen wird (Prokopy & Owens, 1983). Ausführliche Studien mit der Gewächshaus-Weiße Fliege (*T. vaporariorum*) und schmalbandigen dimmbaren LEDs bestätigten die Wellenlängen- und Intensitätsabhängigkeit des Blau-Grün-Antagonismus. Im Gegensatz zu Farbtafeln erwies sich bei gleicher Intensität Grün und nicht Gelb als attraktivste LED Farbe, während die Attraktivität gehemmt wurde, wenn sie mit geringen Intensitäten an blauem LED-Licht kombiniert wurde. Außerdem wurde eine deutliche Intensitätsabhängigkeit festgestellt, was bestätigt, dass der Mechanismus auf einer gemischten intensitäts- und wellenlängenabhängigen Achse liegt. Im Vergleich dazu weisen reflektierende Farbfallen breitbandige Spektren mit unterschiedlichen Intensitäten der Reflektion auf, sodass wellenlängen- und intensitätsabhängige Effekte bei der Interpretation häufig vermischt wurden (Stukenberg et al., 2015; Stukenberg & Poehling, 2019). Wie Legarrea et al. (2012c) gehen wir davon aus, dass bei Weißen Fliegen trotz Unterschieden vor allem im Wander- und Distanzflug vergleichbare Reaktionen im Anflugprozess wie bei Blattläusen vorhanden sind. Ähnlichkeiten im Farbsehen sind offensichtlich (Prokopy & Owens, 1983; Hardie, 1989).

Bei Insekten, die nicht bzw. nicht ausschließlich grüne Blätter als Nahrungsressource nutzen, weicht das Farbwahlverhalten von dem beschriebenen typischen Mechanismus ab. Der Kalifornische Blüthenrips (*F. occidentalis*) bevorzugt häufig blaue vor grünen oder gelben Zielen (Otieno et al., 2018). Die Präferenz für Blau ist dabei allerdings sehr variabel und kann bereits durch geringe Änderungen in der spektralen Zusammensetzung verändert werden (van Tol et al., 2021). Wellenlängen- und Intensitätsabhängigkeiten konnten in LED-basier-

ten Studien auch hier gezeigt werden. Blau und Grün wurden als zwei getrennte attraktive Bereiche identifiziert. Wenn das Licht von blauen und grünen LEDs gemischt wurde, nahm die Attraktivität im Vergleich zu den Einzelkomponenten ab. Wahrscheinlich werden beide wellenlängenspezifische Verhaltensweisen daher von zwei Fotorezeptoren gesteuert, die im blauen und grünen Bereich maximal empfindlich sind und in einer hemmenden chromatischen Interaktion zueinander stehen (Stukenberg et al., 2020).

3.5 Einfluss von Kontrasten auf die visuelle Wahrnehmung

Die Attraktivität und Erkennbarkeit eines Objekts werden jedoch nicht nur durch seine Farbe bestimmt, sondern insbesondere durch den Kontrast zwischen dem Ziel und Hintergrund. Daher wird der Photonenfang des Ziels üblicherweise relativ zum Hintergrund berechnet, d. h. beide Reflexionsspektren werden in die Modellierung einbezogen (Chittka, 1996; Döring, 2014). Der zugrundeliegende Mechanismus ist die Fotorezeptoradaption, d. h. die relative Anpassung des Rezeptorsignals an das wahrgenommene Licht des Ziels im Vergleich zum Hintergrund. An diesem Prozess sind verschiedene physiologische Mechanismen beteiligt, die eine Sättigung der Fotorezeptoren vermeiden und die konstante Farbwahrnehmung bis zu einem gewissen Grad aufrechterhalten (Laughlin & Hardie, 1978; Laughlin, 1989; Arshavsky, 2003; Foster, 2011).

Dementsprechend reagieren Blattläuse und andere Herbivore am stärksten auf attraktive grüne oder gelbe Farbziele auf nacktem Boden und dunklem Hintergrund, da die höchste relative Fotorezeptorerregung ausgelöst wird. Andere Hintergrundfarben verringern die Attraktivität der Ziele deutlich. Außerdem wird bei ähnlich attraktiven Ziel- und Hintergrundfarben angenommen, dass der Hintergrund selbst anlockend wirkt und die Herbivoren vermehrt neben ihrem Ziel landen (Finch & Collier, 2000; Döring et al., 2004; Döring & Röhrig, 2016).

Obwohl die Verhaltensmechanismen noch wenig verstanden sind, bieten Kontrasteffekte bereits vielversprechende Strategien zur Manipulation der Wirtspflanzenfindung bei Blattläusen, die als Pflanzenschutzmaßnahme genutzt werden können. Es wurde gezeigt, dass der Kontrast zwischen Pflanze und Boden für die gezielte Landung auf der Wirtspflanze wichtig ist und dass die Landequoten reduziert werden können, wenn der Kontrast durch farbige (z. B. grüne) Hintergründe reduziert wird (Döring et al., 2004; Hooks & Fereres, 2006; Döring, 2014). Die abnehmende Attraktivität potenzieller Landeziele von Blattläusen aufgrund reduzierter Kontraste wurde bereits mit Gelbschalenexperimenten von Moericke (1955), De Barro (1991), Döring et al. (2004) und Döring & Röhrig (2016) nachgewiesen, bei denen geringere Kontraste zwischen Fallen und Hintergrund auch bei Verwendung anziehender Farben zu einer geringeren Anzahl gefangener Blattläuse führten.

Neben der Kontrastminimierung ist die Verwendung breitbandig reflektierender weißer oder silberner Hintergründe ein weiterer Ansatz zur Störung der Wirtspflanzenfindung. Ihnen wird eine direkt abstoßende Wirkung zugeschrieben, die die Attraktivität eines Farbziels sogar in höherem Maße

reduzieren kann als Hintergründe, die dieselbe Farbe aufweisen wie das Ziel. Obwohl vermutet wurde, dass dies mit der Reflexion von kurzwelligem Licht zusammenhängen könnte, ist der zugrundeliegende Mechanismus nicht wirklich verstanden. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass UV-Licht, das künstlich vom Boden, also in entgegengesetzter Richtung zum Himmel, reflektiert wird, Herbivore in ihrer Orientierung verwirrt (Döring et al., 2004; Döring, 2014). Allerdings fehlen Belege für diese Wirkungsweise, und es gibt Hinweise darauf, dass die Reflexion von blauem Licht eher die Ursache für die abwehrende Wirkung sein könnte. UV- und Blaulichtreflektion sind bei breitbandig reflektierenden Oberflächen stark korreliert, weshalb ihre Wirkung in Verhaltensstudien bisher nicht getrennt werden konnte. Weitere Hinweise lassen sich aus LED-basierten Verhaltensstudien mit der Gewächshaus-Weiße Fliege ableiten. Aufgrund des bereits beschriebenen Blau-Grün-Antagonismus hatten relativ geringe Intensitäten von blauem Licht eine abstoßende Wirkung, wenn es mit dem ansonsten attraktiven grünen Licht gemischt wurde. Der kombinierte Einsatz von grünen und UV-LEDs erhöhte dagegen sogar die Attraktivität (Stukenberg et al., 2015; Stukenberg & Poehling, 2019).

Ein weiterer Faktor der die Farbwahrnehmung beeinflusst, ist die Polarisation von Licht. Neben der von vielen Insekten wahrgenommenen Polarisation des Lichts am Himmel, sind sie auch in der Lage weitere Polarisationsänderungen wahrzunehmen (Klowden, 2009). Viele Studien zeigen eine starke Vermeidungsreaktion von Herbivoren gegenüber polarisiertem Licht von unten, meist ausgelöst durch Folien (Greer & Dole, 2003). Da die Polarisation des einfallenden Lichts immer vom Winkel abhängt, indem das Licht auf eine Oberfläche fällt und reflektiert wird, ist dieser Faktor nicht vom sogenannten „Erdfaktor“ zu trennen, der schon von Moericke (1955) beschrieben wurde. Wie auch Döring & Röhrig (2016) beobachtete er, dass mehr Aphiden in Gelbschalen mit Boden als Hintergrundkontrast gefangen werden, als bei Hintergründen, die einen stärkeren Kontrast aufweisen (schwarze Folie). Um sich orientieren und einen potenziellen Wirt erkennen zu können ist daher immer auch ein Kontrast zum Hintergrund erforderlich (Antignus, 2000). Daher kann Farbe und Kontrast in Versuchen nicht getrennt werden.

3.6 Einfluss von ultravioletter Strahlung auf die Orientierung

Neben Farbe und Kontrast bei der Objekterkennung ist die ultraviolette (UV) Strahlung für die Orientierung von Insekten von Bedeutung. Sie nutzen die dorsale Lichtreaktion (Goodman, 1965) zur Orientierung zwischen Boden und Himmel. Eine theoretische Arbeit kommt zu dem Schluss, dass Insekten im Allgemeinen einen schwellenwertbasierten UV-Grün-Kontrast verwenden könnten, um Land und Himmel bei der Navigation zu unterscheiden (Möller, 2002). Eine Verschiebung des Verhältnisses von einfallendem UV-Licht und dem vom Boden (UV-defiziente Umgebung) reflektierten oder emittierten Licht durch UV-blockierende Folien, Netze und Gläser führt zu einer verminderten Orientierung (Antignus et al., 2001; Doukas & Payne, 2007) der Insekten. Zudem sind die Wirtssuche (Antignus, 2000; Legarra et al., 2012c),

Dispersion (Mutwiwa et al., 2005; Dáder et al., 2017) und Virusverbreitung (Antignus & Ben-Yakir, 2004; Kumar & Poehling, 2006; Legarrea et al., 2012a) für Blattläuse, Weiße Fliegen und andere Schädlingsarten (Díaz et al., 2006; Johansen et al., 2011) herabgesetzt.

4 Konzepte und Anwendung der optischen Manipulation im Pflanzenschutz

4.1 Anlockung zu optischen Fallen

Das Fangen von Schadinsekten zu Pflanzenschutz Zwecken mittels optischer Reize ist vor allem im Unterglasanbau von großem Interesse. Farbige Klebekartenfallen werden weltweit als Standardinstrument im integrierten Pflanzenschutz (IPM) zur Überwachung von Gewächshauschädlingen wie Weißen Fliegen, Blattläusen, Trauermücken und Thripsen eingesetzt (Ohnesorge & Rapp, 1986; Pinto-Zevallos & Vänninen, 2013). Böckmann et al. (2015) und Böckmann & Meyhöfer (2017) zeigten auf, dass über ein Monitoring mit handelsüblichen Gelbtafeln quantitative Aussagen zur Populationsentwicklung möglich sind. Hohe Dichten von Gelbfallen oder große gelbe Folienstreifen entlang der Kultur können auch zum Massenfang als direkte Bekämpfungsmaßnahme eingesetzt werden (Lu et al., 2012; Sampson et al., 2018). Die meisten der vor allem blattfressenden und -saugenden Schadinsekten werden von gelben Fallen angezogen. Einige blütenfressende Insekten, wie *F. occidentalis*, weisen eine davon abweichende Farbpräferenz auf und werden häufig mit blauen Farbtafeln gefangen (Prokopy & Owens, 1983; Natwick et al., 2007). Die grundlegende Beobachtung, dass viele pflanzensaugende Insekten wie Weiße Fliegen und Blattläuse von Gelb angezogen werden, wurde bereits vor langer Zeit erwähnt (Lloyd, 1921; Moericke, 1955; Moericke et al., 1966). Obwohl die zugrundeliegenden Mechanismen und Optimierungsansätze für verschiedene Insekten heute teilweise gut erforscht sind, ist die Entwicklung von optischen Fangmethoden nicht sehr vielfältig und beschränkt sich hauptsächlich auf gelbe oder blaue Fallen und mehr oder weniger einfache Fallendesigns (Shimoda & Honda, 2013).

Die konsequente Umsetzung von IPM-Strategien und biologischen Pflanzenschutzmaßnahmen, die auf verschiedene Schädlinge in unterschiedlichen Anbausystemen zugeschnitten sind, erfordert jedoch zunehmend spezifische und effiziente Überwachungssysteme und Kontrollmaßnahmen. Es ist von großem Interesse, den Arbeitsaufwand für das Monitoring zu verringern und die Genauigkeit und den Zeitpunkt von Pflanzenschutzmaßnahmen zu verbessern. Daher werden zunehmend (halb-) automatische Bilderfassungs- und Analysemethoden zur Auswertung von Gelbfallen entwickelt (Qiao et al., 2008; Xia et al., 2012; Böckmann et al., 2021; Rustia et al., 2021).

4.1.1 Optimierung der Farbe und Nutzung von Kontrasten

Gelbtafeln, -folien und -schalen verschiedener Hersteller variieren stark in Materialdicke (Transmission), Oberflächen-

beschaffenheit (Reflektion), Klebermenge und vor allem in der Farbe (Farbton, Sättigung). Durch die unterschiedlichen Materialien und Ausgangsfarbtöne verschiedener Produkte kann auch die Dauerhaftigkeit der Färbung schwanken. Die Nutzung unterschiedlicher Insektenleime veränderte beispielsweise die Präferenz des Kalifornischen Blüenthrips für gelbe und blaue Farbtafeln (van Tol et al., 2021). Ein Spektrum der reflektierenden Wellenlängen ist oft nicht gegeben und es liegt ein gewisses Entwicklungspotenzial in deren Optimierung. Fluoreszierendes Gelb erhöhte beispielsweise die Fangraten von Thripsen auf Gelbtafeln und von Rapsglanzkäfern (*B. aeneus*) in Gelbschalen (Döring et al., 2012; Röth et al., 2016). Sampson et al. (2018) zeigten, dass die Fängigkeit von Gelbtafeln und gelben Folienbahnen gegenüber *T. vaporariorum* gesteigert werden kann, wenn die Transmission der gelben Fläche gesenkt und schwarze Kontrastmuster mittig auf den Flächen aufgebracht werden. Schwarze Hintergründe erhöhten ebenfalls die Fängigkeit für *B. tabaci* (Kim & Lim, 2011).

4.1.2 Nutzung von Leuchtdioden

Der vielversprechendste Ansatz zur generellen Erhöhung der Falleneffizienz für Gewächshauschädlinge ist der Einsatz von optimal angepassten, schmalbandigen Leuchtdioden (LEDs). Allein oder als Ergänzung zu Farbkartenfallen kann die von der Falle ausgehende Intensität einer geeigneten zielspezifischen Wellenlänge künstlich erhöht werden. So konnten blaue Klebefallen, die mit einzelnen blauen Hochleistungs-LEDs ausgestattet waren, den Fang von *F. occidentalis* in Käfigversuchen um etwa das Doppelte erhöhen (Otieno et al., 2018). Gelbtafeln und gelbe Becherfallen, die mit einzelnen grünen Standard-LEDs ausgestattet waren, erhöhten die Fänge von Weißen Fliegen und Trauermücken in kommerziellen Gewächshauskulturen (Chen et al., 2004; Chu et al., 2004a; Chu et al., 2004b; Castresana & Puhl, 2016; Zhang et al., 2020). Eine Fallenkonstruktion mit einer grünen LED-Beleuchtungseinheit in der Nähe einer Gelbtafel führte in einem kommerziellen Tomatengewächshaus zu einer Erhöhung der Fänge von Weißen Fliegen (Zhang et al., 2020). Fallen mit zwölf grünen Hochleistungs-LEDs wurden von *T. vaporariorum* in Wahlversuchen in Käfigen gegenüber Gelbtafeln deutlich präferiert. UV-LEDs zeigten in dieser Studie nur eine mäßige Attraktivität, hatten aber in Kombination mit grünen LEDs einen synergistischen Effekt, insbesondere bei Dunkelheit (Stukenberg et al., 2015). Für Trauermücken erwiesen sich UV-LEDs als attraktiver als gelbe und grüne LEDs. Beide Wellenlängenbereiche erhöhen die Attraktivität gegenüber Gelbtafeln jedoch deutlich (Stukenberg et al., 2018). Die Kantenbeleuchtung von einer speziellen Acrylglasplatte mit grünen LEDs in Kombination mit einer dahinterliegenden Gelbtafel zeigte ebenfalls eine deutliche Erhöhung der Fangleistung gegenüber Weißen Fliegen und Trauermücken in kleinen Tomatenbeständen (Stukenberg, 2018). UV-LEDs alleine weisen nur eine moderate Attraktivität für *T. vaporariorum* auf. Der kombinierte Einsatz von grünen und UV-LEDs erhöhte dagegen sogar die Attraktivität (Stukenberg et al., 2015).

Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Entwicklung von LEDs in Bezug auf Effizienz, Spezifität und nicht zuletzt Kosteneffizienz und ihrer fortschreitenden Implementierung in

die gärtnerische Beleuchtungstechnik (Yeh & Chung, 2009) können in Zukunft effizientere optische Fanggeräte als Alternative zu den üblichen Klebekartenfallen entwickelt werden.

4.2 Störung der Wirtspflanzenfindung durch Veränderung der spektralen Reflektion des Bodens

Der visuelle Hintergrund von Kulturpflanzen kann hauptsächlich durch zwei verschiedene Methoden verändert werden. Die erste ist der gleichzeitige Anbau von zwei oder mehr Pflanzenarten nebeneinander (Misanbau) sowie die Nutzung von Untersaaten (lebende Mulche). Die zweite ist das Mulchen, d. h. das Abdecken des Bodens mit verschiedenen Materialien wie Stroh oder Plastikfolien, die in erster Linie dazu dienen, die Bodenfeuchtigkeit zu halten, die Bodentemperatur zu regulieren und Unkraut zu unterdrücken (Döring, 2014). Basierend auf den bereits beschriebenen Mechanismen (3.5) wird dabei entweder der Kontrast zum Boden minimiert (Maskierung der Kulturpflanze) oder die Reflektion repeller Wellenlängen genutzt.

4.2.1 Untersaaten (lebende Mulche) und Misanbau

Bei diesen Versuchen stehen häufig die Nützlingspopulationen und Parasitierungsraten im Vordergrund, weniger der optische Aspekt der lebenden Mulche. Dementsprechend gibt es in den Studien auch keine Aufzeichnungen zu den reflektierten Spektren. Da der lebende Mulch in fast allen Fällen die Zahlen der Nützlänge steigert (Frank & Liburd, 2005; Burgio et al., 2014), ist es besonders bei Feldversuchen fast unmöglich, den Einfluss der höheren Gegenspielerdichte von einem möglichen Kontrasteffekt durch den grünen Mulch zu trennen. Kleeuntersaaten im Kohlanbau reduzieren allgemein den Befall durch verschiedene Kohlschädlinge. Dies wird mittlerweile zu großen Teilen dem bereits beschriebenen optischen Effekt zugeschrieben (Finch & Collier, 2000). Versuche von Smith (1976) zeigen einen verringerten Befall von Rosenkohl durch *Aleyrodes proletella* (in der Veröffentlichung noch *A. brassicae*) und *Brevicoryne brassicae* (mehlige Kohlblattlaus), wenn der Boden durch Unkrautbewuchs bedeckt war. Hooks & Fereres (2006) zeigten, dass lebender Mulch den Befall mit *Bemisia argentifolii* und *Aphis gossypii* (Gurkenblattlaus) verringert und die Virusverbreitung senkt. Daneben ist immer auch das Wirtspflanzenspektrum der zu erwartenden Schadinsekten zu beachten. Eine Untersaat, die auch als Wirt genutzt werden kann, erhöht zwangsläufig die Wachstumsrate des Schadinsektes und verringert die Wahrscheinlichkeit, dass es die Fläche verlässt. Costello (1995a; 1995b) zeigten in Versuchen mit *Trifolium*-Spezies als Untersaat eine deutlich stärkere Wachstumsrate für *M. persicae* als für *B. brassicae* auf. Dies wurde zusammen mit geringeren Parasitierungsraten auf eine Barrierefunktion der Untersaat gegenüber dem Parasitoiden *Diaeretiella rapae* zurückgeführt. Wir halten es für wahrscheinlicher, dass die größere Wachstumsrate darauf basiert, dass *M. persicae* als Generalist in der Lage ist, die Untersaaten als Wirt zu nutzen und damit das gesamte Feld befallen werden kann, wohingegen die spezialisierte *B. brassicae* nur die Fläche nutzen kann, die von Kohlpflanzen bedeckt ist. Für Weiße Fliegen im Allgemeinen wurden in

einigen Studien Barriere-Pflanzen (Smith & McSorley, 2000; Castle, 2006) zur Verringerung der Virusübertragung untersucht, aber die Auswirkungen des Farbkontrasts wurden bisher nicht im Detail bewertet.

Der Anbau von Zuckerrübe mit verschiedenen Mischungspartnern führte zur Reduktion des Schädlingsbefalls (El-Fakharany et al., 2012). Die Ergebnisse für den Blattlausbefall ließen sich in einer nachfolgenden Modellierungsstudie gut durch den beschriebenen Effekt der Verringerung des Kontrasts beschreiben (Döring & Röhrig, 2016).

4.2.2 Organische Mulchmaterialien und grüne Folien

In Feldexperimenten mit Kartoffeln führte die Verwendung von Strohmulch sowohl zu einer Reduktion des Blattlausbefalls als auch zu einem verringerten Auftreten des Kartoffelvirus Y in den Kartoffelknollen. Der Effekt auf die Virusverbreitung in einem frühen Wachstumsstadium kann dabei vergleichbar oder höher sein als der Einsatz von biologischen oder synthetischen Insektiziden. Im Einklang mit dem beschriebenen visuellen Effekt endet die Wirksamkeit mit dem Reihenschluss (Saucke & Döring, 2004; Kirchner et al., 2014). Studien zu organischen Mulchen sind häufig auf Ertragsparameter (Larentzaki et al., 2008; Gill & McSorley, 2010) ausgelegt und nicht auf visuelle Effekte. Es gibt zwei Studien zu Strohmaterial als Mulchmaterial, bei denen auch dieser Aspekt beachtet wird (Hommes et al., 2003; Summers et al., 2005). Bei beiden ist zwar das Spektrum für das genutzte Stroh gezeigt, aber leider nur zu Kulturbeginn. Es kann so nicht bestimmt werden, ob der mit Bestandesschluss schlechter werdende repellente Effekt auf den Aufwuchs der Kulturpflanze, oder die farbliche Veränderung des Strohs zurückgeht. Summers et al. (2005) kommen zu dem Schluss, dass kein Effekt vorliegt, vergleichen den Mulch aber auch mit dem Boden und nicht Mulch und Boden mit der Pflanze. Bei Hommes et al. (2003) liegen alle Spektren vor. Ob der Effekt aber durch eine hohe Reflektion im grünen Bereich ausgelöst wird (unsichtbar machen der Pflanze) oder den erhöhten Blauanteil (repellenter Effekt), besonders gegenüber dem Salat, kann leider nicht ausgemacht werden. Döring et al. (2004) zeigten einen stark verringerten Zuflug von Aphiden bei der Verwendung von gleichen Grüntönen für Hintergrund (Folie) und Falle (gefärbte Gelbschale). In der praktischen Anwendung zeigt diese Variante der optischen Manipulation aber häufig keine signifikante Reduktion des Befalls (Hommes et al., 2003).

4.2.3 Breitbandig reflektierende Folienhintergründe

Bei der Nutzung von stark reflektierenden Folienhintergründen wird in vielen Fällen der Anteil des reflektierten UV-Lichts und des blau-violetten Spektrums verantwortlich gemacht. Daneben werden aber auch die weiteren Wellenlängen durch die reflektierenden Materialien viel stärker zurückgeworfen, was eine Interpretation der Effekte erschwert. Bei Versuchen mit Folien ergibt sich aber noch ein weiteres Versuchsproblem: Durch die Folie wird die Reflektion verändert, gleichzeitig wird aber auch die Oberfläche, im Vergleich zum offenen Boden massiv verändert, was wiederum einen Einfluss auf Polarisation der Fläche hat und als „Erdfaktor“ immer im Hinterkopf behalten werden sollte. So zeigen sich in verschie-

densten Versuchen auch schwarze Folien befallsreduzierend, ohne dass eine repellente Wellenlänge spezifisch reflektiert würde (Greer & Dole, 2003; Döring et al., 2004).

Reflektierende Silberfolien (auch "Aluminium", "Metall", "reflektierend" genannt) zeigen in vielen Versuchen einen reduzierten Zuflug von Blattläusen und Weißen Fliegen, was meist zu einer Ertragssteigerung führt (Greer & Dole, 2003; Hommes et al., 2003; Shimoda, 2018). Leider fehlt oft das Reflexionsspektrum der verwendeten Folien, was die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich spezieller Wellenlängen der Spektren erschwert. Verschiedene Silbermaterialien können sehr unterschiedliche Reflexionsspektren aufweisen (Hommes et al., 2003; Döring et al., 2004), aber fast alle zeigten einen geringeren Befall mit Blattläusen im Vergleich zu Nicht-Mulchparzellen (Döring & Chittka, 2007). Summers & Stapleton (2002) zeigten, dass reflektierende Mulchfolien die gleiche Kontrollwirkung auf den Befall mit *B. argentifolii* haben können wie Behandlungen mit dem Pestizid Imidacloprid. In einer Gewächshausstudie wurde gezeigt, dass Salatpflanzen (*Lactuca sativa* var. *crispa*) einen verringerten Befall von *T. vaporariorum* aufwiesen, wenn sie auf weißer Folie mit hoher Reflektion im blauen Spektralbereich (400 nm – 490 nm) angebaut wurden. Niemann et al. (2021) zeigten hierbei auch eine unterschiedliche Reaktion auf farbige Folien durch polyphage (*T. vaporariorum*) und monophage (*Aleyrodes proletella*, Kohlmottenschildlaus) Weiße Fliegen auf.

Bei Blattläusen sind die Ergebnisse der Studien mit weißer Folie/Mulch sehr unterschiedlich. Einige Arten werden angezogen (z. B. *Aphis gossypii*), andere werden abgestoßen (z. B. *Aphis spiraeicola*) (Adlerz & Everett, 1968; Antignus, 2000; Greer & Dole, 2003). Dies könnte mit der Wirtspflanze zusammenhängen (Döring et al., 2009). Leichte Unterschiede in der UV-Reflektion könnten jedoch theoretisch auch für den variablen Effekt verantwortlich sein.

Neben der schon angesprochenen Nutzung als anlockendes Medium, können schmalbandige blaue LEDs jedoch auch genutzt werden, um Schadinsekten vom Eindringen in geschützte Bereiche (beispielsweise Gewächshaus) abzuhalten, oder die Besiedelung von Kulturpflanzenbeständen zu verringern. Aus der universitären Forschung zu dem Themenkomplex gingen zwei Patente hervor (Rakoski & Stukenberg, 2019; Niemann, 2019).

4.3 Störung von Orientierung und Flugaktivität durch Ausschluss von UV-Licht

Folientunnel die UV-Licht von oben ausschließen sind eine relativ gut erforschte Methode zur optischen Manipulation. Die Materialien blocken im Allgemeinen Strahlung >350 nm bis 400 nm (je nach Studie, siehe Diaz & Fereres, 2007). Durch die fehlende UV-Strahlung von oben wird die Orientierung (dorsale Lichtreaktion) der Herbivoren gestört und sie fliegen weiter. Gulidov & Poehling (2013) zeigten, dass so der Befall mit *Aleyrodes proletella* und *B. brassicae* an Rosenkohl deutlich gesenkt werden konnte, wohingegen die Parasitierungsraten durch natürliche Gegenspieler konstant blieben. Doukas & Payne (2007) zeigten für *T. vaporariorum*, dass auch Unterschiede von 10 nm wahrgenommen werden

können. Ähnliche Ergebnisse zeigen eine Studie von Chyzik et al. (2003) auf, in der *M. persicae* und ihr Parasit *Aphidius matricariae* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae) untersucht wurden. In Studien von Antignus et al. (1996; 2001) konnte der Befall mit *B. tabaci*, *F. occidentalis* und *L. trifolii* so stark gesenkt werden, dass 50-80 % weniger Insektizidapplikationen nötig waren. Legarrea et al. (2012b) zeigten, dass UV-absorbierende Folien den Aphidenbefall (*Macrosiphum euphorbiae*, *Acyrtosiphum lactucae*) und den Thripsbefall (*F. occidentalis*) in Salat senken konnten. Die Zahl der verkaufsfähigen Pflanzen stieg durch den gesenkten Aphidenbefall und verringerten Virusbefall an. Ein Effekt wurde auch auf *Autographa gamma* (Gammaeule) nachgewiesen, ein Effekt auf *T. vaporariorum* konnte in diesem Fall nicht festgestellt werden. Mutwiwa et al. (2005) zeigten, dass *T. vaporariorum* UV-defiziente Bereiche stark meidet.

UV-blockende Kulturschutznetzte sind eine weitere Möglichkeit des UV-Ausschlusses von oben. In einer Studie von Legarrea et al. (2012c) wurde gezeigt, dass der Befall mit Weißen Fliegen (*B. tabaci*) gesenkt und deren Ausbreitung unter dem Netz verringert werden konnte. Ein ähnlicher Effekt auf die beiden untersuchten Aphidenarten *M. euphorbiae* und *M. persicae* konnte hier nicht nachgewiesen werden. Kumar & Poehling (2006) und Nguyen & Nansen (2018) zeigten für *B. tabaci*, *Ceratothripoides claratris* und *A. gossypii*, dass der Effekt von Folien deutlich über dem von Netzen liegt, zurückzuführen auf die Maschenweite der Netze, die die UV-Transmission erhöhen. Kigathi & Poehling (2012) zeigten vergleichbare Vermeidungseffekte für UV defiziente Bereiche für *F. occidentalis* bei der Verwendung von UV absorbierenden Folien oder Netzen.

Studien, die künstliche Lichtquellen zur Verschiebung des UV-Verhältnisses verwenden, sind selten. Mutwiwa & Tantau (2005) zeigten eine erhöhte Anzahl von *T. vaporariorum* in Wahlversuchen unter Verwendung von UV-emittierenden Fluoreszenzlampen. Die Autoren konnten keine Publikation finden, in der das UV-Verhältnis durch vom Boden aus emittierende Lichtquellen verschoben wird, um Schadinsektenarten zu vertreiben.

5 Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die optische Manipulation von Schadinsekten und die Erforschung ihrer zugrundeliegenden Mechanismen einen fundamentalen Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes darstellt. Es besteht jedoch bei vielen Schadinsekten Forschungsbedarf, um mögliche Anwendungen zu identifizieren. Ein großer Vorteil der Methode der optischen Manipulation von Schadinsekten liegt darin, dass die Maßnahme mit einigen Ausnahmen mit allen weiteren denkbaren Maßnahmen (physikalisch, biologisch, chemisch) des integrierten und biologischen Pflanzenschutzes kompatibel ist. Besonders sensibel ist hier allerdings der Einsatz von Nützlingen, die ebenfalls beeinflusst werden können. Diese sollten in Versuchen zu Kultursystemen immer einbezogen werden.

Besonders für konventionell produzierende Betriebe ist durch integrierte Maßnahmen wie der optischen Manipulation eine

starke Reduzierung der benötigten Pflanzenschutzmittelmenge möglich ohne auf die gewohnte Möglichkeit zu verzichten im Notfall chemisch einzugreifen. Wir denken, dass hier ein besonders großes Einsparpotenzial liegt.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren/die Autorinnen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- Adlerz, W.C. und P.H. Everett, 1968:** Aluminum Foil and White Polyethylene Mulches to Repel Aphids and Control Watermelon Mosaic. *Journal of Economic Entomology* **61** (5), 1276–1279, DOI: 10.1093/jee/61.5.1276.
- Affeldt, H.A., R.W. Thimijan, F.F. Smith, R.E. Webb, 1983:** Response of the Greenhouse Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) and the Vegetable Leafminer (Diptera: Agromyzidae) to Photospectra. *Journal of Economic Entomology* **76** (6), 1405–1409, DOI: 10.1093/jee/76.6.1405.
- Antignus, Y., 2000:** Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. *Virus research* **71** (1-2), 213–220, DOI: 10.1016/S0168-1702(00)00199-4.
- Antignus, Y., D. Ben-Yakir, 2004:** Ultraviolet-Absorbing Barriers, an Efficient Integrated Pest Management Tool to Protect Greenhouses from Insects and Virus Diseases. In: Horowitz, A.R., I. Ishaaya (Hrsg.) *Insect pest management: Field and protected crops*. Berlin, London, Springer, S. 319–335, DOI: 10.1007/978-3-662-07913-3.
- Antignus, Y., N. Mor, R. Ben J., M. Lapidot, S. Cohen, 1996:** Ultraviolet-Absorbing Plastic Sheets Protect Crops from Insect Pests and from Virus Diseases Vected by Insects. *Environmental Entomology* **25** (5), 919–924, DOI: 10.1093/ee/25.5.919.
- Antignus, Y., D. Nestel, S. Cohen, M. Lapidot, 2001:** Ultraviolet-Deficient Greenhouse Environment Affects Whitefly Attraction and Flight-Behavior. *Environmental Entomology* **30** (2), 394–399, DOI: 10.1603/0046-225X-30.2.394.
- Arshavsky, V.Y., 2003:** Protein translocation in photoreceptor light adaptation: a common theme in vertebrate and invertebrate vision. *Science Signaling* **2003** (204), pe43, DOI: 10.1126/stke.2003.204.pe43.
- Böckmann, E., M. Hommes, R. Meyhöfer, 2015:** Yellow traps reloaded: what is the benefit for decision making in practice? *Journal of Pest Science* **88** (2), 439–449, DOI: 10.1007/s10340-014-0601-7.
- Böckmann, E., R. Meyhöfer, 2017:** Sticky trap monitoring of a pest-predator system in glasshouse tomato crops: are available trap colours sufficient? *Journal of Applied Entomology* **141** (5), 339–351, DOI: 10.1111/jen.12338.
- Böckmann, E., A. Pfaff, M. Schirrmann, M. Pflanz, 2021:** Rapid and low-cost insect detection for analysing species trapped on yellow sticky traps. *Scientific reports* **11** (1), 10419, DOI: 10.1038/s41598-021-89930-w.
- Briscoe, A.D., L. Chittka, 2001:** The evolution of color vision in insects. *Annual Review of Entomology* **46**, 471–510, DOI: 10.1146/annurev.ento.46.1.471.
- Burgio, G., H.L. Kristensen, G. Campanelli, F. Bavec, M. Bavec, P. von Fragstein, Niemsdorff, L. Depalo, A. Lanzoni, S. Canali, G. Rahmann, U. Aksoy, 2014:** Effect of living mulch on pest/beneficial interaction. *Building Organic Bridges* **20** (1), DOI: 10.3220/REP_20_1_2014.
- Butler, C.G., 1938:** On the ecology of *Aleurodes brassicae* Walk. (Homoptera). *Transactions of the Royal Entomological Society of London* **87** (13), 291–311, DOI: 10.1111/j.1365-2311.1938.tb00090.x.
- Castle, S.J., 2006:** Concentration and management of *Bemisia tabaci* in cantaloupe as a trap crop for cotton. *Crop Protection* **25** (6), 574–584, DOI: 10.1016/j.cropro.2005.08.013.
- Castresana, J.E., L.E. Puhl, 2016:** Eficacia de diferentes diodos emisores de luz (LEDs) unidos a trampas adhesivas amarillas para la captura de la mosca blanca *Trialeurodes vaporariorum*. *Revista de Ciencias Agrícolas* **32** (2), 88, DOI: 10.22267/rcia.153202.16.
- Chen, T., C. Chu, T. Henneberry, K. Umeda, 2004:** Monitoring and trapping insects on poinsettia with yellow sticky card traps equipped with light-emitting diodes. *Horttechnology* **14** (3), 337–341, DOI: 10.21273/HORTTECH.14.3.0337.
- Chittka, L., 1996:** Optimal Sets of Color Receptors and Color Opponent Systems for Coding of Natural Objects in Insect Vision. *Journal of Theoretical Biology* **181** (2), 179–196, DOI: 10.1006/jtbi.1996.0124.
- Chu, C.C., T. Y. Chen, A. M. Simmons, P. J. Alexander, T. J. Henneberry, 2004a:** Development of Light-Emitting Diode (LED) Equipped Insect Traps for Monitoring Pest Insects in Greenhouses and Fields, 2001-2004, DOI: 10.22004/AG.ECON.256190.
- Chu, C.C., A.M. Simmons, T.Y. Chen, P.J. Alexander, T.J. Henneberry, 2004b:** Lime green Light-Emitting-Diode equipped yellow sticky cards for monitoring whiteflies, aphids and fungus gnats in greenhouses. *Insect Science* **11** (2), 125–133, DOI: 10.1111/j.1744-7917.2004.tb00186.x.
- Chyzik, R., S. Dobrinin, Y. Antignus, 2003:** Effect of a UV-deficient environment on the biology and flight activity of *Myzus persicae* and its hymenopterous parasite *Aphidius matricariae*. *Phytoparasitica* **31** (5), 467–477, DOI: 10.1007/BF02979740.
- Coombe, P.E., 1981:** Wavelength specific behaviour of the whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Journal of Comparative Physiology* **144** (1), 83–90, DOI: 10.1007/BF00612801.
- Costello, M., 1995a:** Abundance, growth rate and parasitism of *Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae) on broccoli grown in living mulches. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **52** (2-3), 187–196, DOI: 10.1016/0167-8809(94)00535-M.

- Costello, M.J., 1995b:** Spectral reflectance from a broccoli crop with vegetation or soil as background: influence on immigration by *Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae*. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **75** (2), 109–118, DOI: 10.1111/j.1570-7458.1995.tb01916.x.
- Cronin, T.W., S. Johnsen, N. J. Marshall, E. J. Warrant, 2014:** *Visual Ecology*. Princeton, USA, Princeton University Press.
- Dáder, B., A. Moreno, D. Gwynn-Jones, A. Winters, A. Ferreres, 2017:** Aphid orientation and performance in glasshouses under different UV-A/UV-B radiation regimes. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **163** (3), 344–353, DOI: 10.1111/eea.12583.
- De Barro, P.J., 1991:** Attractiveness of four colours of traps to cereal Aphids (Hemiptera: Aphididae) in south Australia. *Australian Journal of Entomology* **30** (4), 263–264, DOI: 10.1111/j.1440-6055.1991.tb00431.x.
- Díaz, B.M., A. Ferreres, 2007:** Ultraviolet-Blocking Materials as a Physical Barrier to Control Insect Pests and Plant Pathogens in Protected Crops. *Pest Technology* **1** (2), 85–95.
- Díaz, B.M., R. Biurrún, A. Moreno, M. Nebreda, A. Ferreres, 2006:** Impact of Ultraviolet-blocking Plastic Films on Insect Vectors of Virus Diseases Infesting Crisp Lettuce. *HortScience* **41** (3), 711–716, DOI: 10.21273/HORTSCI.41.3.711.
- Dixon, A.F.G., 2012:** Host specificity and speciation. In: Dixon, A.F.G. (Hrsg.). *Aphid Ecology An optimization approach*, Dordrecht, Springer Netherlands, S. 27–58, DOI: 10.1007/978-94-011-5868-8.
- Döring, T.F., 2014:** How aphids find their host plants, and how they don't. *Annals of Applied Biology* **165** (1), 3–26, DOI: 10.1111/aab.12142.
- Döring, T.F., M. Archetti, J. Hardie, 2009:** Autumn leaves seen through herbivore eyes. *Proceedings. Biological sciences* **276** (1654), 121–127, DOI: 10.1098/rspb.2008.0858.
- Döring, T.F., L. Chittka, 2007:** Visual ecology of aphids—a critical review on the role of colours in host finding. *Arthropod-Plant Interactions* **1** (1), 3–16, DOI: 10.1007/s11829-006-9000-1.
- Döring, T.F., S.M. Kirchner, S. Kühne, H. Saucke, 2004:** Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **113** (1), 53–61, DOI: 10.1111/j.0013-8703.2004.00208.x.
- Döring, T.F., S.M. Kirchner, P. Skorupsky, J. Hardie, 2011:** Spectral sensitivity of the green photoreceptor of winged pea aphids. *Physiological Entomology* **36** (4), 392–396, DOI: 10.1111/j.1365-3032.2011.00805.x.
- Döring, T.F., K. Röhrig, 2016:** Behavioural response of winged aphids to visual contrasts in the field. *Annals of Applied Biology* **168** (3), 421–434, DOI: 10.1111/aab.12273.
- Döring, T.F., M. Skellern, N. Watts, S.M. Cook, 2012:** Colour choice behaviour in the pollen beetle *Meligethes aeneus* (Coleoptera: Nitidulidae). *Physiological Entomology* **37** (4), 360–378, DOI: 10.1111/j.1365-3032.2012.00850.x.
- Döring, T.F., J. Spaethe, 2009:** Messungen der Augengröße und Sehschärfe bei Blattläusen (Hemiptera: Aphididae). *Entomologia Generalis* **32** (2), 77–84, DOI: 10.1127/entom.gen/32/2009/77.
- Doukas, D., C.C. Payne, 2007:** Greenhouse Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) Dispersal Under Different UV-Light Environments. *Journal of Economic Entomology* **100** (2), 389–397, DOI: 10.1093/jee/100.2.389.
- El-Fakharany, S., M.A. Samy, S.A. Ahmed, M.A. Khattab, 2012:** Effect of intercropping of maize, bean, cabbage and toxicants on the population levels of some insect pests and associated predators in sugar beet plantations. *The Journal of Basic & Applied Zoology* **65** (1), 21–28, DOI: 10.1016/j.jobaz.2012.02.002.
- Farnier, K., A.G. Dyer, M.J. Steinbauer, 2014:** Related but not alike: not all Hemiptera are attracted to yellow. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2**, 263, DOI: 10.3389/fevo.2014.00067.
- Finch, S., R.H. Collier, 2000:** Host-plant selection by insects – a theory based on ‘appropriate/inappropriate landings’ by pest insects of cruciferous plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **96** (2), 91–102, DOI: 10.1046/j.1570-7458.2000.00684.x.
- Foster, D. H., 2011:** Color constancy. *Vision Research* **51** (7), 674–700, DOI: 10.1016/j.visres.2010.09.006.
- Frank, D.L., O.E. Liburd, 2005:** Effects of Living and Synthetic Mulch on the Population Dynamics of Whiteflies and Aphids, Their Associated Natural Enemies, and Insect-Transmitted Plant Diseases in Zucchini. *Environmental Entomology* **34** (4), 857–865, DOI: 10.1603/0046-225X-34.4.857.
- Gill, H.K., R. McSorley, 2010:** Integrated impact of soil solarization and organic mulching on weeds, insects, nematodes, and plant performance. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society* **123**, 308–311.
- Goodman, L.J., 1965:** The Role of Certain Optomotor Reactions in Regulating Stability in the Rolling Plane During Flight in the Desert Locust, *Schistocerca Gregaria*. *Journal of Experimental Biology* **42** (3), 385–407.
- Govardovskii, V.I., N. Fyhrquist, T. Reuter, D.G. Kuzmin, K. Donner, 2000:** In search of the visual pigment template. *Visual Neuroscience* **17** (4), 509–528, DOI: 10.1017/s0952523800174036.
- Greer, L., J.M. Dole, 2003:** Aluminum Foil, Aluminium-painted, Plastic, and Degradable Mulches Increase Yields and Decrease Insectvectored Viral Diseases of Vegetables. *HortTechnology* **13** (2), 276–284, DOI: 10.21273/HORTTECH.13.2.0276.
- Gulidov, S., H.-M. Poehling, 2013:** Control of aphids and whiteflies on Brussels sprouts by means of UV-absorbing plastic films. *Journal of Plant Diseases and Protection* **120** (3), 122–130, DOI: 10.1007/BF03356463.
- Hardie, J., 1989:** Spectral specificity for targeted flight in the black bean aphid, *Aphis fabae*. *Journal of insect physiology* **35** (8), 619–626, DOI: 10.1016/0022-1910(89)90124-8.
- Hommes, M., G. Siekmann, O. Piepenbrock, U. Baur, A. Fricke, T. Thieme, 2003:** Reduzierung des Blattlausbefalls

- an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben: Reducing aphid infestations in selected field vegetables with mulches of different materials and colours. **2003**, URL: <https://orgprints.org/16630/1/16630-02OE097-ble-jki-2003-blattlausbefall.pdf>. Zugriff: 14. Juli 2020.
- Hooks, C.R.R., A. Fereres, 2006:** Protecting crops from non-persistently aphid-transmitted viruses: a review on the use of barrier plants as a management tool. *Virus research* **120** (1-2), 1–16, DOI: 10.1016/j.virusres.2006.02.006.
- IOBC-WPRS, IBMA, PAN-Europe, 2019:** Integrated Pest Management: Working with Nature, URL: https://www.iobc-wprs.org/index_news_Resouces_on_IPM.html. Zugriff: 11. Februar 2020.
- Johansen, N.S., I. Vänninen, D.M. Pinto, A.I. Nissinen, L. Shipp, 2011:** In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. *Annals of Applied Biology* **159** (1), 1–27, DOI: 10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x.
- Kelber, A., D. Osorio, 2010:** From spectral information to animal colour vision: experiments and concepts. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **277** (1688), 1617–1625, DOI: 10.1098/rspb.2009.2118.
- Kelber, A., M. Vorobyev, D. Osorio, 2003:** Animal colour vision – behavioural tests and physiological concepts. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society* **78** (1), 81–118, DOI: 10.1017/S1464793102005985.
- Kemp, D.J., M.E. Herberstein, L.J. Fleishman, J.A. Endler, A.T.D. Bennett, A.G. Dyer, N.S. Hart, J. Marshall, M.J. Whiting, 2015:** An integrative framework for the appraisal of coloration in nature. *The American Naturalist* **185** (6), 705–724, DOI: 10.1086/681021.
- Kennedy, J.S., C.O. Booth, W.J. Kershaw, 1961:** Host finding by aphids in the field. *Annals of Applied Biology* **49** (1), 1–21, DOI: 10.1111/j.1744-7348.1961.tb03587.x.
- Kigathi, R., H.-M. Poehling, 2012:** UV-absorbing films and nets affect the dispersal of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). *Journal of Applied Entomology* **136** (10), 761–771, DOI: 10.1111/j.1439-0418.2012.01707.x.
- Kim, S., U.T. Lim, 2011:** Evaluation of a modified sticky card to attract *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and a behavioural study on their visual response. *Crop Protection* **30** (4), 508–511, DOI: 10.1016/j.cropro.2010.12.016.
- Kirchner, S.M., T.F. Döring, H. Saucke, 2005:** Evidence for trichromacy in the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae). *Journal of insect physiology* **51** (11), 1255–1260, DOI: 10.1016/j.jinsphys.2005.07.002.
- Kirchner, S.M., L.H. Hiltunen, J. Santala, T.F. Döring, J. Ketola, A. Kankaala, E. Virtanen, J.P.T. Valkonen, 2014:** Comparison of Straw Mulch, Insecticides, Mineral Oil, and Birch Extract for Control of Transmission of Potato virus Y in Seed Potato Crops. *Potato Research* **57** (1), 59–75, DOI: 10.1007/s11540-014-9254-4.
- Klowden, M.J., 2009:** Oviposition Behavior. In: Resh, V.H., R.T. Cardé (Hrsg.). *Encyclopedia of insects*, Amsterdam, Academic Press, S. 745–747.
- Kumar, P., H.-M. Poehling, 2006:** UV-blocking Plastic Films and Nets Influence Vectors and Virus Transmission on Greenhouse Tomatoes in the Humid Tropics. *Environmental Entomology* **35** (4), 1069–1082, DOI: 10.1603/0046-225X-35.4.1069.
- Land, M.F., 1997:** Visual acuity in insects. *Annual Review of Entomology* **42**, 147–177, DOI: 10.1146/annurev.ento.42.1.147.
- Larentzaki, E., J. Plate, B.A. Nault, A.M. Shelton, 2008:** Impact of Straw Mulch on Populations of Onion Thrips (Thysanoptera: Thripidae) in Onion. *Journal of Economic Entomology* **101** (4), 1317–1324, DOI: 10.1093/jee/101.4.1317.
- Laughlin, S.B., 1989:** The role of sensory adaptation in the retina. *Journal of Experimental Biology* **146**, 39–62.
- Laughlin, S.B., R.C. Hardie, 1978:** Common strategies for light adaptation in the peripheral visual systems of fly and dragonfly. *Journal of Comparative Physiology A* **128** (4), 319–340, DOI: 10.1007/BF00657606.
- Lazzari, C.R., D. Fischbein, T.C. Insausti, 2011:** Differential control of light-dark adaptation in the ocelli and compound eyes of *Triatoma infestans*. *Journal of Insect Physiology* **57** (11), 1545–1552, DOI: 10.1016/j.jinsphys.2011.08.005.
- Legarrea, S., M. Betancourt, M. Plaza, A. Fraile, F. García-Arenal, A. Fereres, 2012a:** Dynamics of nonpersistent aphid-borne viruses in lettuce crops covered with UV-absorbing nets. *Virus research* **165** (1), 1–8, DOI: 10.1016/j.virusres.2011.12.012.
- Legarrea, S., B.M. Diaz, M. Plaza, L. Barrios, I. Morales, E. Viñuela, A. Fereres, 2012b:** Diminished UV radiation reduces the spread and population density of *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas) [Hemiptera: Aphididae] in lettuce crops. *Horticultural Science* **39** (No. 2), 74–80, DOI: 10.17221/79/2011-HORTSCI.
- Legarrea, S., P.G. Weintraub, M. Plaza, E. Viñuela, A. Fereres, 2012c:** Dispersal of aphids, whiteflies and their natural enemies under photoselective nets. *BioControl* **57** (4), 523–532, DOI: 10.1007/s10526-011-9430-2.
- Lloyd, L., 1921:** Notes on a colour tropism of *Asterochiton* (Aleurodes) *Vaporariorum*, Westwood. *Bulletin of Entomological Research* **12** (03), 355, DOI: 10.1017/S0007485300040220.
- Lu, Y., Y. Bei, J. Zhang, 2012:** Are yellow sticky traps an effective method for control of sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*, in the greenhouse or field? *Journal of Insect Science* **12**, 113, DOI: 10.1673/031.012.11301.
- Matteson, N., I. Terry, A. Ascoli-Christensen, C. Gilbert, 1992:** Spectral efficiency of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*. *Journal of insect physiology* **38** (6), 453–459, DOI: 10.1016/0022-1910(92)90122-T.
- Mellor, H.E., J. Bellingham, M. Anderson, 1997:** Spectral efficiency of the glasshouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* and *Encarsia formosa* its hymenopteran parasitoid.

- Entomologia Experimentalis et Applicata **83** (1), 11–20, DOI: 10.1046/j.1570-7458.1997.00152.x.
- Moericke, V., 1955:** Über die Lebensgewohnheiten der geflügelten Blattläuse (Aphidina) unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens beim Landen. Zeitschrift für Angewandte Entomologie **37** (1), 29–91, DOI: 10.1111/j.1439-0418.1955.tb00775.x.
- Moericke, V., 1969:** Hostplant specific colour behaviour by *Hyalopterus Pruni* (Aphididae). Entomologia Experimentalis et Applicata **12** (5), 524–534, DOI: 10.1111/j.1570-7458.1969.tb02550.x.
- Moericke, V., H. Schneiders, B. Vogt, 1966:** Flughemmung und Fallreflexhaltung als Reaktion auf Gelbreiz bei *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood). Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **73**, 6–14.
- Möller, R., 2002:** Insects could exploit UV-green contrast for Landmark navigation. Journal of Theoretical Biology **214** (4), 619–631, DOI: 10.1006/jtbi.2001.2484.
- Mutwiwa, U.N., C. Borgemeister, B.v. Elsner, H.-J. Tantau, 2005:** Effects of UV-absorbing plastic films on greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). Journal of Economic Entomology **98** (4), 1221–1228, DOI: 10.1603/0022-0493-98.4.1221.
- Mutwiwa, U.N., H.J. Tantau, 2005:** Suitability of a UV Lamp for Trapping the Greenhouse Whitefly *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hom: Aleyrodidae). Commission of Agricultural Engineering (CIGR, Commission Internationale du Genie Rural) Ejournal. Vol. VII. Manuscript BC 05 004.
- Naka, K.I., W.A.H. Rushton, 1966:** An attempt to analyse colour reception by electrophysiology. The Journal of Physiology **185**, 556–586.
- Natwick, E.T., J.A. Byers, C.-C. Chu, M. Lopez, T.J. Henneberry, 2007:** Early Detection and Mass Trapping of *Frankliniella occidentalis* 1, and *Thrips tabaci* 1 in Vegetable Crops. Southwestern Entomologist **32** (4), 229–238, DOI: 10.3958/0147-1724-32.4.229.
- Nguyen, H.D.D., C. Nansen, 2018:** Edge-biased distributions of insects. A review. Agronomy for Sustainable Development **38** (1), DOI: 10.1007/s13593-018-0488-4.
- Niemann, J.-U., 2019:** Vorrichtung zum Schutz grüner Pflanzen vor pflanzenschädigenden Insekten. Patent-Nr: DE102019220286A1
- Niemann, J.-U., M. Menssen, H.-M. Poehling, 2021:** Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils. Journal of Plant Diseases and Protection **128** (1), 97–108, DOI: 10.1007/s41348-020-00394-y.
- Ohnesorge, B., G. Rapp, 1986:** Monitoring *Bemisia tabaci*: A review. Agriculture, Ecosystems & Environment **17** (1-2), 21–27, DOI: 10.1016/0167-8809(86)90023-X.
- Otieno, J.A., N. Stukenberg, J. Weller, H.-M. Poehling, 2018:** Efficacy of LED-enhanced blue sticky traps combined with the synthetic lure Lurem-TR for trapping of western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*). Journal of Pest Science **91** (4), 1301–1314, DOI: 10.1007/s10340-018-1005-x.
- Pinto-Zevallos, D.M., I. Vänninen, 2013:** Yellow sticky traps for decision-making in whitefly management: What has been achieved? Crop Protection **47**, 74–84, DOI: 10.1016/j.cropro.2013.01.009.
- Prokopy, R.J., E.D. Owens, 1983:** Visual Detection of Plants by Herbivorous Insects. Annual Review of Entomology **28** (1), 337–364, DOI: 10.1146/annurev.en.28.010183.002005.
- Qiao, M., J. Lim, C.W. Ji, B.-K. Chung, H.-Y. Kim, K.-B. Uhm, C.S. Myung, J. Cho, T.-S. Chon, 2008:** Density estimation of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in a greenhouse using sticky traps in conjunction with an image processing system. Journal of Asia-Pacific Entomology **11** (1), 25–29, DOI: 10.1016/j.aspen.2008.03.002.
- Rakoski, M., N. Stukenberg, 2019:** Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten. Patent-Nr.: DE10 2018 208 424.6
- Röth, F., Z. Galli, M. Tóth, J. Fail, G. Jenser, 2016:** The hypothesized visual system of *Thrips tabaci* Lindeman and *Frankliniella occidentalis* (Pergande) based on different coloured traps' catches. North-Western Journal of Zoology **12** (1), 40–49.
- Rustia, D.J.A., J.-J. Chao, L.-Y. Chiu, Y.-F. Wu, J.-Y. Chung, J.-C. Hsu, T.-T. Lin, 2021:** Automatic greenhouse insect pest detection and recognition based on a cascaded deep learning classification method. Journal of Applied Entomology **145** (3), 206–222, DOI: 10.1111/jen.12834.
- Sampson, C., A.D. Covaci, J.G.C. Hamilton, N. Hassan, S. Al-Zaidi, W.D.J. Kirk, 2018:** Reduced translucency and the addition of black patterns increase the catch of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*, on yellow sticky traps. PloS one **13** (2), e0193064, DOI: 10.1371/journal.pone.0193064.
- Saucke, H., T.F. Döring, 2004:** Potato virus Y reduction by straw mulch in organic potatoes. Annals of Applied Biology **144** (3), 347–355.
- Scherer, C., G. Kolb, 1987:** Behavioral experiments on the visual processing of color stimuli in *Pieris brassicae* L. (Lepidoptera). Journal of Comparative Physiology A **160** (1), 645–656.
- Shimoda, M., 2018:** Recent advances in the optical control of insect pests using light and color: Special Publication of TARI No. 215, 87–102.
- Shimoda, M., K.-I. Honda, 2013:** Insect reactions to light and its applications to pest management. Applied Entomology and Zoology **48** (4), 413–421, DOI: 10.1007/s13355-013-0219-x.
- Skorupski, P., L. Chittka, 2011:** Is colour cognitive? Optics & Laser Technology **43** (2), 251–260, DOI: 10.1016/j.optlas-tec.2008.12.015.
- Smith, H.A., R. McSorley, 2000:** Potential of Field Corn as a Barrier Crop and Eggplant as a Trap Crop for Management of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) on Common Bean in North Florida. The Florida Entomologist **83** (2), 145, DOI: 10.2307/3496150.

- Smith, J.G., 1976:** Influence of crop background on aphids and other phytophagous insects on Brussels sprouts. *Annals of Applied Biology* **83** (1), 1–13, DOI: 10.1111/j.1744-7348.1976.tb01689.x.
- Spaethe, J., L. Chittka, 2003:** Interindividual variation of eye optics and single object resolution in bumblebees. *The Journal of experimental biology* **206** (Pt 19), 3447–3453, DOI: 10.1242/jeb.00570.
- Stavenga, D.G., R.P. Smits, B.J. Hoenders, 1993:** Simple exponential functions describing the absorbance bands of visual pigment spectra. *Vision Research* **33** (8), 1011–1017.
- Straw, N.A., D.T. Williams, G. Green, 2011:** Influence of sticky trap color and height above ground on capture of alate *Elatobium abietinum* (Hemiptera: Aphididae) in Sitka spruce plantations. *Environmental entomology* **40** (1), 120–125, DOI: 10.1603/EN09344.
- Stukenberg, N., 2018:** LED based trapping of whiteflies and fungus gnats: from visual ecology to application. PhD Thesis, DOI: 10.15488/4144.
- Stukenberg, N., N. Ahrens, H.-M. Poehling, 2018:** Visual orientation of the black fungus gnat, *Bradysia difformis*, explored using LEDs. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **166** (2), 113–123, DOI: 10.1111/eea.12652.
- Stukenberg, N., K. Gebauer, H.-M. Poehling, 2015:** Light emitting diode(LED)-based trapping of the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). *Journal of Applied Entomology* **139** (4), 268–279, DOI: 10.1111/jen.12172.
- Stukenberg, N., M. Pietruska, A. Waldherr, R. Meyhöfer, 2020:** Wavelength-Specific Behavior of the Western Flower Thrips (*Frankliniella occidentalis*): Evidence for a Blue-Green Chromatic Mechanism. *Insects* **11** (7), DOI: 10.3390/insects11070423.
- Stukenberg, N., H.-M. Poehling, 2019:** Blue–green opponency and trichromatic vision in the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) explored using light emitting diodes. *Annals of Applied Biology* **175** (2), 146–163, DOI: 10.1111/aab.12524.
- Summers, C.G., J.P. Mitchell, J.J. Stapleton, 2005:** Mulches reduce aphid-borne viruses and whiteflies in cantaloupe. *California Agriculture* **59** (2), 90–94, DOI: 10.3733/ca.v059n02p90.
- Summers, C.G., J.J. Stapleton, 2002:** Use of UV reflective mulch to delay the colonization and reduce the severity of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) infestations in cucurbits. *Crop Protection* **21** (10), 921–928, DOI: 10.1016/S0261-2194(02)00067-4.
- Vaishampayan, S.M., G.P. Waldbauer, M. Kogan, 1975b:** Visual and olfactory responses in orientation to plants by the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata* **18** (4), 412–422, DOI: 10.1111/j.1570-7458.1975.tb00418.x.
- Vaishampayan, S.M., M. Kogan, G.P. Waldbauer, J.T. Wooley, 1975a:** Spectral specific responses in the visual behaviour of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Entomologia Experimentalis et Applicata* **18** (3), 344–356, DOI: 10.1111/j.1570-7458.1975.tb00407.x.
- van Tol, R.W.H.M., J. Tom, M. Roher, A. Schreurs, C. van Dooremalen, 2021:** Haze of glue determines preference of western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*) for yellow or blue traps. *Scientific reports* **11** (1), 6557, DOI: 10.1038/s41598-021-86105-5.
- Warrant, E., D.-E. Nilsson (Hrsg.), 2006:** *Invertebrate Vision*, New York, USA, Cambridge University Press.
- Xia, C., J.-M. Lee, B.-K. Chung, T.-S. Chon, 2012:** *In situ* detection of small-size insect pests sampled on traps using multifractal analysis. *Optical Engineering* **51** (2), 27001, DOI: 10.1117/1.OE.51.2.027001.
- Yeh, N., J.-P. Chung, 2009:** High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13** (8), 2175–2180, DOI: 10.1016/j.rser.2009.01.027.
- Zhang, J., H. Li, M. Liu, H. Zhang, H. Sun, H. Wang, L. Miao, M. Li, R. Shu, Q. Qin, 2020:** A Greenhouse Test to Explore and Evaluate Light-Emitting Diode (LED) Insect Traps in the Monitoring and Control of *Trialeurodes vaporariorum*. *Insects* **11** (2), DOI: 10.3390/insects11020094.

Jan-Uwe Niemann^{1,2}, Max Menssen³, Hans-Michael Poehling¹

Reducing initial aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films

Reduzierung des Initialbefalls durch Aphiden unter Nutzung von gefärbten Mulchfolien und neu entwickelten bioabbaubaren Sprühfilmen

Affiliation

¹Leibniz University Hannover, Institute of Horticultural Production Systems, Department of Phytomedicine, Hannover, Germany.

²Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Application Techniques in Plant Protection, Braunschweig, Germany.

³Leibniz University Hannover, Institute of Cell Biology and Biophysics, Department of Biostatistics, Hannover, Germany.

Correspondence

Jan-Uwe Niemann, Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Application Techniques in Plant Protection, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, Germany, email: jan-uwe.niemann@julius-kuehn.de

Abstract

A newly invented biodegradable sprayable film based on renewable raw materials was modified in colour to reduce the landing and settlement of alate aphids (*Macrosiphum euphorbiae*, *Nasonovia ribisnigri*) on iceberg lettuce (*Lactuca sativa* L., var. *crispa*). The sprayable films were compared with green and black conventional PE-foils and the cultivation on bare soil. In field trials, migration and host settlement of insect pests were investigated with special consideration of colour contrasts and light reflection. The lettuce was evaluated for alate aphid infestation at the time of initial infestation and at the time of harvest. The aim was to reduce the initial infestation number with alate individuals and to minimize the demand for additional intervening measurements for plant protection. The black-grey spray film led to reduced numbers of aphids at initial infestation date. Evaluation at harvest time shows the need of secondary measurements for reliable pest control. The quality of the lettuce heads was not negatively affected by the spray treatment.

Keywords

integrated pest management, currant-lettuce aphid, renewable resources, colour-contrast, wavelength-dependent behaviour

Zusammenfassung

Eine neu entwickelte, biologisch abbaubare, sprühfähige Folie auf Basis nachwachsender Rohstoffe wurde farblich modifiziert, um den Zuflug und die Ansiedlung von Blattläusen (*Macrosiphum euphorbiae*, *Nasonovia ribisnigri*) auf Eisbergsalat (*Lactuca sativa*, var. *crispa*) zu reduzieren. Die sprühfähigen Folien wurden mit grünen und schwarzen konventionellen PE-Folien und dem Anbau auf Boden verglichen.

In Feldversuchen wurden der Zuflug und die Ansiedlung von Schadinsekten unter besonderer Berücksichtigung von Farbkontrasten und Lichtreflexion untersucht. Der Salat wurde auf den Befall mit Blattläusen zum Zeitpunkt des Erstbefalls und zum Zeitpunkt der Ernte untersucht. Ziel war es, den Erstbefall mit Blattläusen zu reduzieren und den Bedarf an zusätzlichen Maßnahmen zum Pflanzenschutz zu minimieren. Der schwarzgraue Sprühfilm führte zu einer reduzierten Anzahl von Blattläusen zum Zeitpunkt des Erstbefalls. Die Auswertung zum Erntezeitpunkt zeigt die Notwendigkeit von zusätzlichen Maßnahmen für eine zuverlässige Schädlingsbekämpfung. Die Qualität der Salatköpfe wurde durch die Sprühfolien nicht negativ beeinflusst.

Stichwörter

integrierter Pflanzenschutz, Johannisbeerblattlaus, nachwachsende Rohstoffe, Farbkontrast, wellenlängenabhängiges Verhalten

Introduction

Aphids are one of the economically most important pest groups in the cultivation of plants. Since the population to be observed in the field is always based on immigrated individuals, control of initial infestation is the basis for restriction of population built up. Due to the exponential and fast growth of an aphid population, a large population quickly develops from single immigrated individuals.

The currant-lettuce aphid *Nasonovia ribisnigri* is the most common aphid species (Sternorrhyncha: Hemiptera) in lettuce cultivation (Reinink & Dieleman, 1993; Hommes et al., 2003) and is difficult to control with chemical and biological methods, especially due to its cryptic habitat in lettuce inner leaves. However, there are also populations with high



(c) The author(s) 2022

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

resistance to various insecticides (Rufingier et al., 1997; Kift et al., 2004). It is known to infest more than 160 plant species from 15 different families (Holman, 2009), but there might be many more possible host plants. Primary hosts are *Ribes* ssp. only. Secondary hosts are much more diverse in the number of species, but in plant production only the infestation of *Lactuca* ssp. and *Cichorium* ssp. is of economic relevance. *N. ribisnigri* is found on secondary hosts on all parts of the plant, except flowers, but prefers young and/or soft tissues such as petals or young leaves. Therefore, when growing lettuces, monitoring at an advanced stage of lettuce development can only be carried out destructively and combating the aphids on the heartleaves with chemical, and even systemic insecticides is very difficult (Diaz et al., 2007). *N. ribisnigri* has damage potential on both the primary and secondary host. If there is no possibility of dispersion (e.g. in breeding), this also leads to the death of many secondary host species (own data, unpublished). Under practical conditions, on the primary hosts, the direct damaging effect of the sucking activity, which is limited to rolling of the leaves and growth depression, is relatively low. However, the aphids are able to act as vectors of the vein band mosaic virus of gooseberry (Blackman & Eastop, 2000). The direct damage to the secondary host lettuce, endive and chicory, is also low but still of economic importance. The secondary damage results from the increase of fungal infections caused by the honeydew secretion of the aphids inside the head. The wholesale and retail trade even in the case of a few aphids found in the product rejects lettuce batches.

Colours and colour contrasts have a strong influence on the behaviour of aphids. In immigrating individuals, green and yellow colour reflections trigger a landing reflex (Moericke, 1950; 1955; Döring & Spaethe, 2009), which is also controlled by light intensity (brightness) and the UV component of radiation (Döring & Chittka, 2007). However, exceptions prove the rule here, and are probably host plant dependent (Döring & Chittka, 2007; Straw et al., 2011; Farnier et al., 2014). For cultivated areas, it was shown that colonization of the contrasting borders from soil to plant at the edge of the field can be particularly strong (Hooks & Fereres, 2006). For example, green lettuce plants showed more aphid visits (by *Myzus persicae* and *Macrosiphum euphorbiae*) than reddish-brown lettuce plants (Müller, 1964), whose reflection values are closer to those of the soil. For aphids, it was shown that the contrast between plant and soil is important for targeted landing on the host plant and that landing rates can be reduced if the contrast is compensated by coloured (e.g. green) backgrounds (Döring et al., 2004; Hooks & Fereres, 2006; Döring,

2014). The decreasing attractiveness of potential aphid landing targets due to reduced contrast was already demonstrated with pan-trap experiments by Moericke (1955), Barro (1991), Döring (2014) and Döring & Röhrig (2016), where lower contrasts between traps and background also led to reduced number of aphids trapped, even when using attractive colours.

Green mulch has been shown to disturb aphid colonization within the field, but it can also increase visual plot localization by aphids from a distance, and thus immigration into the mulch field margins (Jones & Chapman, 1968; Hommes et al., 2003).

Reflective grey and silver foils showed a reduced immigration of aphids in many experiments, mostly resulting in increasing yields (Greer & Dole, 2003; Hommes et al., 2003; Shimoda, 2018). Unfortunately, the reflection spectrum of the foils used in these experiments is often missing, which makes it difficult to evaluate the results. Various grey/silver materials can have very different reflection spectra (Hommes et al., 2003; Döring et al., 2004). Another interfering factor is the use of traps and plants in the same experiment. The traps used for evaluation represent an additional colour stimulus (depending on colour) and/or contrast which may influence the landing behavior of the aphids.

The aim of the current paper was to compare a newly invented sprayable and biodegradable film with conventional practices (foil and bare soil) in deterring aphid landing in lettuce fields.

Materials and methods

The sprayable films were compared to conventional culture practices like cultivation on bare soil and on green and black polyethylene (PE) foil (following named foil). If text refers to various materials for ground cover (film + foil), the term mulch is used. The hypothesis is that all coloured foils will reduce the initial infestation with aphids in contrast to cultivation on bare soil. In addition, the spray films should reduce the number of alighting aphids as strong as the PE foil will do.

The five different treatments used in the field experiment are shown in Table 1.

The experiments were performed on an area of 80 m × 20 m. Each plot had a size of 8.5 m × 5.5 m, and the distance between two plots was 2 m in each direction. Within this area,

Table 1. Used mulch materials and supplier references for the five different treatments in the field experiment.

Treatment	Material	Supplier
NF	Open soil without film/foil	-
PEB	PE-foil Black	25 my Premium-Foil, 1.2 m wide, Hartmann-Brockhaus, Pfaffenhofen-Wagenhofen, Germany
SFB	Spray Film Black-grey	own development, coloured with Black Pearls 800, Cabot Corporation, Boston, USA
PEG	PE-foil Green	100 my foil, 1.5 m wide, Supporters GmbH, Lampertheim, Germany
SFG	Spray Film Green	own development, coloured with Bentone French green soil and Italian gold ochre, Kremer Pigmente, Aichstetten, Germany

iceberg lettuce (*Lactuca sativa* var. *crispa*) was planted (May 7th 2018) on 7.5 m × 4.5 m; the resulting edges of 0.5 m width were left free (treatment NF) or covered with foil like the cultivation area. The conventional foil strips were drawn in manually (May 7th 2018), and the sprayable film treatments were applied directly to the ground (May 6th 2018) with an airless sprayer (Wagner© Superfinish 7000) before planting. With a S10 527/235 nozzle (Art.nr. 271049, J.Wagner GmbH, Markdorf, Germany) at a pressure of approx. 200–220 bar, a quantity of 1.9 litres per square meter was applied.

All 15 experimental plots consisting of 3 dams were manually planted with 240 young lettuce plants each (12 rows with 20 plants each, with 4 rows per dam, planting distance 30 cm, row distance 30 cm, and distance of 30 cm to 40 cm between dams). Figure S5 shows one complete experimental plot (i.e. one replicate of a treatment) for all treatments. The number of replicates per treatment was three. Randomization was done for all 15 plots (a completely randomized design, with the restriction that replications of one treatment were not allowed to be located next to each other) and then filled in the field plan (Fig. S1). A blocked design was not possible because of limited field width. Note that in Figs. 3, S1 and S3 one row of plant symbols (circles) corresponds to the 4 rows of plants per dam. The numbering of rows and plants clarifies this, since indeed not all rows and plants of the three dams are shown in the heat map graphs.

For the evaluation, 30 plants per plot were assessed. For each plot, the 1st, 5th, 10th, 15th and 20th plants in the plant rows 1, 4, 5, 8, 9 and 12 were rated. This resulted in an evaluation raster of 0.9 m × 1.2 m in the field. Detailed graphical overview for the plot design (Figs. 3, S1 and S3) and pictures of foil and film materials used in the experiments (Fig. S5) are given in the supplementary. The raw data and statistical code for R are also provided online (Niemann et al., 2022).

Weeds were mechanically removed weekly to prevent an impact on aphid immigration. In the first non-destructive evaluation, a small mirror was used to inspect the underside of the leaves by visual counting of aphids at the beginning of the infestation on May 16. A second, destructive, evaluation was carried out at the time of harvest on June 22.

Preliminary studies (own study 2016, unpublished) showed that it takes a distance of around two meters between plot border and plot centre to be able to evaluate edge effects in lettuce. As field size was limited, each of the five treatments had three simultaneous replicates. Since another trial set in the same year and three in the year 2017 remained without any infestation by aphids, it was only possible to work with these data from 2018.

Reflection measurement

Reflection spectra for film/foil materials, dry soil and lettuce leaves were measured with the spectrophotometer Lambda 900 UV/VIS/NIR (Perkin-Elmer Instruments, Norwalk, USA) in order to draw possible correlations between the reflection of the ground surface and the immigration of aphids. Each film/foil and soil sample was measured three times at different randomly selected points on the sample surface and

the mean was calculated. The reflection properties of plant leaves were measured 6 times; 3 times for the three youngest and oldest leaves, respectively (always upper side, central veins were excluded). Reflection spectra are shown in Fig. 1.

Statistical analysis

The software R (R Core Team, 2019) was used for the statistical analysis. Data management was done using the tidyverse packages (Wickham, 2017). Since independence of the single observations (number of aphids per plant) within the subsamples (location) in each plot cannot be assumed, these observations were summed up separately for plants located in the centre of the plot (round dots in the heatmap, see Fig. 3) or on the border (squares in the heatmap). All further statistical analyses were run on these two sums per plot.

Since these sums depend on different numbers of lettuce plants (12 for the centre, 18 for the border) they were scaled to be $(y + 1)/n$. The shift of $y + 1$ was necessary to avoid zeros in the dependent variable, since the statistical model was run on logarithmized scaled sums as described below (and the logarithm of zero is not defined).

A linear mixed model using the lme4 package (Bates et al., 2015) was fitted in which the logarithmized scaled sums depend on the treatment, the location and their interaction as fixed effects and the plots as random effects.

Based on this model, an ANOVA was run and pairwise mean comparisons of the effects of the film/foil treatments were done using the emmeans package (Lenth, 2018). All tests were run with $\alpha=0.05$. Please note that the comparisons of model-based means were run as differences on the log-link. Therefore, back transformation to the original scale yields ratios between these means. Graphics were made using the package ggplot2 (Wickham, 2017). The model described above was fitted to the total number of aphids as well as the number of alate aphids found in evaluation one (2018-05-16) and also to the total number of aphids found at the second evaluation (2018-06-22).

The R-code for modelling, ANOVA tables, model-based means of the scaled rates and their corresponding comparisons are given in the supplementary (Niemann et al., 2022).

Results

The reflection spectra of the different treatments and the lettuce leaf are shown in Fig. 1. The “green” materials lettuce leaf and PEG showed typical peaks for bright green tones around 550 nm and lower reflection values in the blue (430 nm– 490 nm) and yellow (560 nm– 600 nm) range. SFG showed just a small increase at 550 nm but much higher reflection of all other wavelength than the two other “green” materials and a high reflection in the UV-range between 250 nm to 300 nm. PEB showed reflection values between 7% and 5%, SFB reflection ranges between 12% and 17%. The dry soil shows a high reflection in the UV range up to a peak at 280 nm (~ 90% refl.). From there, after a short fall to 30% at 385 nm, the curve flattens out sharply and then rises to around 40% at 800 nm.

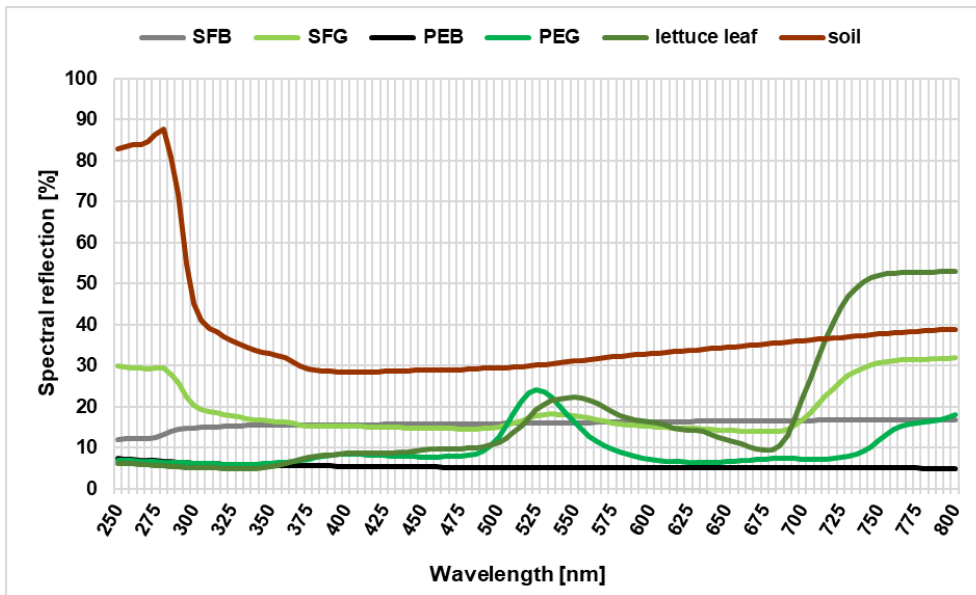


Fig. 1. Reflection spectra of the soil (NF), mulch-materials and the experimental plant *Lactuca sativa*, var. *crispa*. For abbreviations see Table 1.

Figure 2 shows the number of alate aphids found on the lettuce plants in the first evaluation for each treatment, separated into outer- (dots) and inner-plants (triangles) and as least square means with confidence interval, over all repetitions. Highest least square mean is shown by treatments PEG (0.294), SFG (0.291) and NF (0.257), PEB showed 0.110. The treatment SFB (0.068) was statistically different from all other treatments.

Figure 3 shows the total number of aphids (*N. ribisnigri*, only 1 alate individual) for every evaluation plant by increasing intensity of the colour in the second evaluation. In all treatments, more alate aphids on outer plants than on plants in the centre of the plots were counted, but the ANOVA (Table S17) did not show statistical significance (p -value=0.067) for a location effect neither on average, nor within the plots (p -value = 0.91). The mean ratios of counted aphids between inner

and outer plants for each treatment are given in Table S18. As for the total number of aphids, only the treatment effect was significant (p -value = 0.025, Table S14). The number of infested plants was 36 (40%, NF), 44 (49%, PEG), 17 (19%, SFG), 19 (21% PEB), 12 (13%, SFB).

Discussion

In the field experiment, a significant effect was observed in the SFB treatment, which in the first evaluation showed almost no infestation by alate aphids (Fig. 2). Moreover, the SFB treatment also showed the lowest infestation of all treatments in the second evaluation (Fig. 3, Fig. S4) even if not significant.

Previous experiments by Jones & Chapman (1968) showed reduced virus spread in the combination of lettuce and black

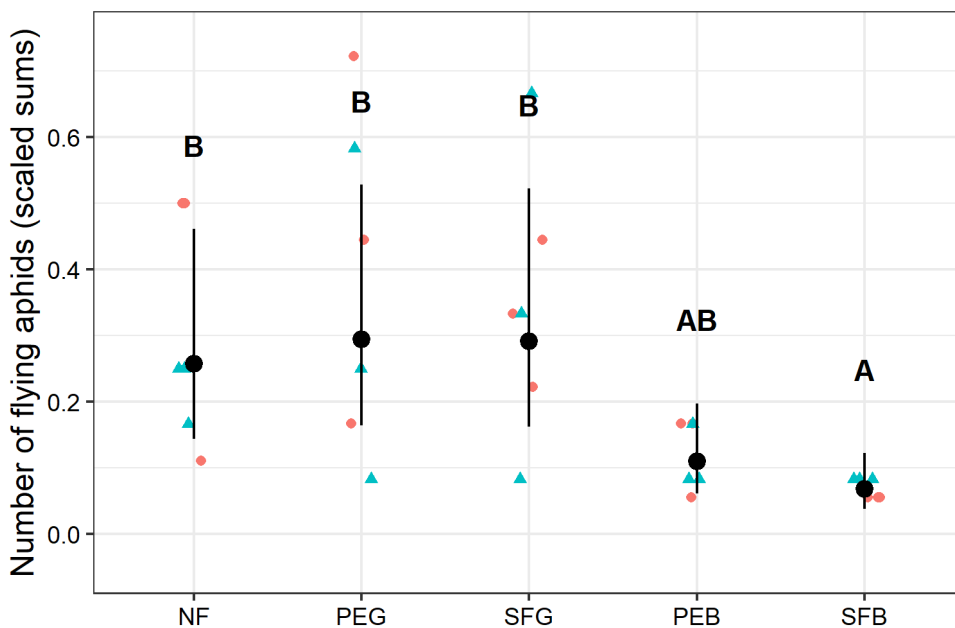


Fig. 2. Scaled sums of the total number of alate aphids per location in each plot (May 16, 2018). The sums were scaled to be $(y + 1)/n$. Dots indicate sums from the border plants, triangles indicate sums from the centre of a plot. The black dots are model-based least square means of the scaled sums and their 95% confidence intervals (black bars). The letters indicate significant differences ($\alpha=0.05$) between logarithmized means.

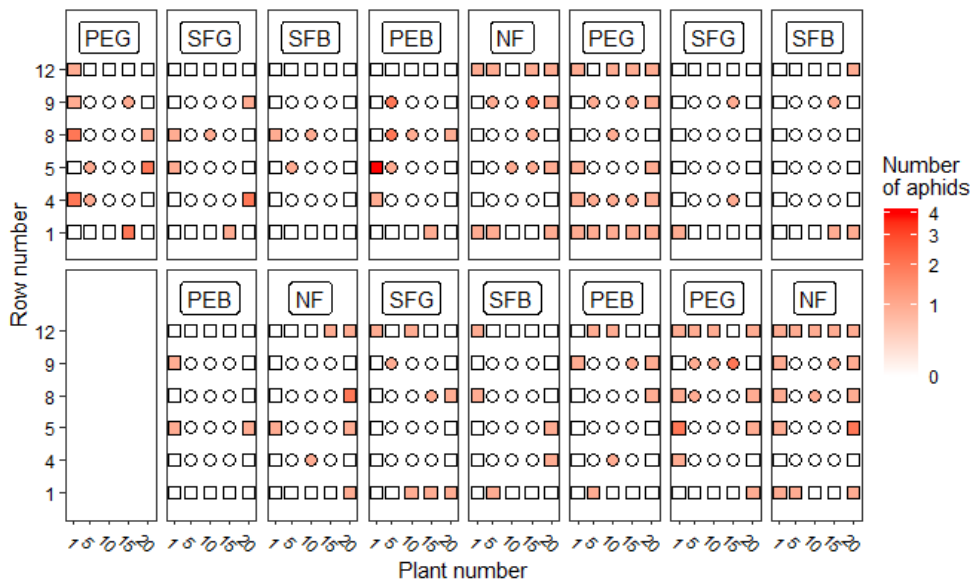


Fig. 3. Heatmap for the total number of aphids (June 22, 2018) with overview over all evaluated lettuce plants ($n=450$). Five treatments with three replications each on 15 randomized plots (n=30 per plot). Total number of aphids (alate and apterous) found in the 2nd evaluation is represented by increasing colour hue. Evaluated plants are indicated by plant number (x-axis) and row number (y-axis). Outer plants at the edge to bare soil are shown as square dots, plants surrounded by other plants as round dots. Orientation is north to south (from left to right).

foil, and studies by Johnson et al. (1967) also showed reduced aphid infestation using black PE-foil, but the relevant effects were not discussed and involved effects remain unclear. However, spectrometer measurements of the PEB and the SFB treatment in our experiment (Fig. 1) did not show any remarkable reflection values indicating a repellent effect by reflected wavelengths (nm). Since the surface properties of the ground covers (film, foil, soil) were not in focus of this study and not varied independently we cannot prove it, but like Moericke (1955) and Döring et al. (2004) we assume an effect by those. The SFB and PEB treatment both showed a glossy optic (to human eye) in contrast to the other three treatments. For further experiments, we would recommend the measurement of the gloss with a gloss meter over the experimental period. In addition to the optical effects mentioned above, it is also possible that the different surface properties of the mulch materials influenced post-landing behaviour (Moericke, 1950; 1955; Finch & Collier, 2000; Döring et al., 2004), and may have led to a take-off by the aphids. Further research would be needed to determine where the effect is coming from.

The green treatments SFG and PEG were not able to reduce the initial infestation in our experiment. In addition, PEG also showed highest infestation in the second evaluation. This may result from the fact that we did not succeed in exactly reproducing the spectral green of the plants. Especially the SFG treatment shows lower reflection values as the lettuce and the overall curve is more like the one from the soil as from the lettuce. This could have resulted in infestation rates like the NF treatment has shown in Fig. 2 (and Fig. S4). If we compare the spectra of the lettuce plant with the green treatments, the lettuce shows a higher reflectance at 550 nm (yellow-green) as the other two treatments. For the PEG treatment this reflection might have acted like a trap in contrast to the green background and therefore helps the aphids to navigate correctly to the host plants. Experiments with green mulch materials showing increasing yellow hues could demonstrate this. Plot size could also have an influence on

the migration rate. For further field experiments with coloured foils, we would recommend bigger plots and smaller number of treatments.

The significant difference between PEG and SFB could be influenced by these factors but it has to be considered, that we are talking about very small differences, the maximum number of aphids was 4 per plant. Therefore, the information given by the second evaluation is rather limited.

It has to be considered that three replications are quite a low number, but the results for the PEB and SFB treatment in the first evaluation showed very small confidence intervals and the plots needed a minimum size on a limited field space to evaluate the infestation from the border.

If foil is already in use, the only potential cost-neutral plant protection measure known to the authors is the changing of colour. All other measures (i.e. nets, beneficials) have additional costs. Further studies of the contrast aspect in the colonization of crops by winged pests might show the potential of the measure, in combination with other integrated measures, as part of an integrated pest management system to minimize the need of intervening actions. The spray film used in the experiments will be developed further and tested in consecutive years and/or more than one field to better understand its capacity of deterring aphids.

Conflicts of interest statement

The author(s) declare that they do not have any conflicts of interest.

Data availability

Supplementary information (Figs. S1-S5; Tables S1-S18; the R-code for modelling; ANOVA tables; model-based means of the scaled rates and their corresponding comparisons) is available at https://github.com/MaxMenssen/niemann_et_al_2022.

References

- Barro, P.J., 1991:** Attractiveness of four colours of traps to creal aphids in south Australia (Hemiptera: Aphididae). *Australian Journal of Entomology* **30** (4), 263–264, DOI: 10.1111/j.1440-6055.1991.tb00431.x.
- Bates, D., M. Mächler, B. Bolker, S. Walker, 2015:** Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* **67** (1), 1–48, DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- Blackman, R.L., V. F. Eastop, 2000:** Aphids on the world's crops: An identification and information guide. New York, Wiley, 466 pp., ISBN: 0471851914.
- Díaz, B.M., M. Muñiz, L. Barrios, A. Fereres, 2007:** Temperature Thresholds and Thermal Requirements for Development of *Nasonovia ribisnigri* (Hemiptera: Aphididae). *Environmental Entomology* **36** (4), 681–688, DOI: 10.1603/0046-225x(2007)36[681:ttatrf]2.0.co;2.
- Döring, T.F., 2014:** How aphids find their host plants, and how they don't. *Annals of Applied Biology* **165** (1), 3–26, DOI: 10.1111/aab.12142.
- Döring, T.F., L. Chittka, 2007:** Visual ecology of aphids—a critical review on the role of colours in host finding. *Arthropod-Plant Interactions* **1** (1), 3–16, DOI: 10.1007/s11829-006-9000-1.
- Döring, T.F., S.M. Kirchner, S. Kuhne, H. Saucke, 2004:** Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **113** (1), 53–61, DOI: 10.1111/j.0013-8703.2004.00208.x.
- Döring, T.F., K. Röhrig, 2016:** Behavioural response of winged aphids to visual contrasts in the field. *Annals of Applied Biology* **168** (3), 421–434, DOI: 10.1111/aab.12273.
- Döring, T.F., J. Spaethe, 2009:** Messungen der Augengröße und Sehschärfe bei Blattläusen (Hemiptera: Aphididae). *Entomologia Generalis* **32** (2), 77–84, DOI: 10.1127/entom.gen/32/2009/77.
- Farnier, K., A.G. Dyer, M.J. Steinbauer, 2014:** Related but not alike: not all Hemiptera are attracted to yellow. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2** (67), DOI: 10.3389/fevo.2014.00067.
- Finch, S., R.H. Collier, 2000:** Host-plant selection by insects – a theory based on 'appropriate/inappropriate landings' by pest insects of cruciferous plants. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **96** (2), 91–102, DOI: 10.1046/j.1570-7458.2000.00684.x.
- Greer, L., J.M. Dole, 2003:** Aluminum Foil, Aluminium-painted, Plastic, and Degradable Mulches Increase Yields and Decrease Insectvectored Viral Diseases of Vegetables. *HortTechnology* **13** (2), 276–284, DOI: 10.21273/HORTTECH.13.2.0276.
- Holman, J., 2009:** Host Plant Catalog of Aphids: Palaearctic Region. Dordrecht, Springer Netherlands, DOI: 10.1007/978-1-4020-8286-3.
- Hommes, M., G. Siekmann, O. Piepenbrock, U. Baur, A. Fricke, T. Thieme, 2003:** Reduzierung des Blattlausbefalls an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben: Reducing aphid infestations in selected field vegetables with mulches of different materials and colours. URL: <https://orgprints.org/16630/1/16630-02OE097-ble-jki-2003-blattlausbefall.pdf>. Access: 14. July 2020.
- Hooks, C.R.R., A. Fereres, 2006:** Protecting crops from non-persistently aphid-transmitted viruses: a review on the use of barrier plants as a management tool. *Virus research* **120** (1-2), 1–16, DOI: 10.1016/j.virusres.2006.02.006.
- Johnson, G.V., A. Bing, F.F. Smith, 1967:** Reflective Surfaces Used to Repel Dispersing Aphids and Reduce Spread of Aphid-Borne Cucumber Mosaic Virus in Gladiolus Plantings. *Journal of Economic Entomology* **60** (1), 16–18, DOI: 10.1093/jee/60.1.16.
- Jones, F.R., R.K. Chapman, 1968:** Aluminum foil and other reflective surfaces to manipulate the movement of aphid vectors of plant viruses: Proceedings of the Entomological Society of America **23** (23), 146–148.
- Kift, N.B., A. Mead, K. Reynolds, S. Sime, M.D. Barber, I. Denholm, G.M. Tatchell, 2004:** The impact of insecticide resistance in the currant-lettuce aphid, *Nasonovia ribisnigri*, on pest management in lettuce. *Agricultural and Forest Entomology* **6** (4), 295–309, DOI: 10.1111/j.1461-9555.2004.00226.x.
- Lenth, R., 2018:** emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.2.3., URL: <https://cran.r-project.org/package=emmeans>. Access: 14. July 2020.
- Moericke, V., 1950:** Über das Farbsehen der Pfirsichblattlaus (*Myzodes persicae* Sulz.). *Zeitschrift für Tierpsychologie* (7), 263–274.
- Moericke, V., 1955:** Über die Lebensgewohnheiten der geflügelten Blattläuse (Aphidina) unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens beim Landen. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* **37** (1), 29–91, DOI: 10.1111/j.1439-0418.1955.tb00775.x.
- Müller, H.J., 1964:** Über die Anflugdichte von Aphiden auf farbige Salatpflanzen. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **7** (1), 85–104, DOI: 10.1111/j.1570-7458.1964.tb00728.x.
- Niemann, J.-U., M. Menssen, H.-M. Poehling, 2022:** Reducing initial Aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films: raw data, statistical code and supplementary, URL: https://github.com/Max-Menssen/niemann_et_al_2022. Access: 9. February 2022.
- R Core Team, 2019:** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, R Core Team.
- Reinink, K., F.L. Dieleman, 1993:** Survey of aphid species on lettuce. *Bulletin OILB/SROP* **16**(5), 56–68.
- Rufingier, C., L. Schoen, C. Martin, N. Pasteur, 1997:** Resistance of *Nasonovia ribisnigri* (Homoptera: Aphididae) to Five Insecticides. *Journal of Economic Entomology* **90** (6), 1445–1449, DOI: 10.1093/jee/90.6.1445.
- Shimoda, M., 2018:** Recent advances in the optical control of insect pests using light and color: Special Publication of TARI No. 215, 87–102.

Straw, N.A., D.T. Williams, G. Green, 2011: Influence of sticky trap color and height above ground on capture of alate *Elatobium abietinum* (Hemiptera: Aphididae) in Sitka spruce plantations. *Environmental Entomology* **40** (1), 120–125, DOI: 10.1603/EN09344.

Wickham, H., 2017: tidyverse: Easily Install and Load the 'Tidyverse'. R package version 1.2.1., URL: <https://cran.r-project.org/package=tidyverse>. Access: 14. July 2020.

Supplementary information

Results

1st Evaluation (alate aphids only)

Figure S1 shows the intensity of initial infestation by alate aphids (*N. ribisnigri* and *M. euphorbiae* in relation 57% to 43%) for every evaluated plant by increasing colour hue. In all treatments, more alate aphids on outer plants than on plants in the centre of the plots were counted, (except for SFB, because there were no alate aphids at all), but the ANOVA (Table S2) did not show statistical significance (p -value = 0.55) for a location effect neither on average, nor within the plots (p -value=0.79). The mean ratios of counted aphids between inner and outer plants for each treatment are given in Table S6. As for the total number of aphids, only the treatment effect was significant (p -value=0.002, Table S2).

The total number of infested plants by alate aphids was 21 (23%, NF), 23 (26%, PEG), 20 (22%, SFG), 5 (6%, PEB), 0 (0%, SFB).

1st Evaluation (alate and apterous aphids)

For the total number of aphids (*N. ribisnigri* and *M. euphorbiae*, alate and apterous) the ANOVA (Table S8) revealed significant differences ($\alpha=0.05$) between the treatments (p -value <0.001) but no significance for the location (inner or centre) nor the interaction between treatment and location. Therefore, only the differences between the treatments were statistically analysed in detail.

Figure S2 shows the total number of aphids (alate and apterous, scaled sums) found on the lettuce plants in the first evaluation (non-destructive) for each treatment, separated into outer (dots) and inner plants (triangles) and corresponding least square means (black dots) together with their 95% confidence interval (black line), over all repetitions. Due to the scaling $(y + 1)/n$, a sum that equals zero leads to a scaled sum of 0.083 ($n=12$), respective 0.056 ($n=18$).

The control plots (NF) showed the highest number of aphids (least square mean 5.091) followed by the treatments SFG (3.134) and PEG (1.986), which were statistically different from the other two treatments PEB (0.139) and SFB (0.086). Least square means are shown in Table S9. The mean comparisons (contrasts) were run as differences on the log-scale. Therefore, back transformation results in the ratio between the means of the scaled sums. These ratios, their standard error and the corresponding p -values are given in Table S10.

Figure S3 shows the total number of aphids (alate and apterous) for every evaluation plant in the first evaluation by increasing colour hue. In all treatments, more alate aphids on outer plants than on plants in the centre of the plots were counted, but the ANOVA (Table S9) did not show statistical significance (p -value=0.19) for a location effect neither on average, nor within the plots (p -value=0.95). As for the total number of aphids, only the treatment effect was significant (p -value=<0.001). The mean ratios of counted aphids between inner and outer plants for each treatment are given

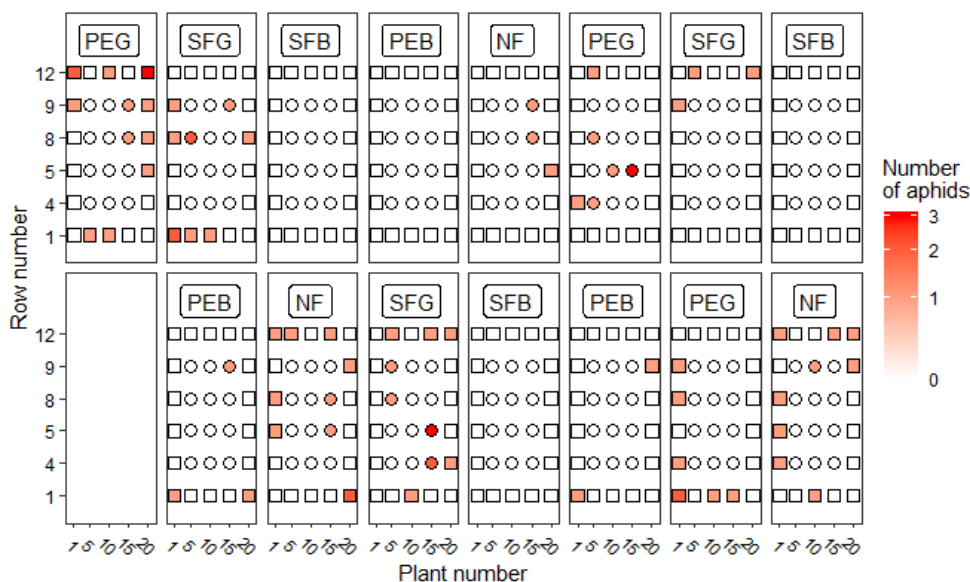


Fig. S1. Heatmap for the number of alate aphids (May 16, 2018) with overview over all evaluated lettuce plants ($n=450$). Five treatments with three replications each on 15 randomized plots ($n=30$ per plot). Number of alate aphids found in the 1st evaluation is represented by increasing colour hue. Evaluated plants are indicated by plant number (x-axis) and row number (y-axis). Outer plants at the edge to bare soil are shown as square dots, plants surrounded by other plants, as round dots. Orientation is north to south (from left to right).

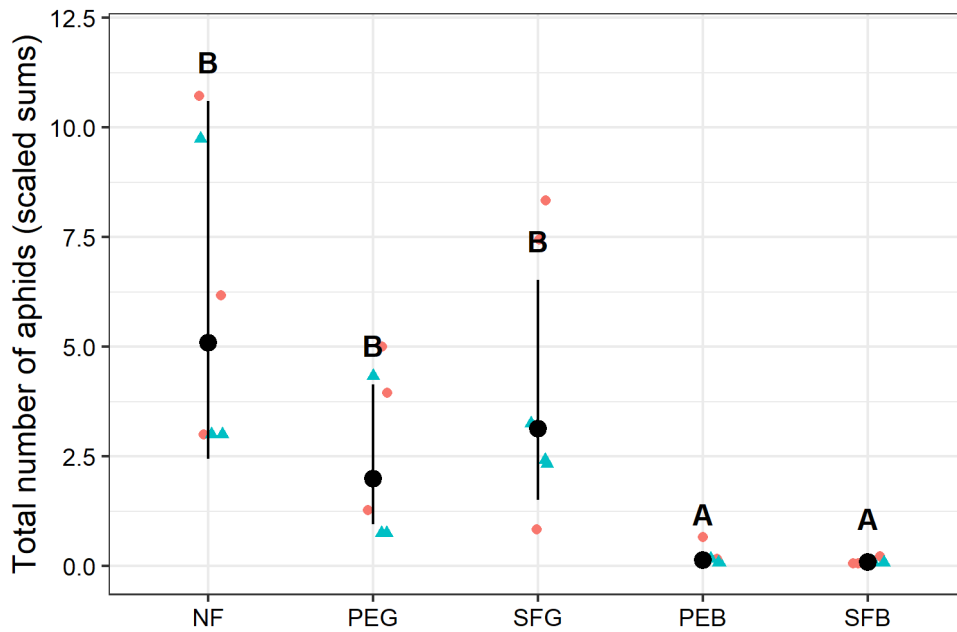


Fig. S2. Scaled sums of the total number of aphids per location in each plot (May 16, 2018). The sums were scaled to be $(y + 1)/n$. Dots indicate sums from the border plants, triangles indicate sums from the centre of a plot. The black dots are model based least square means of the scaled sums together with their 95% confidence intervals (black bars). Treatment means that have at least one letter in common do not differ significantly ($\alpha=0.05$) from each other.

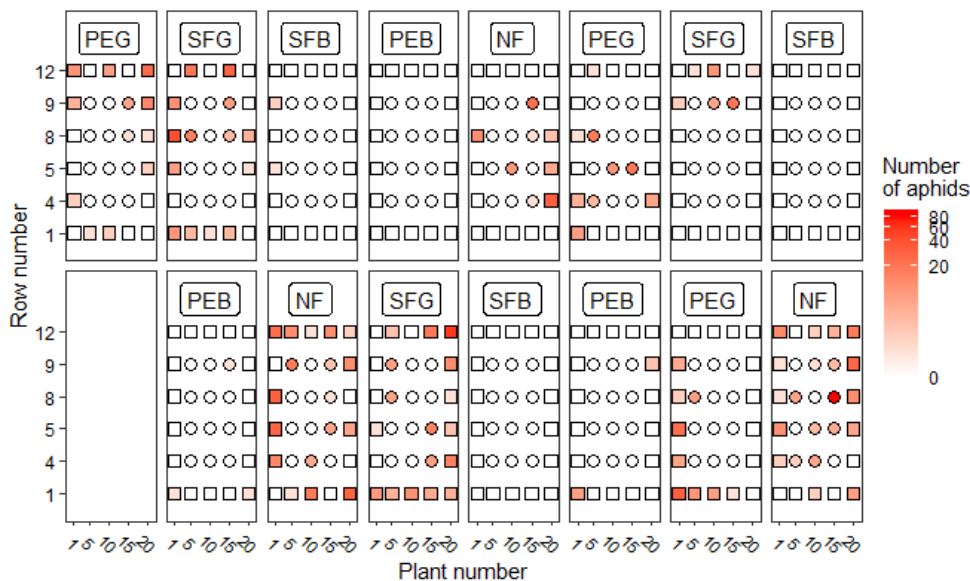


Fig. S3. Heatmap for the total number of aphids (alate and apterous) (May 16, 2018) with overview over all evaluated lettuce plants ($n=450$). Five treatments with three replications each on 15 randomized plots ($n=30$ per plot). Total number of aphids (alate and apterous) found in the 1st evaluation is represented by increasing colour hue. Evaluated plants are indicated by plant number (x-axis) and row number (y-axis). Outer plants at the edge to bare soil are shown as square dots, plants surrounded by other plants, as round dots. Orientation is north to south (from left to right).

in Table S13. Number of infested plants was 47 (52%, NF), 30 (33%, PEG), 37 (41%, SFG), 5 (6%, PEB), 2 (2%, SFB).

2nd Evaluation

The ANOVA (Table S13) revealed only significant differences between the treatments but no significance for the location (inner or centre) nor the interaction between treatment and location. Therefore, only the differences between the treatments were analysed in detail. Figure S4 shows the total number of aphids (*N. ribisnigri* only) found on the lettuce heads

in the second evaluation (destructive at harvest time) for each treatment, and location together with their corresponding least square means. Treatment PEG showed the highest least square mean (0.575), only statistically different to the treatment SFB (0.175) which showed the smallest mean value. Treatment NF (0.418), PEB (0.279) and SFG (0.237) were not statistically different from each other and the other two treatments (PEG, SFB). The mean comparisons (contrast tests) were run as differences on the log-scale. Therefore, back transformation results in the ratio between the means of the scaled sums. These ratios, their standard error and the corresponding p-values are given in Table S15.

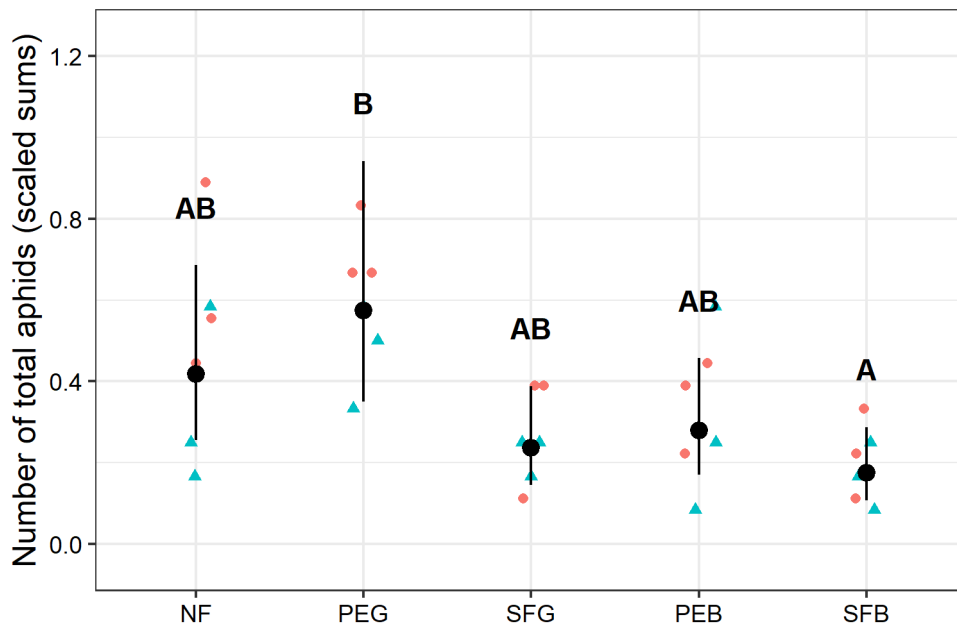


Fig. S4. Scaled sums of the total number of aphids per location in each plot (June 22, 2018). The sums were scaled to be $(y + 1)/n$. Dots indicate sums from the border plants, triangles indicate sums from the centre of a plot. The black dots are model based least square means of the scaled sums together with their 95% confidence intervals (black bars). Treatment means that have at least one letter in common do not differ significantly ($\alpha=0.05$) from each other.



Fig. S5. Overview over “sample-plots” in the field experiments. Plots are shown in different stages of lettuce growth: before planting (line1), short after planting (line2), two weeks after planting (line 3), and shortly before harvest (line4). Overview of one replicate plot per treatment, consisting of 3 dams with 4 rows of plants and 20 plants per row in each dam, thus totalling 240 plans per replicate.

Treatments (from left to right): SFB (Spray-Film Black-grey) – PEB (PE Black) – NF (No Foil/Film) – SFG (Spray-Film Green) – PEG (PE Green)

Field Trial Evaluation 1 (alate aphids)

Data

The statistical analysis was run on the following data set called `datsum` with the variables:

`var`: Different treatments

`plot`: Plots on the field

`inpl`: Location of the lettuce plants in the plots (0: border, 1: centre)

`aphids_sum`: sum of flying aphids per location in each plot

`n`: Number of lettuce plants for each sum

`scaled_sum`: scaled sums calculated as $(\text{aphids_sum} + 1)/n$

Table S1. Summed total number of alate aphids in first evaluation

var	plot	inpl	aphids_sum	n	scaled_sum
NF	5	0	8	18	0.500
NF	5	1	2	12	0.250
NF	8	0	1	18	0.111
NF	8	1	2	12	0.250
NF	12	0	8	18	0.500
NF	12	1	1	12	0.167
PEB	3	0	2	18	0.167
PEB	3	1	1	12	0.167
PEB	7	0	0	18	0.056
PEB	7	1	0	12	0.083
PEB	13	0	2	18	0.167
PEB	13	1	0	12	0.083
PEG	1	0	12	18	0.722
PEG	1	1	2	12	0.250
PEG	9	0	2	18	0.167
PEG	9	1	6	12	0.583
PEG	11	0	7	18	0.444
PEG	11	1	0	12	0.083
SFB	4	0	0	18	0.056
SFB	4	1	0	12	0.083
SFB	6	0	0	18	0.056
SFB	6	1	0	12	0.083
SFB	14	0	0	18	0.056
SFB	14	1	0	12	0.083
SFG	2	0	7	18	0.444
SFG	2	1	3	12	0.333
SFG	10	0	3	18	0.222
SFG	10	1	0	12	0.083
SFG	15	0	5	18	0.333
SFG	15	1	7	12	0.667

Statistical analysis

A linear mixed model was fit to the data as described in the text

```
library(lme4)
lmm_fit <- lmer(log(scaled_sum) ~ var * inpl + (1|plot), data=datsum)
```

ANOVA

```
library(lmerTest)
anova(lmm_fit)
```

Table S2. ANOVA table of alate aphids in first evaluation

Effect	SSQ	MSQ	NumDF	DenDF	F_value	p_Value
var	10.707	2.677	4	20	6.491	0.002
inpl	0.148	0.148	1	20	0.360	0.555
var:inpl	0.694	0.173	4	20	0.421	0.792

The ANOVA (Table S2) revealed the significance ($\alpha = 0.05$) of the treatment (Var) since the p-value is 0.002, but no location effect (inpl) nor a treatment-location interaction (Var:inpl).

Mean comparisons between the treatments

The mean comparisons were run on the logarithm of the scaled sums (as the model does), but are already back transformed to the original scale for easier interpretation. The least square means of the scaled sums for each treatment, their standard error and their 95% confidence intervals are given in Table 3.

```
# Model based Least square means and their comparisons
library(emmeans)
lmm_comp <- emmeans(lmm_fit, specs="var", contr="pairwise", type="response")
# LS-means for the treatments
lmm_comp$emmeans
```

Table S3. Least square means and their confidence intervals of alate aphids in first evaluation

var	mean	se	df	lower	upper
NF	0.257	0.067	10	0.143	0.461
PEB	0.110	0.029	10	0.061	0.198
PEG	0.294	0.077	10	0.164	0.528
SFB	0.068	0.018	10	0.038	0.122
SFG	0.291	0.076	10	0.162	0.522

The mean comparisons (contrasts) were run as differences on the log-scale. Therefore back transformation results in the ratio between the means of the scaled sums. These ratios, their standard error and the corresponding p-values are given in Table S4.

```
# Contrast tests
lmm_comp$contrasts
```

Table S4. Contrasts and p-values of alate aphids in first evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
NF/PEB	2.335	0.866	10	2.287	0.226
NF/PEG	0.874	0.324	10	-0.364	0.996
NF/SFB	3.780	1.401	10	3.586	0.032
NF/SFG	0.883	0.327	10	-0.335	0.997
PEB/PEG	0.374	0.139	10	-2.651	0.133
PEB/SFB	1.619	0.600	10	1.299	0.698
PEB/SFG	0.378	0.140	10	-2.622	0.139
PEG/SFB	4.326	1.604	10	3.950	0.018
PEG/SFG	1.011	0.375	10	0.029	1.000
SFB/SFG	0.234	0.087	10	-3.921	0.019

Location effect

The model based average scaled sums for each location were compared on log-scale. Back-transformations results in a ratio between both sums (0: border plant, 1: inner plant). Please note that the ratio is not significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
lmm_comp_inpl <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl",
  contr="pairwise", type="response")

# Ratio between the mean scaled sums for each Location
lmm_comp_inpl$contrasts
```

Table S5. Ratios of scaled sums between the locations of alate aphids in first evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	1.151	0.27	10	0.6	0.562

Location effect in each treatment

Ratios between the scaled sums of the border plants (0) and the inner plants (1) split by the treatments are given in Table S6. Please note, that none of these ratios is significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
# in each treatment
lmm_comp_inter <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl", by="var",
  contr="pairwise", type="response")

# Ratios
lmm_comp_inter$contrasts
```

Table S6. Ratios of scaled sums between the locations and p-values of alate aphids in first evaluation

contrast	var	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	NF	1.387	0.727	10	0.624	0.547
0/1	PEB	1.101	0.577	10	0.183	0.859
0/1	PEG	1.639	0.859	10	0.942	0.368
0/1	SFB	0.667	0.350	10	-0.773	0.457
0/1	SFG	1.211	0.635	10	0.366	0.722

References are given in the main reference list.

Field Trial Evaluation 1 (alate and apterous aphids)

Data

The statistical analysis was run on the following data set called *datsum* with the variables:

var: Different treatments

plot: Plots on the field

inpl: Location of the lettuce plants in the plots (0: border, 1: centre)

aphids_sum: sum of aphids per location in each plot

n: Number of lettuce plants for each sum

scaled_sum: scaled sums calculated as $(\text{aphids_sum} + 1)/n$

Table S7. Summed total number of alate and apterous aphids in first evaluation

var	plot	inpl	aphids_sum	n	scaled_sum
NF	5	0	192	18	10.722
NF	5	1	35	12	3.000
NF	8	0	53	18	3.000
NF	8	1	35	12	3.000
NF	12	0	110	18	6.167
NF	12	1	116	12	9.750
PEB	3	0	2	18	0.167
PEB	3	1	1	12	0.167
PEB	7	0	0	18	0.056
PEB	7	1	0	12	0.083
PEB	13	0	11	18	0.667
PEB	13	1	0	12	0.083
PEG	1	0	70	18	3.944
PEG	1	1	8	12	0.750
PEG	9	0	22	18	1.278
PEG	9	1	51	12	4.333
PEG	11	0	89	18	5.000
PEG	11	1	8	12	0.750
SFB	4	0	3	18	0.222
SFB	4	1	0	12	0.083
SFB	6	0	0	18	0.056
SFB	6	1	0	12	0.083
SFB	14	0	0	18	0.056
SFB	14	1	0	12	0.083
SFG	2	0	133	18	7.444
SFG	2	1	28	12	2.417
SFG	10	0	14	18	0.833
SFG	10	1	27	12	2.333
SFG	15	0	149	18	8.333
SFG	15	1	38	12	3.250

Statistical analysis

A linear mixed model was fit to the data as described in the text

```
library(lme4)
lmm_fit <- lmer(log(scaled_sum) ~ var * inpl + (1|plot), data=datsum)
```

ANOVA

```
library(lmerTest)
anova(lmm_fit)
```

Table S8. ANOVA table of alate and apterous aphids in first evaluation

Effect	SSQ	MSQ	NumDF	DenDF	F_value	p_Value
var	85.014	21.254	4	20	32.711	<0.001
inpl	1.213	1.213	1	20	1.867	0.187
var:inpl	0.458	0.115	4	20	0.176	0.948

The ANOVA (Table S8) revealed the significance ($\alpha = 0.05$) of the treatment (Var) since the p-value is far smaller than 0.05, but no location effect (inpl) nor a treatment-location interaction (Var:inpl).

Mean comparisons between the treatments

The mean comparisons were run on the logarithm of the scaled sums (as the model does), but are already back transformed to the original scale for easier interpretation. The least square means of the scaled sums for each treatment, their standard error and their 95% confidence intervals are given in Table 3.

```
# Model based Least square means and their comparisons
library(emmeans)
lmm_comp <- emmeans(lmm_fit, specs="var", contr="pairwise", type="response")
# LS-means for the treatments
lmm_comp$emmeans
```

Table S9. Least square means and their confidence intervals of alate and apterous aphids in first evaluation

var	mean	se	df	lower	upper
NF	5.091	1.675	10	2.445	10.598
PEB	0.139	0.046	10	0.067	0.289
PEG	1.986	0.654	10	0.954	4.135
SFB	0.086	0.028	10	0.041	0.178
SFG	3.134	1.031	10	1.505	6.524

The mean comparisons (contrasts) were run as differences on the log-scale. Therefore back transformation results in the ratio between the means of the scaled sums. These ratios, their standard error and the corresponding p-values are given in Table S10.

```
# Contrast tests
lmm_comp$contrasts
```

Table S10. Contrasts and p-values of alate and apterous aphids in first evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
NF/PEB	36.682	17.071	10	7.741	0.000
NF/PEG	2.563	1.193	10	2.022	0.322
NF/SFB	59.384	27.636	10	8.776	0.000
NF/SFG	1.624	0.756	10	1.042	0.830
PEB/PEG	0.070	0.033	10	-5.718	0.001
PEB/SFB	1.619	0.753	10	1.035	0.834
PEB/SFG	0.044	0.021	10	-6.698	0.000
PEG/SFB	23.171	10.783	10	6.753	0.000
PEG/SFG	0.634	0.295	10	-0.980	0.858
SFB/SFG	0.027	0.013	10	-7.733	0.000

Location effect

The model based average scaled sums for each location were compared on log-scale. Back-transformations results in a ratio between both sums (0: border plant, 1: inner plant). Please note that the ratio is not significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
lmm_comp_inpl <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl",
  contr="pairwise", type="response")
# Ratio between the mean scaled sums for each Location
lmm_comp_inpl$contrasts
```

Table S11. Ratios of scaled sums between the locations of alate and apterous aphids in first evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	1.495	0.44	10	1.366	0.202

Location effect in each treatment

Ratios between the scaled sums of the border plants (0) and the inner plants (1) split by the treatments are given in Table S12. Please note, that none of these ratios is significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
# in each treatment
lmm_comp_inter <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl", by="var",
  contr="pairwise", type="response")
# Ratios
lmm_comp_inter$contrasts
```

Table S12. Ratios of scaled sums between the locations and p-values of alate and apterous aphids in first evaluation

contrast	var	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	NF	1.312	0.864	10	0.413	0.688
0/1	PEB	1.747	1.150	10	0.848	0.416
0/1	PEG	2.178	1.434	10	1.183	0.264
0/1	SFB	1.058	0.696	10	0.086	0.933
0/1	SFG	1.413	0.930	10	0.525	0.611

Field Trial Evaluation 2

Data

The statistical analysis was run on the following data set called `datsum` with the variables:

`var`: Different treatments

`plot`: Plots on the field

`inpl`: Location of the lettuce plants in the plots (0: border, 1: centre)

`aphids_sum`: sum of aphids per location in each plot

`n`: Number of lettuce plants for each sum

`scaled_sum`: scaled sums calculated as $(\text{aphids_sum} + 1)/n$

Table S13. Summed total number of alate and apterous aphids in second evaluation

var	plot	inpl	aphids_sum	n	scaled_sum
NF	5	0	7	18	0.444
NF	5	1	1	12	0.167
NF	8	0	9	18	0.556
NF	8	1	6	12	0.583
NF	12	0	15	18	0.889
NF	12	1	2	12	0.250
PEB	3	0	3	18	0.222
PEB	3	1	0	12	0.083
PEB	7	0	7	18	0.444
PEB	7	1	6	12	0.583
PEB	13	0	6	18	0.389
PEB	13	1	2	12	0.250
PEG	1	0	11	18	0.667
PEG	1	1	3	12	0.333
PEG	9	0	14	18	0.833
PEG	9	1	6	12	0.583
PEG	11	0	11	18	0.667
PEG	11	1	5	12	0.500
SFB	4	0	1	18	0.111
SFB	4	1	2	12	0.250
SFB	6	0	5	18	0.333
SFB	6	1	0	12	0.083
SFB	14	0	3	18	0.222
SFB	14	1	1	12	0.167
SFG	2	0	6	18	0.389
SFG	2	1	1	12	0.167
SFG	10	0	1	18	0.111
SFG	10	1	2	12	0.250
SFG	15	0	6	18	0.389
SFG	15	1	2	12	0.250

Statistical analysis

A linear mixed model was fit to the data as described in the text

```
library(lme4)
lmm_fit <- lmer(log(scaled_sum) ~ var * inpl + (1|plot), data=datsum)
```

ANOVA

```
library(lmerTest)
anova(lmm_fit)
```

The ANOVA (Table S14) revealed the significance ($\alpha = 0.05$) of the treatment (Var) since the p-value is 0.025, but no location effect (inpl) nor a treatment-location interaction (Var:inpl).

Table S14. ANOVA table of alate and apterous aphids in second evaluation

Effect	SSQ	MSQ	NumDF	DenDF	F_value	p_Value
var	5.151	1.288	4	10	4.478	0.025
inpl	1.212	1.212	1	10	4.215	0.067
var:inpl	0.276	0.069	4	10	0.240	0.909

Mean comparisons between the treatments

The mean comparisons were run on the logarithm of the scaled sums (as the model does), but are already back transformed to the original scale for easier interpretation. The least square means of the scaled sums for each treatment, their standard error and their 95% confidence intervals are given in Table 3.

```
# Model based Least square means and their comparisons
library(emmeans)
lmm_comp <- emmeans(lmm_fit, specs="var", contr="pairwise", type="response")
# LS-means for the treatments
lmm_comp$emmeans
```

Table S15. Least square means and their confidence intervals of alate and apterous aphids in first evaluation

var	mean	se	df	lower	upper
NF	0.418	0.093	10	0.255	0.685
PEB	0.279	0.062	10	0.170	0.457
PEG	0.575	0.128	10	0.350	0.942
SFB	0.175	0.039	10	0.107	0.287
SFG	0.237	0.053	10	0.144	0.388

The mean comparisons (contrasts) were run as differences on the log-scale. Therefore back transformation results in the ratio between the means of the scaled sums. These ratios, their standard error and the corresponding p-values are given in Table S16.

```
# Contrast tests
lmm_comp$contrasts
```

Table S16. Contrasts and p-values of alate and apterous aphids in second evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
NF/PEB	1.501	0.471	10	1.293	0.701
NF/PEG	0.727	0.228	10	-1.014	0.844
NF/SFB	2.391	0.751	10	2.776	0.110
NF/SFG	1.767	0.555	10	1.814	0.417
PEB/PEG	0.485	0.152	10	-2.307	0.219
PEB/SFB	1.593	0.500	10	1.483	0.594
PEB/SFG	1.178	0.370	10	0.521	0.983
PEG/SFB	3.286	1.032	10	3.790	0.023
PEG/SFG	2.430	0.763	10	2.828	0.102
SFB/SFG	0.739	0.232	10	-0.962	0.866

Location effect

The model based average scaled sums for each location were compared on log-scale. Back-transformations results in a ratio between both sums (0: border plant, 1: inner plant). Please note that the ratio is not significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
lmm_comp_inpl <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl",
                        contr="pairwise", type="response")

# Ratio between the mean scaled sums for each Location
lmm_comp_inpl$contrasts
```

Table S17. Ratios of scaled sums between the locations of alate and apterous aphids in second evaluation

contrast	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	1.495	0.293	10	2.053	0.067

Location effect in each treatment

Ratios between the scaled sums of the border plants (0) and the inner plants (1) split by the treatments are given in Table S18. Please note, that none of these ratios is significantly different from zero.

```
# Model based Least square means and their comparisons for the Location effect
# in each treatment
lmm_comp_inter <- emmeans(lmm_fit, specs="inpl", by="var",
                        contr="pairwise", type="response")

# Ratios
lmm_comp_inter$contrasts
```

Table S18. Ratios of scaled sums between the locations and p-values of alate and apterous aphids in second evaluation

contrast	var	ratio	se	df	t_ratio	p_value
0/1	NF	2.082	0.912	10	1.675	0.125
0/1	PEB	1.468	0.643	10	0.876	0.402
0/1	PEG	1.562	0.684	10	1.018	0.333
0/1	SFB	1.333	0.584	10	0.657	0.526
0/1	SFG	1.173	0.514	10	0.364	0.723

Astrid Eben¹, Christine Dieckhoff³, Olaf Zimmermann³, Bianca Boehnke¹, Heidrun Vogt¹, Annette Herz², Kirsten Köppler³

Ausgewählte schädliche Neozoen im Obstbau – Überblick zur Situation und aktuellen Forschungsvorhaben zur Kirschessigfliege und invasiven Stinkwanzen

Selected invasive pests in fruiticulture – overview of the current situation and ongoing research projects on spotted wing drosophila and stink bugs

Affiliationen

¹Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau, Dossenheim.

²Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Biologischen Pflanzenschutz, Darmstadt.

³Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg, Karlsruhe.

Kontaktanschrift

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau, Schwabenheimer Straße 101, 69221 Dossenheim, E-Mail: astrid.eben@julius-kuehn.de

Zusammenfassung

Gebietsfremde invasive Schadinsekten haben im Obstbau im vergangenen Jahrzehnt große wirtschaftliche Schäden verursacht und den kommerziellen Obstanbau vor neue Herausforderungen gestellt. Die Gründe für die Ausbreitung dieser Insekten sind vielfältig. Regulierungsmaßnahmen zur Eindämmung dieser Neozoen benötigen Erfahrungen in verschiedenen Kulturpflanzen und umfangreiche Kenntnisse zum Verhalten der invasiven Arten. Für die Kirschessigfliege gibt es bereits erste wirksame Regulierungsstrategien, sowie eine Dekade an Erfahrung und somit umfangreiches Wissen zur Biologie, Ökologie und Genetik dieses Schadinsekts, welches für die Weiterentwicklung von Bekämpfungsmaßnahmen unabdingbar ist. Invasive Schadinsekten werden derzeit an verschiedenen Standorten intensiv untersucht. Potenziell wirksame, alternative Methoden zur Regulierung werden aktuell in Forschungsprojekten erarbeitet.

Stichwörter

Biologische Schädlingsbekämpfung, Einnetzung, Invasive Schaderreger, Kirschessigfliege, Marmorierter Baumwanze, Grüne Reiswanze, Schlupfwespen

Abstract

Foreign invasive species have caused considerable economic damage in fruiticulture during the past decade. Consequently, commercial fruit production is facing major, new challenges. Reasons for the spread of those pest insects are manifold. Appropriate control measures for the containment of invasive species depend on several years of experience with diverse fruit cultures and in-depth-knowledge of the insects'

behaviour. For Spotted Wing Drosophila, first efficient mechanisms for the control of fruit infestation were identified and are in use. Moreover, broad knowledge of biology, ecology, and genetics of this species is available and can be applied for the development of further control strategies. Research on invasive stink bugs is currently undertaken at different locations. Effective means for their population regulation are developed in those research projects.

Keywords

Biological control, insect nets, invasive pests, Spotted Wing Drosophila, Brown Marmorated Stink Bug, Southern Green Stink Bug, parasitoids

Einleitung

Die schnelle Ausbreitung invasiver Schadinsekten ist derzeit eine der größten Herausforderungen im Obstbau in Deutschland sowie in allen anderen obstanbauenden europäischen Ländern. Internationaler Handel und Tourismus sind die häufigsten Wege der Einschleppung von gebietsfremden Arten (Bradshaw et al., 2016). Viele dieser oft polyphagen invasiven Schadinsekten sind an die klimatischen Bedingungen in den Anbaugebieten der neu besiedelten Regionen angepasst und können sich somit sehr schnell etablieren, zumal natürliche Feinde zur Populationsregulierung im neuen Verbreitungsgebiet fehlen (Venette & Hutchinson, 2021). Die fortschreitende globale Erwärmung begünstigt diesen Trend v. a. bei wärme liebenden Arten. Eine Folge der Klimaerwärmung sind mildere Winter, die zu geringerer natürlicher Mortalität in den Populationen führen können und längere Wärmeperioden, welche die Ausbildung mehrerer Generationen pro Jahr begünstigen können (Gutierrez & Ponti, 2014; Skendžić et al., 2021).



(c) Die Autoren/Die Autorinnen 2022

Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen: 3. Dezember 2021/3. Februar 2022

Beispiele hierfür sind die Kirschessigfliege, *Drosophila suzukii* Matsumura 1931 (Diptera: Drosophilidae) und invasive Stinkwanzen. Problematisch sind derzeit im deutschen Obstbau, v. a. im Kern-, Stein- und Beerenobstanbau, die Kirschessigfliege und zwei Arten invasiver Schadwanzen, die Marmorierete Baumwanze *Halymorpha halys* (Stål 1855) und die Grüne Reisswanze, *Nezara viridula* (Linnaeus 1758) (Hemiptera: Pentatomidae). Im Folgenden wird daher auf diese Neozoen im Obst eingegangen, wobei der Fokus auf Erfahrungen der letzten Jahre im Obstanbau in Südwestdeutschland liegt. In der dort zu findenden, kleinräumig strukturierten Landschaft werden im allgemeinen verschiedene Obstsorten in räumlicher Nähe und zeitlich überlappenden Reifep Perioden meist auf wenigen ha-großen Familienbetrieben kultiviert.

Kirschessigfliege – *Drosophila suzukii*

Die Kirschessigfliege, *D. suzukii*, hat sich seit ihrem Erstfund 2011 in Deutschland zu einem der wirtschaftlich wichtigsten Schädlinge im Stein- und Beerenobstanbau entwickelt (Vogt et al., 2012; LTZ Augustenberg, 2019a; b). In ihrem Ursprungsgebiet in Südost-Asien ist *D. suzukii* vor 2010 nicht als Schädling erwähnt worden (Haye et al., 2016). Diese Fliege nutzt, im Gegensatz zu den heimischen Fruchtfliegenarten, zur Eiablage reife sowie erntereife gesunde Früchte (Atallah et al., 2014; Keeseey et al., 2015), in denen sich die Larven entwickeln und die Früchte dadurch zum Kollabieren bringen. Die Generationsdauer von Ei bis zum adulten Tier ist kurz und beträgt unter günstigen Bedingungen etwa 10 bis 17 Tage (Tochen et al., 2014). An einer Süßkirsche können unter starkem Befallsdruck mehr als 30 Eier abgelegt werden, bei Fruchtbonituren wurden aus einer einzelnen Himbeere oder Brombeere regelmäßig um die 30, aber auch bis zu 90 und mehr Larven ausgewaschen (unveröffentlichte Daten, JKI und LTZ). Dadurch kann in kurzer Zeit ein Totalausfall der Ernte die Folge sein. Die Anwendung von Insektiziden an den nahezu reifen Früchten ist schwierig und nicht effizient. Dies zum einen, da die Mittel mit den geschützt innerhalb der Früchte fressenden Fliegenlarven nicht in direkten Kontakt treten und zum anderen wegen zulassungsbedingten Wartezeiten nach einer Anwendung kurz vor der Ernte oft nicht genutzt werden können. Deshalb ist je nach Pflanzenschutzmittel ein Einsatz nicht oder nur begrenzt möglich. Da in manchen Obstkulturen keine wirksamen Insektizide zugelassen sind, haben sich Anträge auf Notfallzulassungen nach Art 53/EU-VO 1107/2009 geeigneter Pflanzenschutzmittel in den letzten Jahren für eine Reihe von Obstarten als unumgänglich erwiesen. *D. suzukii* bevorzugt rote bis schwarze, weichschalige Früchte und kann etwa 80 verschiedene Pflanzenarten als Wirte nutzen (Poyet et al., 2015; Kenis et al., 2016), so finden die Fliegen während der gesamten Vegetationsperiode durchgehend geeignete Früchte zur Eiablage. In Deutschland können sich je nach Region bis zu fünf Generationen pro Jahr entwickeln (Wiman et al. 2014; Weber & Kockerols, 2016), wobei sich die aufeinanderfolgenden Generationen überlappen und daher in einer Obstanlage alle Entwicklungsstadien gleichzeitig auftreten (Asplen et al., 2015). Die unterschiedliche Empfindlichkeit dieser Stadien (Ei, Larve, Puppe, adulte Fliege) gegenüber klimatischen Bedingungen (Hamby et al., 2016; Eben et al., 2018; Köppler et al., 2019; Winkler et al., 2020; Jung et

al., 2021) und Insektiziden (Harzer & Sauter, 2017) macht die Möglichkeiten der Populationsregulierung mit synthetischen Wirkstoffen schwierig. Grundlegendes Wissen zur Reproduktions- und Entwicklungsbiologie sowie zu circadianen Aktivitätsperioden (Eiablage, Paarungsverhalten) und zur jahreszeitlichen Abfolge der Wirtspflanzennutzung ist wesentlich für die Erarbeitung effizienter Bekämpfungsstrategien (Hamby et al., 2013; Asplen et al., 2015; Kirkpatrick et al., 2018; Van Timmeren et al., 2017; Shaw et al., 2019a). Erschwerend kommt hinzu, dass die begrenzte Wirksamkeit der Insektizide und somit die, auf einige wenige synthetische Wirkstoffe reduzierte Bekämpfung, langfristig zur Entstehung von resistenten Populationen führen wird (Gress & Zalom, 2019).

Weltweit wird in zahlreichen Forschungsgruppen seit Jahren intensiv nach praktikablen Alternativen zur Bekämpfung der Kirschessigfliege gesucht (Cha et al., 2012; Erland et al., 2015; Revadi et al., 2015; Lee et al., 2016; Wallingford et al., 2016; Mori et al., 2017; Renkema et al., 2017; Feng et al., 2018; Schetelig et al., 2018; Tonina et al., 2018; Klick et al., 2019; Cloonan et al., 2019; Eben et al., 2020; Spitaler et al., 2020). Dabei spielen für die Entscheidung über den Einsatz einer direkten Bekämpfungsmaßnahme während der Vegetationsperiode zunächst die Populationsstärke, die abiotischen Bedingungen, vor allem die Temperatur, sowie der Entwicklungsstand der Wirtsfrucht eine Rolle (Jung et al. 2021; Ørsted et al., 2021). Eine direkte Regulierung mit zulässigen Insektiziden kann somit nach Befallsrisiko vorgenommen werden, wodurch deren Einsatz auf das notwendige Maß begrenzt werden sollte (s. auch: <https://www.isip.de/isip/servlet/isip-de/entscheidungshilfen/gartenbau>). Regulierungsstrategien ohne Anwendung synthetischer Insektizide, wie der Einsatz verhaltensändernder Substanzen (Clymans et al., 2019; Rice et al. 2017), waren bisher nur unter Laborbedingungen erfolgreich und konnten in Freilandversuchen weder als Repellentstoffe gegen die Eiablage, noch als wirksame Kontakttoxine bestätigt werden. Reifende und reife Wirtsfrüchte sind stets attraktiver im Vergleich zu chemischen Stoffen, die aus diesem Grund auch nicht für den Massenfang tauglich sind (Fanning et al., 2017). Ebenso haben Versuche mit sterilen Männchen (Nikolouli et al., 2020) bisher nicht zu den gewünschten Reduktionen in den Fliegenpopulationen geführt. Bei hohem Befallsdruck und günstigen abiotischen Bedingungen in den Sommermonaten sind bei sehr attraktiven Wirtsfrüchten, wie z. B. Himbeeren, trotz Vergleichs auf mögliche sortentypische Resistenzen, keine signifikanten Sortenunterschiede in der Befallshäufigkeit erkennbar (Pinggera et al., 2018; Wöhner et al. 2021). Die Ergebnisse umfangreicher Befallsbonituren in den Jahren 2014 – 2021 an Kirschen haben gezeigt, dass bei hohem Befallsdruck die zu dem Zeitpunkt reifen Kirschen aller Sorten befallen werden (unveröffentlichte Daten JKI; LTZ Augustenberg, 2019b). Parameter wie Schalendicke oder Zuckergehalt von Süßkirschen hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Anzahl der abgelegten Eier oder die Anzahl der sich daraus entwickelnden Larven (Hemer, 2017).

Ein Vergleich der Wirkung flüchtiger Substanzen aus verschiedenen Erdbeersorten als Hemmstoffe gegen die Eiablage von *D. suzukii*, fand durch gesteigerte Konzentration einer Duftstoffkomponente keine Hemmung der Eiablage, jedoch eine erhöhte Sterblichkeit der Fliegenembryonen (Bräcker et al.,

2020). Diese Ergebnisse sind von Bedeutung für zukünftige Resistenzzüchtungen im Rahmen der Strategien zur nachhaltigen Schädlingsbekämpfung. Maßgeblich für den Populationsaufbau im Frühjahr sind die Anzahl der Kälte- und Frosttage im Winter, die zur Wintermortalität der Adulten führen (Stockton & Loeb, 2021). Die Entwicklungsdynamik der nachfolgenden Generationen wird durch die, in jedem Jahr variierenden, vorherrschenden Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den frühen Sommermonaten, während der Reifezeit von Süßkirschen, beeinflusst (Jung et al., 2021; Eben et al., 2018; Leach et al., 2019; Wiman et al., 2016).

Die Wirksamkeit von Insektiziden gegen die Kirschessigfliege ist abhängig vom Wirkmechanismus der Präparate. Eine reine Kontaktwirkung, wie z. B. bei Natur-Pyrethrum, wirkt nur auf die adulten Fliegen bei direktem Kontakt. Der Einfluss auf die Befallsentwicklung ist somit sehr gering, da Eier und Larven in den Früchten nicht betroffen sind. Als Kontaktinsektizid wirkt auch das synthetische Pyrethroid Karate Zeon mit dem Wirkstoff Lambda-Cyhalothrin. Dagegen haben das Insektizid SpinTor mit dem Wirkstoff Spinosad sowie Exirel mit dem Wirkstoff Cyantraniliprole eine teilsystemische Wirkung und somit auch einen Effekt auf die Eier und die Larven der Kirschessigfliege (Shawer et al., 2018; Shaw et al., 2019b). Beim Einsatz von Insektiziden ist weiterhin deren Regen- sowie UV-Stabilität von Bedeutung für den zu erwartenden Behandlungserfolg (Van Timmeren & Isaacs, 2013). Die Anwendung der genannten Insektizide gegen die Kirschessigfliege ist nicht in allen betroffenen obstbaulichen Kulturen und nicht in jedem Jahr möglich. Für jede Kultur ist daher die Indikation und bei befristeten Notfallzulassungen nach Art. 53 der aktuelle Zulassungstand pro Jahr sowie die spezifische Wartezeit vor der Ernte (d. h. Rückstandsproblematik) zu beachten. Für die Anwendung im Privatgarten stehen keine Insektizide zur Verfügung.

In der Pflanzenschutzberatung sind seit einigen Jahren kulturtechnische und kulturhygienische Maßnahmen zur Regulierung der Kirschessigfliege etabliert (Kuske et al., 2016; Überblick in LTZ Augustenberg, 2019a; b; Weber & Kockerols, 2016; Wichura et al., 2018). Zur Überwachung des Auftretens der Fliegen v. a. zu Saisonbeginn wird das Monitoring mit gelochten Becherfallen empfohlen. Ab dem Beginn der Fruchtreife sollen regelmäßig visuelle Bonituren der Früchte auf vorhandene Eier der Kirschessigfliege erfolgen (Kirschen) bzw. beim Beerenobst kann der Fruchtbefall durch das Auswaschen der Larven in Salzwasser ermittelt werden (LTZ Augustenberg, 2019a; b; Vogt, 2020). Kurze Ernteintervalle, um zu vermeiden, dass reife Früchte über längere Zeit für die Eiablage zur Verfügung stehen, sowie Entfernen von Fallobst und möglichst schnelles Kühlen des Ernteguts auf Temperaturen von 1-3°C sind wichtig, um den Ernteverlust so gering wie möglich zu halten (Leach et al., 2018). Falls Fruchtbefall festgestellt wurde, sollten nicht marktfähige Früchte gepflückt und Larven bzw. Eier durch Vergären oder Solarisation abgetötet werden. Befallene Früchte müssen dazu in geschlossenen Behältern gelagert werden.

Die derzeit wirksamste, nachhaltigste und rein mechanische Bekämpfungsstrategie ist die Einnetzung der gesamten Obstanlage mit feinmaschigen Insektennetzen (0,8 × 0,8 mm oder 0,8 × 1,0 mm Maschenweite, bzw. < 1 mm²) (Weydert

et al., 2014; Kuesel et al., 2019; Augel et al. 2020, <https://droso-demo-netz.julius-kuehn.de>) (Abb. 1). Die Netze müssen spätestens zum Farbumschlag der Früchte geschlossen werden. Im Beerenobst, v. a. bei Himbeeren, ist es wegen der fortlaufenden Blütenentwicklung erforderlich, unter den Netzen Bestäuber (Hummeln) einzusetzen. Bei Kirschen dagegen werden die Netze meist erst nach dem Fruchtansatz geschlossen. Erfolgt das Schließen früher, müssen auch hier Bestäuber eingesetzt werden.

Zur Evaluierung der wirtschaftlichen und befallsreduzierenden Wirkung von Einnetzungen der Obstanlage wird unter der Leitung des Julius Kühn-Instituts, Institut für Pflanzenschutz in Obst und Weinbau (OW) in Dossenheim seit 02/2017 unter Beteiligung der LWK Nordrhein-Westfalen, der LWK Niedersachsen und des LTZ Augustenberg (Baden-Württemberg) ein vom BMEL gefördertes Modell- und Demonstrationsvorhaben durchgeführt (Demonstrationsvorhaben: „Einnetzen von Obstkulturen zu Schutz gegen die Kirschessigfliege, *Drosophila suzukii*“, Förderkennzeichen 2815MD010). Hauptziel dieses Vorhabens ist, das Einnetzen von Obstkulturen in der Praxis umzusetzen und als Standard-Regulierungsstrategie gegen *D. suzukii* zu verbreiten. Dabei werden auch die bundesweiten Ziele des Nationalen Aktionsplans für die nachhaltige Verwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP) berücksichtigt. Seit 31.07.2020 ist außerdem in Baden-Württemberg die Gesetzesnovelle im Naturschutzgesetz (NaturSchG) und im Landwirtschaft- und Landeskulturgesetz (LLG) zur Stärkung der Biodiversität in Kraft getreten, die den Ausbau des ökologischen Landbaus und eine Reduktion von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln um 40-50 % (PflSchAnwVO) bis zum Jahr 2030 zum Ziel hat (<https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-themen/biodiversitaet-und-landnutzung/biodiversitaetsgesetz/>).

An dem Modell- und Demonstrationsvorhaben waren bis Ende 2019 insgesamt 22 Betriebe aus drei Bundesländern (BW, NI, NRW) beteiligt und bis Projektende im Dezember



Abb. 1. Beispiel einer eingenetzten Obstanlage. Eingenetzte und nicht-eingenetzte Himbeeranlage mit Regenkappen eines am Demonstrationsvorhaben zum „Einnetzen von Obstkulturen als Schutz gegen die Kirschessigfliege, *Drosophila suzukii*“ beteiligten Betriebes in NRW (Bildautorin: Silke Benz, LWK, NRW).

2021 noch 15 Betriebe aus Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen. Die Arbeiten an Süßkirschen und Beerenobstkulturen unter Netz wurden in jedem Bundesland von Projektbetreuern begleitet. In jedem der Betriebe wurden der technische Ablauf der Einnetzung und die angewandte Konstruktion validiert und optimiert. Zusätzlich erfolgten Erhebungen zur Auswirkung der Netze auf Nützlinge (v. a. Fressfeinde) und zum Auftreten weiterer Schaderreger, z. B. Spinnmilben und Fruchtschalenwickler, sowie durch Pilzbefall verursachte Krankheiten. Zur Erfassung möglicher Veränderungen des Mikroklimas durch das Einnetzen wurden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit kontinuierlich mittels Datenloggern in den eingenetzten Beständen gemessen (Abb. 2A, B).

Die betriebswirtschaftliche Bewertung der Einnetzungen erfolgte in einem Teilprojekt des Demonstrationsvorhabens durch das Julius Kühn-Institut, Institut für Strategien und Folgenabschätzung (SF) in Kleinmachnow.

Begleitet wird dieses Projekt durch intensive Öffentlichkeitsarbeit in Form von Hoftagen, Vorträgen auf Fachtagungen, Kurzfilmen auf YouTube, Faltblättern und Veröffentlichungen in Fachzeitschriften. Generell zeigten die Netze eine sehr gute Schutzwirkung gegen den Befall der Kirschessigfliege in jeder der untersuchten Kulturen. Innerhalb der Einnetzungen waren wenige bis keine Kirschessigfliegen zu finden und es trat kein oder nur vernachlässigbarer Fruchtbefall auf (Abb. 3A, B).

Die im Rahmen des Projektes produzierten und auf YouTube zu sehenden Video-Filme stellen mehrere am Projekt beteiligte Betriebe mit unterschiedlichen Systemen der Einnetzung vor und zeigen wichtige Aspekte des Einnetzens, die es zu beachten gilt, um die bestmögliche Wirkung zu erzielen. Ebenso wird die Methodik zur Überwachung des Auftretens der Kirschessigfliege (Adulte, Larvenbefall) vorgestellt und beschrieben. Video-Interviews mit Betriebsleitern geben einen sehr guten Einblick in die Praxis des Einnetzens. Ein animierter Erklärfilm erläutert, warum es wichtig ist, Einnetzungen zu etablieren. (<https://www.youtube.com/playlist?list=PL1s9INnnONTvHROkt49bFS6GE19FZvTrt>).

Auf der Projektseite des Demovorhabens (<https://droso-demo-netz.julius-kuehn.de>) und auf dem Wissensportal Drosophila des JKI (<https://drosophila.julius-kuehn.de/>) werden umfangreiche Informationen zu Biologie, zur Verbreitung und zum Management der Kirschessigfliege bereitgestellt.

Eine positive Nebenwirkung der Netze war der Schutz gegen andere Schaderreger an den Früchten, wie z. B. die Kirschfruchtfliege. Zu beachten ist jedoch sowohl für die Kirschessigfliege als auch für andere Schaderreger am Obst, dass zum Zeitpunkt des Schließens der Netze die Gefahr besteht, dass Schädlinge bereits eingedrungen sind und sich schnell und ungehindert ausbreiten können, da z. B. nachfolgende Nützlinge ausgeschlossen werden. Falls dies der Fall ist, können

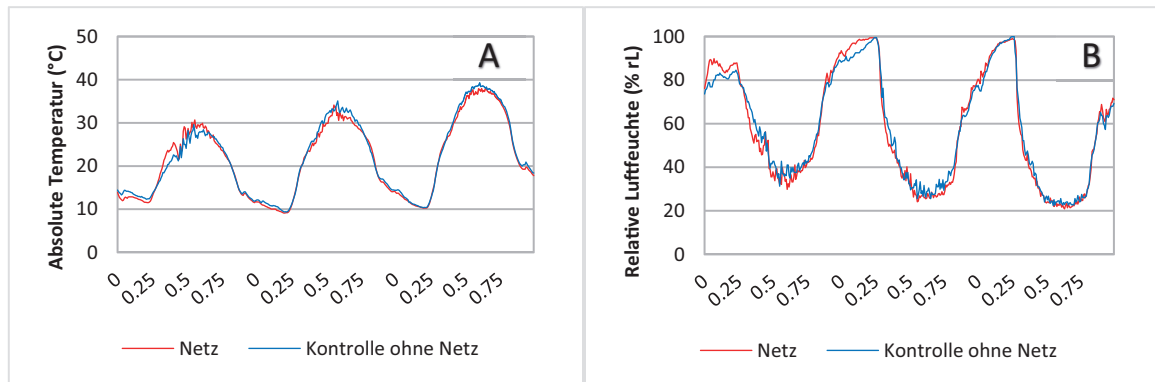


Abb. 2. Daten zum Mikroklima in Obstanlagen auf einem Demonstrationsbetrieb. Absolute Temperatur (A) und relative Luftfeuchte (B) innerhalb einer eingenetzten Himbeeranlage (Netz) und der nicht eingenetzten Kontrollparzelle während einer Dreitageperiode auf einem Betrieb in NRW. Die Daten wurden kontinuierlich mit Datenloggern erhoben.

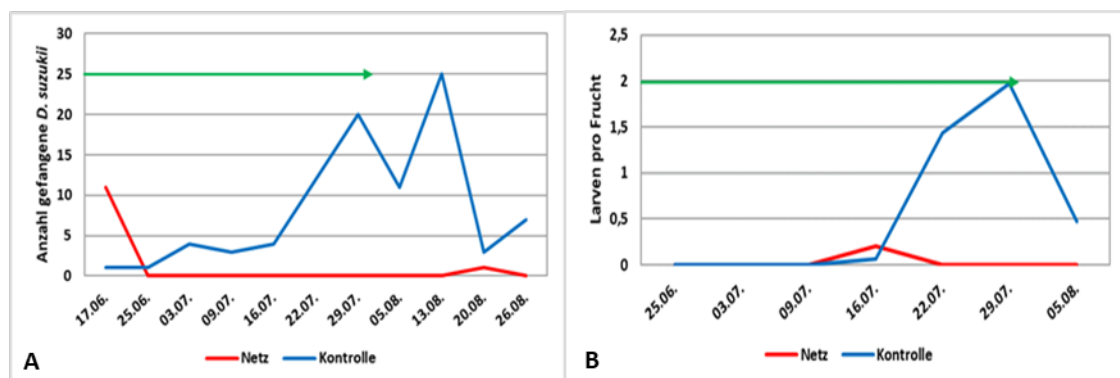


Abb. 3. Beispiel für Fallenfänge und Fruchtbefall durch die Kirschessigfliege in einem Demonstrationsbetrieb. Vergleichende Fallenfänge (A) und Fruchtbefall (B) in eingenetzten und nicht-eingenetzten Himbeeranlagen auf einem Betrieb in NRW (s. Abb. 1).

spezifische Insektizide oder Nützlinge gezielt eingesetzt werden.

Das Auftreten der Kirschessigfliege wird vor und während der Reifezeiten der eingenetzten Früchte mit Hilfe von Essigfallen überwacht. Sind Kirschessigfliegen zum Zeitpunkt des Schließens der Netze bereits im Bestand, muss direkt nach dem Schließen der Netze eine Insektizidanwendung durchgeführt werden.

Als weiterer Baustein einer nachhaltigen Bekämpfungsstrategie gegen *D. suzukii* wird eine gezielte Freilassung von für diesen Zweck gezüchteten, wirtsspezifischen Parasitoiden untersucht. Dabei sind zwei Arten von Pupalparasitoiden von besonderem Interesse: die kosmopolitische Art *Trichopria drosophilae* (Hymenoptera: Diapriidae) (Abb. 4) und die ebenfalls weltweit verbreitete Erzwespe, *Pachycrepoideus vindemiae* (Hymenoptera: Pteromalidae) (Rossi Stacconi et al., 2019; Englert & Herz, 2019; Wolf et al., 2019).

Der Fokus eines aktuellen Forschungsprojektes liegt dabei auf Freilassungen dieser Parasitoide in geschützten, d. h. eingenetzten Anlagen. Im Rahmen des im Frühsommer 2021 begonnenen und vom BMEL geförderten Projektes zur Anwendung von Pupalparasitoiden gegen die Kirschessigfliege unter der Leitung des Instituts für Biologischen Pflanzenschutz des JKI in Zusammenarbeit mit dem Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau des JKI in Dossenheim, der Hochschule Geisenheim und der Fa. Katz Biotech AG wird untersucht, wie parasitische Schlupfwespen in eingenetzten Beerenkulturen effizient zur Regulierung von *D. suzukii* beitragen (Verbundprojekt: „Anwendung von Pupalparasitoiden zur biologischen Regulierung der Kirschessigfliege in der Praxis (ParaDrosu)“, Förderkennzeichen 281 880 5A19, 2021-2024). Das Ziel ist die Massenzucht von Pupalparasitoiden für die kommerzielle Anwendung in verschiedenen Kulturen unter Netz, wodurch langfristig gesehen der Insektizideinsatz zur Bekämpfung der Kirschessigfliege weiter reduziert und die Vermarktbarkeit der Früchte gesichert werden sollen. Es gibt zudem Hinweise aus der Forschung, dass diejenigen Pflanzenschutzmittel, die effizient gegen die Kirschessigfliege im Beerenobst eingesetzt

werden, negative Wirkungen auf diese Pupalparasitoide haben (Schlesener et al., 2019). Um diese Frage beantworten zu können, werden im oben genannten Forschungsprojekt Laboruntersuchungen und Freilandstudien auf dem Versuchsfeld des JKI in Dossenheim sowie in Praxisbetrieben durchgeführt.

Invasive Schadwanzen – *Halyomorpha halys* und *Nezara viridula*

Bei den invasiven Schadwanzenarten sind es die Marmorier-te Baumwanze, *Halyomorpha halys*, und die Grüne Reiswanze, *Nezara viridula*, die in der letzten Dekade zunehmend wirtschaftliche Probleme im Obstbau sowie im Garten- und Ackerbau verursachen und europaweit sowie im nordamerikanischen Raum zu einem vieldiskutierten Thema geworden sind (Leskey & Nielsen, 2018; Dieckhoff et al., 2020) (Abb. 5A, B). Diese beiden Schadwanzenarten sind aus (sub-) tropischen Regionen Asiens bzw. Afrika eingeschleppt worden und profitieren von den zunehmend wärmeren Klimabedingungen in Mitteleuropa (Werner, 2005; Hays & Zimmermann, 2017).

Sie zeichnen sich durch ein sehr breites Wirtspflanzenspektrum aus und befallen Arten aus dem Kern- und Steinobstbereich ebenso gerne wie diverses Beerenobst. Besonders beliebt sind Birne, Apfel und Pfirsich sowie Vertreter der Sonderkulturen, z. B. Kiwi (Todd, 1989; Leskey & Nielsen, 2018). Bei einem frühen Befall der Früchte kann es durch die Saugschäden zum Abstoßen oder zu Verkrüppelungen der sich entwickelnden Früchte kommen. Ein später Befall kann bei der Ernte, in Abhängigkeit von Kultur und Sorte, unter Umständen zunächst unentdeckt bleiben und sich erst in der Lagerung entwickeln (Acebes-Doria et al., 2016; Bergh et al., 2019). Eine Direktvermarktung der geschädigten Früchte ist in der Regel nicht mehr möglich. Besonders *H. halys* hat sich zu einem wirtschaftlich bedeutenden Schadorganismus in den neu besiedelten Obstanbaugebieten entwickelt. Apfelanbauer in den mittelatlantischen Regionen der USA hatten 2010, knapp 20 Jahre nach der Einschleppung von *H. halys*,



Abb. 4. Puppenparasitoid bei der Eiablage. Weibchen der Schlupfwespe *Trichopria drosophilae* (Hymenoptera: Diapriidae) bei der Eiablage in eine Puppe von *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) (Bildautorin: Camilla Englert, JKI).



Abb. 5. Invasive Stinkwanzen auf Früchten. (A) Adulte *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) auf Himbeere (Bildautorin: Christine Dieckhoff, LTZ); (B) Ansammlung von *H. halys* Nymphen auf Nektarinen. Unterschiedliche Entwicklungsstadien von Nymphen der Marmorierten Baumwanze saugen an Nektarinen (Bildautorin: Kirsten Köppler, LTZ).

erstmalig wirtschaftliche Schäden in Höhe von 37 Mio. USD berichtet (Rice et al., 2014). Im Zuge der Bekämpfung der Schadwanzen in den Kulturen wurde bis zur vierfachen der sonst üblichen Menge an Insektiziden ausgebracht, was eine hohe ökologische Belastung darstellt (Leskey et al., 2012a). Für Italien wurde die Marmorierete Baumwanze erstmals 2012 beschrieben und hatte sich bereits ein Jahr später in mehreren wirtschaftlich bedeutenden Anbaugebieten Norditaliens ausgebreitet (Haye et al., 2015). Aus diesen Regionen werden seit 2014 zunehmend wirtschaftliche Schäden gemeldet (Köppler et al., 2020), die sich im Jahr 2019 (d. h. weniger als zehn Jahre nach der Einschleppung) infolge hoher Populationsdichten in Birnen, Pfirsichen und Nektarinen auf einen wirtschaftlichen Verlust von über 356 Mio. € ausweiteten (Maistrello et al., 2020). Diese Schaderregerentwicklung hatte zudem eine erhöhte Ausbringung an Pflanzenschutzmitteln in den betroffenen Obstanbaugebieten zur Folge (Maistrello et al., 2017).

Aufgrund der Biologie und der Lebensweise der Schadwanzen, die sich durch eine hohe Mobilität in Zeit und Raum auszeichnen, ist eine chemische Bekämpfung grundsätzlich nur sehr schwer durchführbar. Nymphen wie adulte Tiere verstecken sich oft auf der Blattunterseite, wodurch sie vor Fraßfeinden und auch vor Insektizidapplikationen teilweise geschützt sind. Kontinuierliche Zuwanderungen von Individuen aus den umliegenden Rand- und Saumstrukturen vergrößern die Populationen an einem Standort laufend und erschweren so zusätzlich eine effektive Bekämpfung. Zudem zeichnet sich die Marmorierete Baumwanze durch eine sehr hohe Widerstandsfähigkeit gegen die meisten verfügbaren Wirkstoffe aus. In Deutschland (ebenso wie in der Schweiz und Österreich) sind derzeit keine wirksamen Pflanzenschutzmittel für den Obstbau zugelassen. Studien aus Nordamerika zeigten zum Beispiel eine gute Wirkung zur Regulierung der Marmorierten Baumwanze bei Wirkstoffen wie Dimethoat, Malathion, Permethrin, Chlorpyrifos und Endosulfan (Aigner et al., 2015; Leskey et al., 2012b; Leskey & Nielsen 2018). Diese Mittel haben in Deutschland und zum Teil auch EU-weit (Endosulfan, Chlorpyrifos) keine Zulassung mehr.

Einnetzung der Bestände, wie sie bereits gegen andere Schaderreger wie die invasive Kirschessigfliege durchgeführt werden, können auch einen gewissen Schutz gegen Schadwanzen bieten (Candian et al., 2018; Maistrello et al., 2020; Candian et al., 2021). Der Zeitpunkt der Einnetzung, eine dicht abschließende Konstruktion und regelmäßige Kontrolle der Integrität der Netze ist entscheidend für einen Erfolg dieser Maßnahmen. In Obstanbaugebieten in der Emilia-Romagna (Italien) wurden positive Erfahrungen mit Insektenschutznetzen mit einer Maschenweite von ca. 4 × 2 mm gemacht. An den Anlagenrändern angebracht können sie den Einflug der Wanzen aus den Saumbereichen reduzieren (Torggler, 2020). Aus Italien wird auch berichtet, dass das ursprünglich gegen Apfelwickler entwickelte Alt'Carpo-Insektenschutznetz erfolgreich gegen die Marmorierete Baumwanze eingesetzt wurde (Romet et al. 2010; Tavella, 2021).

Vorkommen und Dichte der Populationen von Schadinsekten in Obstbeständen können mithilfe von Fallen oder Fallensystemen ermittelt werden. Lockstofffallen sind hierbei wichtige Hilfsmittel. Für die Marmorierete Baumwanze wurde bereits ein wirksamer Lockstoff entwickelt, der auf dem

Aggregationspheromon der adulten Tiere basiert (Khrimian et al., 2014). Besonders im Frühjahr und Herbst sind diese Pheromonfallen erfahrungsgemäß sowohl für Adulte als auch Nymphen besonders fängig. Während der Sommermonate allerdings haben reife Früchte einer Vielzahl von Wirtspflanzen eine höhere Attraktivität für die Wanzen, was sich in den Fangzahlen der Pheromonfallen in dieser Zeit niederschlägt (LTZ – pers. Beobachtung).

Abgesehen von einer klassischen Monitoringstrategie können derartige Lockstoffe mit dem Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel in sog. „attract-and-kill“ Strategien kombiniert werden und so zur Bekämpfung von Schadpopulationen in den Beständen beitragen. In den USA wurde eine solche Strategie erfolgreich in kommerziellen Apfelanlagen eingesetzt (Morrison et al., 2019). In Deutschland wird die Umsetzung einer solchen Maßnahme durch den Mangel an effektiven Wirkstoffen und fehlende Zulassungen erschwert. Für die Grüne Reiswanze stehen zu diesem Zeitpunkt keine wirksamen Lockstoffe zur Verfügung.

Parasitoide, vor allem Arten in den Familien Scelionidae, Eupelmidae (Hymenoptera) und Tachinidae (Diptera), gehören zu den wichtigsten natürlichen Gegenspielern von Baumwanzen. Dabei sind es v. a. Arten der Gattungen *Trissolcus* (Hymenoptera: Scelionidae) (Jones, 1988; Orr, 1988) und *Anastatus* (Hymenoptera: Eupelmidae) sowie *Telenomus* (Hym.: Scelionidae), die erfolgreich Eigelege von Stinkwanzen parasitieren (Dieckhoff et al., 2017; Costi et al., 2019; Stahl et al., 2019a). Arten in der Gattung *Trissolcus* spp. sind auf eine oder einige wenige Wirtsarten aus derselben Gattung oder nahe verwandten Gattungen in derselben Ordnung spezialisiert. Sie stellen somit ideale Kandidaten für Bekämpfungsstrategien im Sinne des biologischen Pflanzenschutzes dar. In Deutschland parasitiert *Trissolcus basalis* erfolgreich die Grüne Reiswanze im Freiland ebenso wie im geschützten Anbau (unveröffentlichte Daten LTZ). Zwei mit der Marmorierten Baumwanze im Ursprungsland Asien vergesellschaftete Eiparasitoide, *T. japonicus* und *T. mitsukurii*, wurden in Europa erstmals 2017 sowohl in Italien (*T. japonicus* und *T. mitsukurii*) als auch in der Schweiz (*T. japonicus*) nachgewiesen und 2020 dann auch in Deutschland (*T. japonicus*) (Peverieri et al., 2018; Stahl et al., 2019b; Scaccini et al., 2020; Dieckhoff et al., 2021) (Abb. 6). Es ist davon auszugehen, dass diese Eiparasitoide zusammen



Abb. 6. Eiparasitoid *Trissolcus japonicus* („Samuraiwespe“). Ein Männchen von *T. japonicus* (Hymenoptera: Scelionidae) kurz nach dem Schlupf auf einem Eigelege der Marmorierten Baumwanze (Hemiptera: Pentatomidae) (Bildautor: Olaf Zimmermann, LTZ).

mit ihrem Wirt verschleppt wurden. Mit Parasitierungsraten von bis zu 70 % ist *T. japonicus* im Ursprungsland ein wichtiger Gegenspieler von *H. halys* und zeigt auch in seinen neuen Ausbreitungsgebieten bereits hohe Parasitierungsraten gegenüber einheimischen Eiparasitoiden auf (Yang et al., 2009; Talamas et al. 2013; Zapponi et al., 2021).

In einem vom BMEL-geförderten Verbundprojekt „Monitoring und Modellierung klimasensitiver Schaderreger (ProgRAMM)“ (Laufzeit: 04/2021-01/2022, FKZ: 2818713A19) wurden exemplarisch verschiedene invasive Schadinsekten kartiert und deren potentielle Ausbreitung modelliert (Hess et al., 2020). Das Projekt hat die Kartierung von *H. halys* und *N. viridula* in Deutschland maßgeblich vorangebracht und konnte für die Marmorierte Baumwanze die Verbreitung vom Erstnachweis 2011 in Konstanz am Bodensee (Heckmann, 2012) bis nach Hamburg im Jahr 2018 dokumentieren (s. auch: <https://www.neobiota-hamburg.de/de/arten>). In diesem Projekt wurde ein deutschlandweites Monitoring-Netzwerk aufgebaut, auf das für Forschungsarbeiten zum Auftreten der invasiven Baumwanzen als Schädlinge in Obstkulturen und der Suche nach natürlichen Gegenspielern aufgebaut werden kann.

In dem, in diesem Frühjahr begonnenen, vom BMEL-geförderten Verbundprojekt „Entwicklung biologischer Pflanzenschutzstrategien gegen invasive nicht-geregelte Wanzenarten mit hohem Schadpotential (BC-InStink)“ (Laufzeit: 04/2021-03/2024, FKZ: 2818713A19) werden spezifische Pflanzenschutzstrategien gegen *H. halys* und *N. viridula* im Obstbau untersucht und entwickelt. Grundlage der Strategien soll der Einsatz natürlicher Gegenspieler sein. An diesem Verbundprojekt sind das LTZ Augustenberg (Gesamtkoordination), das JKI Dossenheim sowie die Fa. Katz Biotech AG beteiligt. Im Rahmen des mehrere Versuchsanlagen und Praxisbetriebe umfassenden Monitorings sowie mittels Bonituren und Ausbringung von Ködoreigelegen an verschiedenen Standorten im Verbreitungsgebiet der Schadwanzen wird die Verbreitung von natürlichen Gegenspielern der Schadwanzen in Raum und Zeit untersucht. Ziel ist die Massenzucht geeigneter Gegenspieler für die kommerzielle Anwendung im Rahmen biologischer Pflanzenschutzstrategien. Weiterhin werden Studien durchgeführt, um wanzentypische Schäden von anderen in Obstanlagen häufig auftretenden Schadbildern abgrenzen zu können.

Ausblick

Für die vorgestellten invasiven Schadinsekten im Obst besteht aufgrund von derzeit fehlenden (Stinkwanzen) bzw. nur in geringem Umfang zugelassenen und bedingt wirksamen (Kirschessigfliege) Insektiziden umfassender Bedarf an Forschungsprojekten zur Entwicklung von alternativen, effizienten und nachhaltigen Regulierungsmechanismen. Vor dem Hintergrund des zunehmenden Wegfalls von Wirkstoffen im Zuge der sich EU-weit verschärfenden Zulassungsbedingungen (z. B. Anwenderschutz, cut off-Kriterien, Ökotoxizität), der geänderten Pflanzenschutz-Anwendungsverordnung, des bundesweiten Aktionsprogrammes zum Insektenschutz und der entsprechenden Änderungen im Naturschutzgesetz,

sowie des Risikos einer Resistenzbildung der Schadinsekten gegen die wenigen verbliebenen Wirkstoffe, liegt die Zukunft der Schädlingsbekämpfung im biologischen Pflanzenschutz. Die Entwicklung entsprechender Pflanzenschutzstrategien ist daher unumgänglich für eine langfristige Regulierung der Populationen invasiver Schädlinge in allen Kulturbeständen. Dabei werden Strategien des biologischen Pflanzenschutzes in Kombination mit kulturspezifischen pflanzenbaulichen und anbautechnischen Maßnahmen zur Anwendung kommen. Es besteht aktuell dringender Forschungsbedarf, die bereits erarbeiteten biologischen und IP-Strategien mit Hilfe von konkreten, z. T. regional abgestimmten Maßnahmenkatalogen umzusetzen und dies wissenschaftlich zu begleiten.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autorinnen und Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- Acebes-Doria, A.L., T.C. Leskey, J.C. Bergh, 2016:** Injury to apples and peaches at harvest from feeding by *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera: Pentatomidae) nymphs early and late in the season. *Crop Protection* **8**, 58-65, DOI: 10.1016/j.cropro.2016.06.022.
- Aigner, J.D., J.F. Walgenbach, T.P. Kuhar, 2015:** Toxicities of neonicotinoid insecticides for systemic control of brown marmorated stink bug (Hemiptera: Pentatomidae) in fruiting vegetables. *Journal of Agricultural and Urban Entomology* **31**, 70-80.
- Asplen, M.K.; G. Anfora, A. Biondi, D.S. Choi, D. Chu, K.M. Daane, P. Gibert, A.P. Gutierrez, K.A. Hoelmer, W.D. Hutchison, R. Isaacs, Z.L. Jiang, Z. Karpate, M.T. Kimura, M. Pascual, C.R. Philips, C. Plantamp, L. Ponti, G. Vetek, H. Vogt, V.M. Walton, Y. Yu, L. Zappala, N. Desneux, 2015:** Invasion biology of spotted wing drosophila (*Drosophila suzukii*): a global perspective and future priorities. *Journal of Pest Science* **88**, 469-494, DOI: doi.org/10.1007/s10340-015-0681-z.
- Atallah, J., L. Teixeira, R. Salazar, G. Zaragoza, A. Kopp, 2014:** The making of a pest: the evolution of a fruit-penetrating ovipositor in *Drosophila suzukii* and related species. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B* **281**, 20132840.
- Augel, C., B. Boehnke, J. Wichura, J. Lindstaedt, J.-H. Wiebusch, A. Engel, S. Benz, J. Saltzmann, G. Eberhardt, H. Vogt, K. Köppler, 2020:** Demonstration project "Exclusion netting for managing Spotted Wing Drosophila in fruit crops" – Results 2017 – 2019. *Proceedings of the 19th International Conference on Organic Fruit-Growing from February 17th to 19th, 2020, University of Hohenheim, Germany (ed. Fördergemeinschaft Ökologischer Obstbau e. V., Weinsberg, Germany), pp. 166-169.*
- Bergh, J. C., S.V. Joseph, B.D. Short, M. Nita, T.C. Leskey, 2019:** Effect of pre-harvest exposures to adult *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) on feeding injury to apple cultivars at harvest and during post-harvest cold storage. *Crop Protection* **124**, 104872, DOI: 10.1016/j.cropro.2019.104872.

- Bräcker, L.B., X. Gong, C. Schmid, C. Dawid, D. Ulrich, T. Phung, A. Leonhard, J. Ainswort, K. Olbricht, M. Parniske, N. Gompel, 2020:** A strawberry accession with elevated methyl anthranilate fruit concentration is naturally resistant to the pest fly *Drosophila suzukii*. *PLoS one* **15** (6), e0234040, DOI: 10.1371/journal.pone.0234040.
- Bradshaw, C.J.A., B. Leroy, C. Bellard, D. Roíz, C. Albert, A. Fournier, M. Barbet-Massin, J.M. Salles, F. Simard, F. Courchamp, 2016:** Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects. *Nature Communications* **7**: 12986; DOI: 10.1038/ncomms1298.
- Candian, V., M.G. Pansa, R. Briano, C. Peano, R. Tedeschi, 2018:** Exclusion nets: a promising tool to prevent *Halyomorpha halys* from damaging nectarines and apples in NW Italy. *Bulletin of Insectology* **71** (1), 21–30.
- Candian, V., M.G. Pansa, K. Santoro, D. Spadaro, R. Briano, C. Peano, L. Tavella, R. Tedeschi, 2021:** First Multi-Target Application of Exclusion Net in Nectarine Orchards: Effectiveness against Pests and Impact on Beneficial Arthropods, Postharvest Rots and Fruit Quality. *Insects* **12** (3), 210, DOI: 10.3390/insects12030210.
- Cha, D. H., T. Adams, H. Rogg, P.J. Landolt, 2012:** Identification and field evaluation of fermentation volatiles from wine and vinegar that mediate attraction of spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii*. *Journal of Chemical Ecology* **38**, 1419–1431.
- Cloonan, K.R., J. Hernández-Cumplido, A.L. Viana de Sousa, D.G. Ramalho, H.J. Burrack, L. Della Rosa, L.M. Diepenbrock et al., 2019:** Laboratory and field evaluation of host-related foraging odor-cue combinations to attract *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae). *Journal of Economic Entomology* **112**, 2850–2860, DOI: 10.1093/jee/toz224.
- Clymans, R., V. Van Kerckvoorde, E. Banghes, W. Akkermans, A. Alhmedi, P. DeClercq, T. Beliën, D. Bylemans, 2019:** Olfactory preference of *Drosophila suzukii* shifts between fruit and fermentation cues over the season: effects of physiological status. *Insects* **10**, 200, DOI: 10.3390/insects10070200.
- Costi, E., T. Haye, L. Maistrello, 2019:** Surveying native egg parasitoids and predators of the invasive *Halyomorpha halys* in Northern Italy. *Journal of Applied Entomology* **143** (3), 299–307, DOI: 10.1111/jen.12590.
- Dieckhoff, C., K. Köppler, A. Reissig, H. Schneller, O. Zimmermann, 2020:** Die Marmorierete Baumwanze und die Grüne Reiswanze – neue Schadwanzen im Obstbau. *Öko-Obstbau*, **1**, 16–20.
- Dieckhoff, C., K.M. Tatman, K.A. Hoelmer, 2017:** Natural biological control of *Halyomorpha halys* by native egg parasitoids: a multi-year survey in northern Delaware. *Journal of Pest Science*, **90** (4), 1143–1158, DOI: 10.1007/s10340-017-0868-6.
- Dieckhoff, C., S. Wenz, M. Renninger, A. Reißig, H. Rauleder, C.P.W. Zebitz, J. Reetz, O. Zimmermann, 2021:** Add Germany to the List—Adventive Population of *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera: Scelionidae) Emerges in Germany. *Insects* **12** (5), DOI: 10.3390/insects12050414.
- Eben, A., M. Reifenrath, F. Briem, S. Pink, H. Vogt, 2018:** Response of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) to extreme heat and dryness. *Agricultural and Forest Entomology* **20**, 113–121, DOI: 10.1111/afe.12235.
- Eben, A., F. Sporer, H. Vogt, P. Wetterauer, M. Wink, 2020:** Search for alternative control strategies of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): Laboratory assays using volatile natural plant compounds. *Insects* **11**, 811, DOI:10.3390/insects11110811.
- Englert, C., A. Herz, 2019:** Zur Bedeutung heimischer *Drosophila*-Parasitoide für die Regulierung von *Drosophila suzukii* – Vom Freiland über das Labor zum Freiland. In: Deutsche Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie, Tagung Halle (Saale) 11.–14. März, Tagungsband 45–46.
- Erland, L.A.E., M.R. Rheault, S.S. Mahmoud, 2015:** Insecticidal and oviposition deterrent effects of essential oils and their constituents against the invasive pest *Drosophila suzukii* (Matsumura) (Diptera: Drosophilidae). *Crop Protection* **78**, 20–26, DOI: 10.1016/j.cropro.2015.08.013.
- Fanning, P.D., M.J. Grieshop, R. Isaacs, 2017:** Efficacy of biopesticides on spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* Matsumura in fall red raspberries. *Journal of Agricultural Entomology* **142**, 26–32, DOI: 10.1111/jen.12462.
- Feng, Y., R. Bruton, A. Park, A. Zhang, 2018:** Identification of attractive blend for spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii*, from apple juice. *Journal of Pest Science* **91**, 1251–1267, DOI: 10.1007/s10340-018-1006-9.
- Gress, B.E., F.G. Zalom, 2019:** Identification and risk assessment of spinosad resistance in a California population of *Drosophila suzukii*. *Pest Management Science* **75**, 1270–1275, DOI: 10.1002/ps.5240.
- Gutierrez, A.P., L. Ponti, 2014:** Analysis of invasive insects: links to climate change. In: Ziska L.H., Dukes J.S., (eds.). *Invasive Species and Global Climate Change*. CABI Publishing, Wallingford, UK: 45–61, DOI: 10.1079/9781780641645.0045.
- Hamby, K.A., R.S. Kwok, F.G. Zalom, J.C. Chiu, 2013:** Integrating circadian activity and gene expression profiles to predict chronotoxicity of *Drosophila suzukii* response to insecticides. *PLoS One*: **8**, e68472, DOI: 10.1371/journal.pone.0068472.
- Hamby, K.A., D.E. Bellamy, J.C. Chiu, J.C. Lee, V.M. Walton, N.G. Wiman, R.M. York, A. Biondi, 2016:** Biotic and abiotic factors impacting development, behaviour, phenology, and reproductive biology of *Drosophila suzukii*. *Journal of Pest Science* **89**, 605–619, DOI: 10.1007/s10340-016-0756-5.
- Harzer, U., J. Sauter, 2017:** Bekämpfungsstrategien gegen *Drosophila suzukii*: Insektizide. URL: [https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Ueber + uns/Publikationen + und + Ergebnisse](https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/,Lde/Startseite/Ueber+uns/Publikationen+und+Ergebnisse), accessed: 17.11.2021.
- Haye, T., O. Zimmermann, 2017:** Etablierung der marmorierten Baumwanze, *Halyomorpha halys* (Stal, 1855), in Deutschland. *Heteropteron* **4**,: 34–37.
- Haye, T., T. Gariépy, K. Hoelmer, J.-P. Rossi, J.-C. Streito, X. Tassus, N. Desneux, 2015:** Range expansion of the invasive brown marmorated stinkbug, *Halyomorpha halys*: an in-

- creasing threat to field, fruit and vegetable crops worldwide. *Journal of Pest Science* **88** (4), 665-673, DOI: 10.1007/s10340-015-0670-2.
- Haye, T., P. Girod, A.G.S. Cuthbertson, X.G. Wang, K.M. Daane, K.A. Hoelmer, C. Baroffio, J.P. Zhang, N. Desneux, 2016:** Current SWD IPM tactics and their practical implementation in fruit crops across different regions around the world. *Journal of Pest Science* **89**, 643-651, DOI: 10.1007/s10340-016-0737-8.
- Heckmann, R., 2012:** Erster Nachweis von *Halyomorpha halys* (Stål, 1855)(Heteroptera: Pentatomidae) für Deutschland. *Heteropteron* **36**: 17-18.
- Hemer, S. 2017:** Variety-depending susceptibility of cherries to *Drosophila suzukii* according to fruit firmness and other ripening parameters. MSc Thesis in Crop Protection, Göttingen University, Germany, pp. 40.
- Hess, B., P. Baufeld, A. Raja Dominic, C. Menz, A. Reising, J. Strassemeyer, T. Waldau, A. Wilstermann, O. Zimmermann, G. Schrader, 2020:** Modellierung klimasensitiver Schadorganismen in der Pflanzengesundheit. *Journal für Kulturpflanzen* **72**, 435-439, DOI:10.5073/JfK.2020.08.14.
- Jones, W., 1988:** World review of the parasitoids of the southern green stink bug, *Nezara viridula* (L.) (Heteroptera: Pentatomidae). *Annals of the Entomological Society of America* **70**, 1-33, DOI: 10.1093/aesa/81.2.262.
- Jung, J., S. Alexander, S. Bauer, U. Harzer, B. Kleinhenz, K. Köppler, P. Racca, R. Rayher, C. Tebbe, C. Weyland, A. Winkler, 2021:** SIMKEF – Das Entscheidungshilfesystem für die Kirschesigfliege: Validierungsergebnisse Befallsentwicklung in Brombeeren (Teil B), 63. Dt. PS-Tagung, Göttingen, Kurzfassungen.
- Keeseey, I.W., M. Knaden, B.S. Hansson, 2015:** Olfactory specialization in *Drosophila suzukii* supports an ecological shift in host preference from rotten to fresh fruit. *Journal of Chemical Ecology* **41**, 121-128 DOI: 10.1007/s10886-015-0544-3.
- Kenis, M., L. Tonina, R. Eschen, B. Van der Slius, M. Sancassani, N. Mori, T. Haye, H. Helsen, 2016:** Non-crop plants used as hosts by *Drosophila suzukii* in Europe. *Journal of Pest Science*, **89**, 735-748, DOI: 10.1007/s10340-016-0755-6.
- Khrimian, A., A. Zhang, D.C. Weber, H.-Y. Ho, J.R. Aldrich, K.E. Vermillion, M.A. Siegler, S. Shirali, F. Guzman, T.C. Leskey, 2014:** Discovery of the Aggregation Pheromone of the Brown Marmorated Stink Bug (*Halyomorpha halys*) through the Creation of Stereoisomeric Libraries of 1-Bisabolen-3-ols. *Journal of Natural Products*, **77** (7), 1708-1717 DOI: 10.1021/np5003753.
- Kirkpatrick, D.M., H.L. Leach, P. Xu, K. Dong, R. Isaacs, L.J. Gut, 2018:** Comparative antennal and behavioral responses of summer and winter morph *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) to ecologically relevant volatiles. *Environmental Entomology* **47**, 700-706, DOI: 10.1093/ee/nvy046.
- Klick, J., C.R. Rodriguez-Saona, J. Hernández Cumplido, R.J. Holdcraft, W.H. Urrutia, R.O. Da Silva, R. Borges, A. Nafra-Neto, M.P. Seagraves, 2019:** Testing a novel attract-and-kill strategy for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) management. *Journal of Insect Science* **19**, 3, 1-6, DOI: 10.1093/jisesa/iey132.
- Köppler, K., C. Dieckhoff, O. Zimmermann, A. Reissig, 2020:** Bekämpfung der Marmorierten Baumwanze. *Obstbau* **7**, 406-408.
- Köppler, K., J. Jung, U. Harzer, M. Püffeld, M. Gradl, C. Tebbe, A. Winker, P. Racca, B. Kleinhenz, 2019:** Spotted wing drosophila: Extremely meteorosensitive – a base for the development of a Decision Support System: IOBC-Tagung, 20.-25. Januar 2019, Lissabon.
- Kuesel, R., D. Scott Hick, K. Archer, A. Sciligo, R. Bessin, D. Gonthier, 2019:** Effects of fine-mesh exclusion netting on pests of blackberry. *Insects* **10**, 249, DOI: 10.3390/insects10080249.
- Kuske, S., L. Kaiser, A. Wichura, R.W.S. Weber, 2016:** Integrierte Bekämpfung der Kirschesigfliege. *Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau* **125**, 8-11.
- Leach, L., J. Moses, E. Hanson, P. Fanning, R. Isaacs, 2018:** Rapid harvest schedules and fruit removal as non-chemical approaches for managing spotted wing drosophila. *Journal of Pest Science* **91**, 219-226, DOI: 19.1007/s10340-017-0873-9.
- Leach, H., S. Van Timmeren, W. Wetzel, R. Isaacs, 2019:** Predicting within- and between-year variation in activity of the invasive spotted wing drosophila (Diptera: Drosophilidae) in a temperate region. *Environmental Entomology* **48**, 1223-1233.
- Lee, J.C., D.T. Dalton, K.A. Swoboda-Bhattarai, D.J. Bruck, H.J. Burrack, B.C. Strik, J.M. Woltz, V.M. Walton, 2016:** Characterization and manipulation of fruit susceptibility to *Drosophila suzukii*. *Journal of Pest Science* **89**, 771-780.
- Leskey, T.C., A.L. Nielsen, 2018:** Impact of the Invasive Brown Marmorated Stink Bug in North America and Europe: History, Biology, Ecology, and Management. *Annual Review of Entomology* **63** (1), 599-618, DOI: 10.1146/annurev-ent-020117-043226.
- Leskey, T.C., D. H. Lee, B.D. Short, S.E. Wright, 2012a:** Impact of insecticides on the invasive *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae): analysis of insecticide lethality. *Journal of Economic Entomology* **105**, 1726-1735.
- Leskey, T.C., B.D. Short, B.R. Butler, S.E. Wright, 2012b:** Impact of the Invasive Brown Marmorated Stink Bug, *Halyomorpha halys* (Stål), in Mid-Atlantic Tree Fruit Orchards in the United States: Case Studies of Commercial Management. *Psyche: A Journal of Entomology* 1-14, DOI: 10.1155/2012/535062.
- LtZ Augustenberg, 2019a:** Maßnahmenplan Kirschesigfliege: Beerenobst, InvaProtect – Nachhaltiger Pflanzenschutz gegen invasive Schaderreger im Obst- und Weinbau, INTERREG V Oberrhein, 2019, URL: www.ltz-augustenberg.de.
- LtZ Augustenberg, 2019b:** Maßnahmenplan Kirschesigfliege: Steinobst, InvaProtect – Nachhaltiger Pflanzenschutz gegen invasive Schaderreger im Obst- und Weinbau, INTERREG V Oberrhein, 2019, URL: www.ltz-augustenberg.de.
- Maistrello, L., S. Caruso, M.G. Tommasini, 2020:** Bioecology and management of *Halyomorpha halys* in fruit orchards in Southern Europe. ECOFRUIT 2020-19th International Conference on Organic Fruit Growing. Foedergemeinschaft Oekologischer Obstbau e. V. (FOEKO).

- Maistrello, L., G. Vaccari, S. Caruso, E. Costi, S. Bortolini, L. Macavei, G. Foca, A. Ulrici, P.P. Bortolotti, R. Nannini, L. Casoli, M. Fornaciari, G.L. Mazzoli, P. Dioli, 2017:** Monitoring of the invasive *Halyomorpha halys*, a new key pest of fruit orchards in northern Italy. *Journal of Pest Science* **90** (4), 1231-1244, DOI: 10.1007/s10340-017-0896-2.
- Mori, B.A., A.B. Whitener, Y. Leinweber, S. Revadi, E.H. Beers, P. Witzgall, P.G. Becher, 2017:** Enhanced yeast feeding following mating facilitates control of the invasive fruit pest *Drosophila suzukii*. *Journal of Applied Ecology* **54**, 170-177, DOI: 10.1111/1365-2664.12688.
- Morrison, W. R., B.R. Blaauw, B.D. Short, A.L. Nielsen, J.C. Bergh, G. Krawczyk, Y.-L. Park, B. Butler, A. Khirman, T.C. Leskey, 2019:** Successful management of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in commercial apple orchards with an attract-and-kill strategy: Attract-and-kill to manage *H. halys*. *Pest Management Science* **75** (1), 104-114, DOI:10.1002/ps.5156.
- Nikolouli, K., F. Sassú, L. Mouton, C. Stauffer, K. Bourtzis, C. Cáceres, 2020:** Combining sterile and incompatible insect techniques for the population suppression of *Drosophila suzukii*. *Journal of Pest Science* **93**: 647-661, DOI: 10.1007/s10340-020-01199-6.
- Orr, D.B., 1988:** Scelionid wasps as biological control agents: a review. *Florida Entomologist* **71** (4), 506-529, DOI: 10.2307/3495011.
- Ørsted, M., J. Lye, P.A. Umina, J.L. Maino, 2021:** Global analysis of the seasonal abundance of the invasive pest *Drosophila suzukii* reveal temperature extremes determine population activity potential. *Pest Management Science* **77**, 4555-4563, DOI: 10.1002/ps.6494.
- Peverieri, G. S., E. Talamas, M.C. Bon, L. Marianelli, I. Bernardinelli, G. Malossini, L. Benvenuto, P.F. Roversi, K. Hoelmer, 2018:** Two Asian egg parasitoids of *Halyomorpha halys* (Stål) (Hemiptera, Pentatomidae) emerge in northern Italy: *Trissolcus mitsukurii* (Ashmead) and *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera, Scelionidae). *Journal of Hymenoptera Research* **67**, 37-53, DOI: 10.3897/jhr.67.30883.
- Pinggera, J., Wöhner, T., Hanke, M.-V., 2018:** Evaluation of soft fruit genetic resources for resistance to the Spotted Wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*). *Journal für Kulturpflanzen* **70**, 67-68.
- Poyet, M., V. Le Roux, P. Gibert, A. Meirland, G. Prevost, P. Eslin, O. Chabrerie, 2015:** The wide potential trophic niche of the Asiatic fruit fly *Drosophila suzukii*: the key of its invasion success in temperate Europe? *PLoS One* **10**, e0142785, DOI: 10.1371/journal.pone.0142785.
- Renkema, J.M., R. Buitenhuis, R.H. Hallett, 2017:** Reduced *Drosophila suzukii* infestation in berries using deterrent compounds and laminate polymer flakes. *Insects* **8**, 117, DOI: 10.3390/insects8040117.
- Revadi, S., S. Vitagliano, M.V. Rossi Stacconi, S. Ramasamy, S. Mansourian, S. Carlin, U. Vrhovsek, P.G. Becher, V. Mazzoni, O. Rota-Stabelli, S. Angeli, T. Dekker, G. Anfora, 2015:** Olfactory responses of *Drosophila suzukii* females to host plant volatiles. *Physiological Entomology* **40**, 54-64, DOI: 10.1111/phen.12088.
- Rice, K. B., C.J. Bergh, E.J. Bergmann, D.J. Biddinger, C. Dieckhoff, G. Dively, H. Fraser, T. Garipey, G. Hamilton, T. Haye, A. Herbert, K. Hoelmer, C.R. Hooks, A. Jones, G. Krawczyk G. et al., 2014:** Biology, Ecology, and Management of Brown Marmorated Stink Bug (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Integrated Pest Management* **5** (3), 1-13, DOI: 10.1603/IPM14002.
- Rice, K.B., B.D. Short, T.C. Leskey, 2017:** Development of an attract-and-kill strategy for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae): Evaluation of attracticidal spheres under laboratory and field conditions. *Journal of Economic Entomology* **110** (2), 353-542, DOI: 10.1093/jee/tow319.
- Romet L., G. Severac, F. Warlop, 2010:** Overview of "ALT'CARPO" concept and its development in France. *Ecofruit – 14th International Conference on Cultivation Technique and Phytopathological Problems in Organic Fruit-Growing, Fördergemeinschaft Ökologischer Obstbau e. V. Weinsberg* **14**, 176-182.
- Rossi Stacconi, M.V.; A. Grassi, C. Ioriatti, G. Anfora, 2019:** Augmentative releases of *Trichopria drosophilae* for the suppression of early season *Drosophila suzukii* populations. *Bio-Control* **64**, 9-19, DOI: 10.1007/s10526-018-09914-0.
- Scaccini, D., M. Falagiarda, F. Tortorici, I. Martínez-Sañudo, P. Tirello, Y. Reyes-Domínguez, A. Gallmetzer, L. Tavella, P. Zandigiaco, C. Duso, A. Pozzebon, 2020:** An Insight into the Role of *Trissolcus mitsukurii* as Biological Control Agent of *Halyomorpha halys* in Northeastern Italy. *Insects* **11** (5), 306, DOI: 10.3390/insects11050306.
- Schetelig, M.F., K.-Z. Lee, S. Otto, L. Talmann, J. Stökl, T. Degenkolb, A. Vilcinskas, R. Halitschke, 2018:** Environmentally sustainable pest control options for *Drosophila suzukii*. *Journal of Applied Entomology* **142** (1-2), 3-17, DOI: 10.1111/jen.12469.
- Schlesener, D.C.H., J. Wollmann, J. De Bastos Pazini, A.C. Padilha, A.D. Grützmacher, F.R. Mello Garcia, 2019:** Insecticide toxicity to *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) parasitoids: *Trichopria anastrephae* (Hymenoptera: Diapriidae) and *Pachycrepoideus vindemmiae* (Hymenoptera: Pteromalidae). *Journal of Economic Entomology* **112**, 1197-1206, DOI: 10.1093/jee/toz033.
- Shaw, B., Brain, P., Wijnen, H., Fountain, M.T., 2019a:** Implications of sub-lethal rates of insecticides and daily time of application on *Drosophila suzukii* lifecycle. *Crop Protection* **121**, 182–194, DOI: 10.1016/j.cropro.2019.04.006.
- Shaw, B., S. Hemer, M.F.L. Cannon, F. Rogai, M.T. Fountain, 2019b:** Insecticide control of *Drosophila suzukii* in commercial sweet cherry crops under cladding. *Insects* **10**, 196, DOI: 10.3390/insects10070196.
- Shawer, R., L. Tonina, P. Tirello, C. Duso, N. Mori, 2018:** Laboratory and field trials to identify effective chemical control strategies for integrated management of *Drosophila suzukii* in European cherry orchards. *Crop Protection* **103**, 73–80, DOI: 10.1016/j.cropro.2017.09.010.

- Skendžić, S., M. Zovko, I. Pajač živković, V. Lešić, D. Lemić, 2021:** The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects* **12**, 440, DOI: 10.3390/insects12050440.
- Spitaler, U., F. Bianchi, D. Eisenstecken, I. Castellan, S. Angeli, N. Dordevic, P. Robatscher, R.F. Vogel, E.H. Hoschiers, S. Schmidt, 2020:** Yeast species affects feeding and fitness of *Drosophila suzukii* adults. *Journal of Pest Science* **93**, 1295–1309, DOI: 10.1007/s10340-020-01266-y.
- Stahl, J. M., D. Babendreier, T. Haye, 2019a:** Life history of *Anastatus bifasciatus*, a potential biological control agent of the brown marmorated stink bug in Europe. *Biological Control* **12**, 178-186, DOI: 10.1016/j.biocontrol.2018.10.016.
- Stahl, J., F. Tortorici, M. Pontini, M.-C. Bon, K. Hoelmer, C. Marazzi, L. Tavella, T. Haye, 2019b:** First discovery of adventive populations of *Trissolcus japonicus* in Europe. *Journal of Pest Science* **92** (2), 371-379, DOI: 10.1007/s10340-018-1061-2.
- Stockton, D.G., G.M. Loeb, 2021:** Winter warm-up frequency and the degree of temperature fluctuations affect survival outcomes of spotted-wing drosophila winter morphotypes. *Journal of Insect Physiology* **131**, 104246, DOI: 10.1016/j.jinphys.2021.104246.
- Talamas, E., M. Buffington, K. Hoelmer, 2013:** New synonymy of *Trissolcus halyomorphae* Yang. *Journal of Hymenoptera Research* **33**, 113-117, DOI: 10.3897/jhr.33.5627.
- Tavella, L., 2021:** Invasive Schadorganismen. Das Beispiel Marmorierter Baumwanze. *Obstbau Weinbau* **4**, 19-22.
- Tochen, S., D.T. Dalton, N. Wiman, C. Hamm, P.W. Shearer, V.M. Walton, 2014:** Temperature-related development and population parameters for *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) on cherry and blueberry. *Environmental Entomology* **43**, 501-510, DOI: 10.1603/EN13200.
- Todd, J. W., 1989:** Ecology and behavior of *Nezara viridula*. *Annual Review of Entomology* **34**, 273-292, DOI: 10.1146/annurev.en.34.010189.001421.
- Tonina, L., A. Grassi, S. Caruso, M. Mori, A. Gottardello, G. Anfora, F. Giomi, G. Vaccari, C. Ioriatti, 2018:** Comparison of attractants for *Drosophila suzukii* monitoring in sweet cherry orchards in Italy. *Journal of Applied Entomology* **142**, 8-25, DOI: 10.1111/jen.12416.
- Torggler, B., 2020:** Welches System hält Baumwanzen am besten fern? *Besseres Obst* **1**, 4-6
- Van Timmeren, S., R. Isaacs, 2013:** Control of spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii*, by specific insecticides and by conventional and organic crop protection programs. *Crop Protection* **54**, 126-133, DOI: 10.1016/j.cropro.2013.08.003.
- Van Timmeren, S., L. Horejsi, S. Larson, K. Spink, P. Fanning, R. Isaacs, 2017:** Diurnal activity of *Drosophila suzukii* (Diptera: Drosophilidae) in highbush blueberry and behavioral response to irrigation and application of insecticides. *Environmental Entomology* **46**, 1106–1114, DOI:10.1093/ee/nvx131.
- Venette, R.C., W.D. Hutchinson, 2021:** Invasive insect Species: Global Challenges, Strategies & Opportunities. *Frontiers in Insect Science* **1**, 650520, DOI: 10.3389/finsc.2021.650520.
- Vogt, H., C. Hoffmann, P. Baufeld, 2012:** Ein neuer Schädling, die Kirschessigfliege, *Drosophila suzukii* (Matsumura), bedroht Obst- und Weinkulturen. *Entomologische Nachrichten und Berichte* **56**, 191-196.
- Vogt, H. 2020:** Ein Winzling lehrt das Fürchten. Die invasive Kirschessigfliege – ein bedeutender Schädling. *Biologie in Unserer Zeit* **4** (50), DOI: 10.1002/biuz.202010710.
- Wallingford, A.K., H.L. Connelly, G.D. Brind'Amour, M.T. Boucher, A. Mafra-Neto, G.M. Loeb, 2016:** Field evaluation of an oviposition deterrent for management of spotted-wing drosophila, *Drosophila suzukii*, and potential nontarget effects. *Journal of Economic Entomology* **109**, 1779-1784, DOI: 10.1093/jee/tow116.
- Weber, R.W.S., M. Kockerols, 2016:** Die Kirschessigfliege im Steinobst an der Niederelbe 2016. *Mitteilungen des Obstbauversuchsrings des Alten Land* **71**, 303-307.
- Werner, D. J., 2005:** *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758) in Köln und Deutschland (Heteroptera, Pentatomidae). *Heteropteron* **21**, 29-30.
- Weydert, C., G. Charlot, J.-F. Mandrin, 2014:** Insect-proof nets to protect cherry trees from *Drosophila suzukii* and *Rhagoletis cerasi*. IOBC wprs, Integrated production of fruit crops (IFP) meeting, Vienna (Austria), October 6-9, 2014. Abstract & Poster.
- Wichura, A., A.-P. Entrop, F. Koschnick, 2018:** Kirschessigfliege (*Drosophila suzukii*) im Beerenobst: Bekämpfungsmaßnahmen. *Mitteilungen des Obstbauversuchsrings des Alten Land* **73**, 275-282.
- Wiman, N.G., V.M. Walton, D.R. Dalton, G. Anfora, H.J. Burack, J.C. Chiu, K.M. Daane, A. Grassi, B. Miller, S. Tochen, X. Wang, C. Ioratti, 2014:** Integrating temperature-dependent life table data into a matrix projection model for *Drosophila suzukii* population estimation. *PloS One* **9**, 9, e106909, DOI: 10.1371/journal.pone.0106909.
- Wiman, N.G., D.T. Dalton, G. Anfora, A. Biondi, J.C. Chiu, K.M. Daane, B. Gerdeman, A. Gottardello, K.A. Hamby, R. Isaacs, A. Grassi, C. Ioriatti, J.C. Lee, B. Miller, M.V. Rossi Stacconi, P.W. Shearer, L. Tanigoshi, X. Wang, V.M. Walton, 2016:** *Drosophila suzukii* population response to environment and management strategies. *Journal of Pest Science* **89**, 653-665, DOI: 10.1007/s10340-016-0757-4.
- Winkler, A, J. Jung, B. Kleinhenz, P. Racca, 2020:** A review on temperature and humidity effects on *Drosophila suzukii* population dynamics. *Agricultural and Forest Entomology* **22**, 179-192, DOI: 10.1007/s10340-016-0757-04.
- Wöhner, T., J. Pingerra, E. Fritzsche, A. Peil, M.-V. D. Pinczinger, M.-V. Hanke, 2021:** Insights into the susceptibility of raspberries to *Drosophila suzukii* oviposition. *Journal of Applied Entomology* **145** (3), 182-190, DOI: 10.1111/jen.12839.
- Wolf, S., S. Boycheva-Woltering, J. Romeis, J. Collatz, 2019:** *Trichopria drosophilae* parasitizes *Drosophila suzukii* in seven common non-crop fruits. *Journal of Pest Science*, DOI: 10.1007/s10340-019-01180-y.

74 | Übersichtsarbeit

Yang, Z.-Q., Y.-X. Yao, L.-F. Qiu, Z.-X. Li, 2009: A New Species of *Trissolcus* (Hymenoptera: Scelionidae) Parasitizing Eggs of *Halyomorpha halys* (Heteroptera: Pentatomidae) in China with Comments on Its Biology. *Annals of the Entomological Society of America* **102** (1), 39-47, DOI: 10.1603/008.102.0104.

Zapponi, L., F. Tortorici, G. Anfora, S. Bardella, M. Bariselli, L. Benvenuto, I. Bernardinelli, A. Butturini, S. Caruso, R. Collar, E. Costie, P. Culatti, E. Di Bella, M. Falagiarda, L. Giovannini et al., 2021: Assessing the Distribution of Exotic Egg Parasitoids of *Halyomorpha halys* in Europe with a Large-Scale Monitoring Program. *Insects* **12** (4), 316, DOI: 10.3390/insects12040316.

Aline Koch¹, Georg Petschenka²

Exogene Anwendung von RNA zur umweltfreundlichen Bekämpfung von Schadinsekten

Exogenous application of RNA for the eco-friendly control of insect pests

Affiliationen

¹Universität Hohenheim, Institut für Phytomedizin, FG Phytopathologie, Stuttgart.²Universität Hohenheim, Institut für Phytomedizin, FG Angewandte Entomologie, Stuttgart.

Kontaktanschrift

Dr. Aline Koch, Universität Hohenheim, Institut für Phytomedizin, FG Phytopathologie, Otto-Sander-Straße 5, 70599 Stuttgart,

E-Mail: aline.koch@uni-hohenheim.de

Zusammenfassung

In Anbetracht der hohen gesellschaftlichen Forderungen nach nachhaltigen und umweltschonenden Pflanzenschutzverfahren, stellt das Sprühen von RNA-basierten Wirkstoffen eine innovative und vielversprechende Alternative zu konventionellen chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln dar. Dabei vermitteln die sequenzspezifischen und somit maßgeschneiderten RNAs nicht nur eine hohe Selektivität, sondern lassen sich zudem sehr schnell adaptieren. Dadurch sind sie, verglichen mit der langwierigen, herkömmlichen Wirkstoffentwicklung, schneller verfügbar. Trotz der vielfältigen Vorteile und des dringenden Bedarfs an Alternativen, stehen wir erst am Anfang des Transfers von RNA Sprays ins Freiland. Hier diskutieren wir die damit verknüpften wissenschaftlich-technischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Zudem zeigen wir die offenen Forschungsfragen auf, die es zu adressieren gilt, um RNA-basierte Pflanzenschutzmittel zeitnah zu etablieren. Zuletzt führen wir aktuelle Beispiele zu innovativen Lösungsansätzen aus der Forschung an, die die Weiterentwicklung von RNA Sprays für die Kontrolle von Schadinsekten in der Pflanzenproduktion zum Ziel haben. Teile dieses Artikels wurden bereits in einem breiter angelegten englischsprachigen Übersichtsartikel (Rank & Koch 2021) dargestellt und werden hier in einen detaillierteren Kontext eingebettet. Durch die Übersetzung ins Deutsche sollen sie zudem einem erweiterten Leserkreis zugänglich gemacht werden.

Stichwörter

RNAi, RNA Spray, RNAi-basierter Pflanzenschutz, nachhaltiger Pflanzenschutz, RNA Biopestizide

Abstract

Under the perspective of high social demands for sustainable and environmentally friendly crop protection, RNA sprays

represent an innovative and promising alternative to conventional synthetic pesticides. Due to sequence specificity, custom-made RNAs not only provide high selectivity but can also be easily adapted to target different species. Consequently, they can be available more quickly compared to the time-consuming development of conventional synthetic pesticides. Despite the multiple benefits and the desperate need for alternatives, field application of RNA sprays is still in its infancy. Here, we discuss the challenges resulting from scientific-technical, social and economic demands. In addition, we identify open research questions that need to be addressed to establish RNAi-based products in a timely manner. Moreover, we highlight recent examples of innovative solutions, which could inspire further optimization of RNA sprays for the control of insect pests in the field. Parts of this article have already been presented in a broader review article (Rank & Koch 2021) and are embedded here into a more detailed context. The presentation in German should also make them accessible to a broader readership.

Keywords

RNAi, RNA Spray, RNAi-based plant protection, sustainable plant protection, RNA Biopesticides

Aktuelle Herausforderungen: Pflanzenschutz versus Insektenschutz?

Kulturpflanzen werden von einer Vielzahl tierischer Schädlinge attackiert. Die durch Arthropoden (Insekten und Milben) herbeigeführten jährlichen Ernteverluste werden auf 18-20 % (> 470 Milliarden USD) geschätzt (Sharma et al., 2017). Neben konventionellen Pflanzenschutzmaßnahmen, wie dem Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel, sind alternative Kontrollstrategien erforderlich, vor allem im Hinblick auf den Umweltschutz und die ständig ansteigenden Zahlen von Resistenzen vieler Schadinsekten gegenüber zugelasse-



(c) Der Autor/Die Autorin 2022

Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen: 17. Januar 2022/1. März 2022

nen Wirkstoffen (Alyokhin et al., 2008; Van Leeuwen et al., 2010; Kwon et al., 2016).

Die Einschränkung verfügbarer insektizider Wirkstoffe und Pflanzenschutzmittel (z. B. durch das Verbot der Neonicotinoide) verschärft das Problem, da Wirkstoffe nur noch bedingt rotiert werden können. Insbesondere vor dem Hintergrund des drastischen Biodiversitätsverlustes gewinnt die Forderung nach einer pestizidfreien Landwirtschaft zum Schutz von Nichtzielorganismen und der Umwelt an Bedeutung. Dabei wird der Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln als eine der wichtigsten Ursachen des Artensterbens gesehen (Wagner et al., 2021). Vor diesem Hintergrund gilt es neue, innovative Konzepte und Strategien für eine nachhaltigere Pflanzenproduktion zu entwickeln. Der Schutz der Biodiversität hat dabei höchste Priorität und ist von größter gesellschaftspolitischer Relevanz. Er ist Ziel landes¹-, bundes²-EU^{3,4}- und UN^{5,6}-weiter Bioökonomiestrategien und des Europäischen „Green Deal“⁷. Dafür soll der Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel in der Europäischen Union bis 2030 um 50 % reduziert werden. Um diese Ziele zu erreichen, bedarf es innovativer Lösungsansätze und Alternativen, wobei RNA Interferenz (RNAi)-basierte Methoden als besonders vielversprechend gelten (OECD, 2020).

RNAi bezeichnet Genregulationsmechanismen, bei denen kurze, nicht-kodierende RNA-Moleküle, die Expression komplementärer Zielgene unterdrücken (*gene silencing*). Dabei beruht das Prinzip RNAi-basierter Pflanzenschutztechnologien auf dem molekularen Mechanismus des post-transkriptionellen *gene silencing* (Abb. 1).

Erhalt der Biodiversität als Ziel: RNA-Wirkstoffe als Alternative zu chemischem Pflanzenschutz

Sequenzbasierte Wirkstoffe wie RNAs stellen insbesondere hinsichtlich ihrer Spezifität und der damit verbundenen Schonung von Nichtzielorganismen eine vielversprechende Alternative zu chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln dar. Zahlreiche Studien konnten die Effektivität RNAi-basierter Pflanzenschutztechnologien zur Kontrolle von Pathogenen und Schadinsekten in der Landwirtschaft und im Gartenbau bereits eindrucksvoll unter Beweis stellen (Überblick siehe: Koch & Kogel, 2014; Gaffar & Koch, 2019; Rank & Koch, 2021). Mithilfe dieser Technologie lassen sich Schadinsekten mit einer Wirksamkeit von durchschnittlich 50 % kontrollieren (max. Effektivität >80 %) (Koch & Wassenegger, 2021).

Diese Faktoren haben die Entwicklung RNAi-modifizierter Pflanzen bis zur Marktreife vorangetrieben (De Schutter

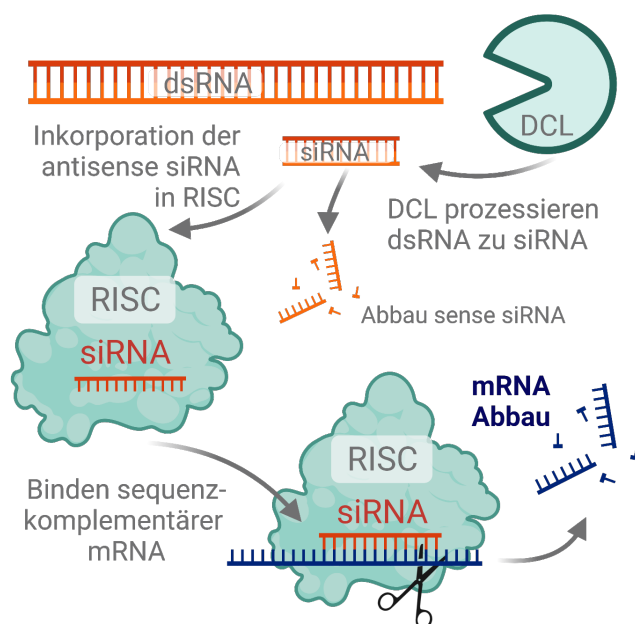


Abb. 1. Das RNAi-vermittelte post-transkriptionelle gene silencing (PTGS) beginnt mit der Zerlegung eines doppelsträngigen Vorläufer-dsRNA-Moleküls in kleine, 21-24 Nukleotide (nt) kurze small interfering (si)RNA Duplets durch ein RNaseIII-ähnliches Enzym genannt Dicer (DCL). Das PTGS findet im Zytoplasma der Zelle statt, wo die doppelsträngigen siRNAs in einen sogenannten RNA-induced silencing complex (RISC) inkorporiert werden. Dieser Multienzym-Komplex beinhaltet ein als Argonaute bezeichnetes Protein, welches sowohl über eine RNA-Binde-Domäne als auch über endonukleolytische Aktivität verfügt. In einer ATP-abhängigen Reaktion wird die siRNA durch RISC entwunden, woraus ein als sense und ein als antisense bezeichneter Strang hervorgehen. Während der sense-Strang, welcher sequenz-identisch mit der zelleigenen mRNA ist, degradiert wird, verbleibt der antisense-Strang an den RISC gebunden und kann nun via komplementärer Basenpaarung spezifisch an endogene Ziel-Transkripte binden und deren Degradierung einleiten. Created with Biorender.com.

et al., 2022). Das erste Produkt, der „SmartStax Pro“ Mais (Mon87411, Bayer) wurde 2017 von den US-Behörden und zuletzt 2021 auch von den chinesischen Behörden zugelassen. Dieser gentechnisch veränderte Mais exprimiert einerseits das CP4-EPSPS-Protein, welches eine erhöhte Toleranz gegenüber glyphosathaltigen Herbiziden bedingt und andererseits das aus *Bacillus thuringiensis* (Bt) stammende Cry3Bb1-Protein sowie eine doppelsträngige RNA (DvSnf7-dsRNA), welche Resistenz gegen Maiswurzelbohrer (*Diabrotica* spp.) verleihen. „SmartStax Pro“ wird Landwirten in den USA ab 2022 zur Verfügung stehen. In Europa hat der „SmartStax Pro“ Mais eine Marktzulassung für alle Verwendungszwecke (bspw. Einfuhr von Mon8741-haltigen Produkten) außer dem Anbau⁸.

Während der Anbau und der Verzehr von GV-Pflanzen in weiten Teilen der Welt (USA, Brasilien, Argentinien, Kanada und Indien) etabliert ist (91 % des globalen GVO-Anbaus), findet in Europa, mit Ausnahme von Spanien und Portugal, kein Anbau von gentechnisch veränderten Kulturpflanzen statt⁹.

¹ Landesstrategie: Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (baden-wuerttemberg.de)

² Nationale Bioökonomiestrategie | Bioökonomie.de (bioeconomie.de)

³ A sustainable bioeconomy for Europe – Publications Office of the EU (europa.eu)

⁴ Biodiversitätsstrategie für 2030 (europa.eu)

⁵ Sustainable Food and Agriculture | Food and Agriculture Organization of the United Nations (fao.org)

⁶ Report of the Open-ended Working Group on the Post-2020 Global Biodiversity Framework on its second meeting (cbd.int)

⁷ Europäischer Grüner Deal | EU-Kommission (europa.eu)

⁸ Genetically Modified Organisms (europa.eu)

⁹ Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2019 – ISAAA Brief 55-2019 | ISAAA.org

Neben gesellschaftlichen Vorbehalten kommt hinzu, dass die Generierung von GV-Pflanzen sehr kompliziert ist und deren Zulassung immense Kosten verursacht. Insbesondere deshalb ist die exogene, GVO-freie Applikation von dsRNA so erstrebenswert. Bei dem sogenannten „spray-induced gene silencing“ Verfahren (Koch et al., 2016; Wang et al., 2016) werden vor allem doppelsträngige RNAs (dsRNAs), die RNAi auslösen, auf Pflanzen gesprüht. Diese dsRNAs werden dann durch Schaderreger direkt gefressen oder es werden aus den Wirtspflanzen dort gebildete siRNAs aufgenommen (Abb. 2), wodurch das RNAi-vermittelte *gene silencing* im Zielorganismus dessen Tod oder Schwächung bewirkt.

Dabei wird das Prinzip der exogenen dsRNA- und siRNA-Applikation (z. B. durch Injektion oder Verfütterung) gegen verschiedene Organismen (darunter Schadinsekten und Milben) seit vielen Jahren routinemäßig beispielsweise zur Aufklärung von Genfunktionen oder zur Identifizierung geeigneter RNAi-Zielgene für den Pflanzenschutz (oftmals in Hochdurchsatzverfahren) angewandt (Lü et al., 2020; Máximo et al., 2020; Mehlhorn et al., 2020).

Beim Sprühen von dsRNA differenziert man im Hinblick auf die unterschiedlichen Ernährungsweisen von Schadinsekten (stechend-saugend vs. kauend-beißend) im Wesentlichen zwischen zwei Expositionsrouten. RNA-Wirkstoffe, welche vor allem dahingehend modifiziert wurden, dass sie eine hohe Oberflächenstabilität und -anhaftung zeigen, können dabei als besonders wirksam gegen blattfressende Schadinsekten (bspw. Kartoffelkäfer) gesehen werden. Im Gegensatz dazu müssen gegen stechend-saugende Schadinsekten (bspw. Blattläuse oder Zikaden) gerichtete dsRNAs/siRNAs so optimiert werden, dass eine bestmögliche Aufnahme ins Blattinnere (Apoplast/Interzellularraum) sowie eine zelluläre Aufnahme (Phloem und Xylem) und eine systemische Ausbreitung in der Pflanze gewährleistet ist. Diese RNA-Wirkstoffe müssen zunächst vor dem Abbau durch pflanzeigene Ribonukleasen geschützt werden, um eine möglichst langanhaltende Persistenz entlang der Transportwege innerhalb der Pflanze zu garantieren, bevor sie beispielsweise durch pflanzensaftsaugende Schadinsekten aufgenommen werden. Mit Aufnahme in den Zielorganismus, muss der RNA-Wirkstoff wenigstens so lange stabil sein und vor Abbau geschützt werden, bis er an seinen Wirkungsort, d. h. die Ziel-mRNA in den Insektenzellen gelangt ist. Derzeit versuchen Wissen-

schaftler*innen daher, sukzessive verschiedenste Parameter zu optimieren, um die RNA Spray Technologie kontinuierlich praxistauglicher zu machen, d. h. zugunsten höherer Effektivität und Selektivität weiterzuentwickeln. In diesem Zusammenhang ist das größte Potential sicher im Bereich der Formulierung und der Darreichungsform zu erwarten.

Aktuelle Beispiele und Überlegungen zum Einsatz von RNA Sprays gegen Schadinsekten

Eine kürzlich veröffentlichte Studie dokumentiert die Effektivität von RNA Sprays gegen *Henosepilachna vigintioctopunctata* („Hadda beetle“) (Wu et al., 2021), einer herbivoren Marienkäferart, die beispielsweise in Indien eine Rolle als Schädling vor allem an Nachtschatten- und Kürbisgewächsen spielt. Das Sprühen von in *E. coli* hergestellten dsRNAs, die gegen die für einen Ecdyson-Rezeptor (*EcR*-Gen) des Marienkäfers kodierende mRNA gerichtet waren, war auf Kartoffelpflanzen sehr effizient. Durch die Applikation nahm die Mortalität der Marienkäferlarven zu, wodurch eine deutliche Reduktion der Blattschäden erreicht wurde (Wu et al., 2021). Zwei weitere Studien bestätigten den erfolgreichen Einsatz der RNAi Technologie gegen *H. vigintioctopunctata* und unterstreichen das Potential RNAi-basierter Wirkstoffe als eine nachhaltige Alternative zum konventionellen chemischen Pflanzenschutz bei der Kontrolle von Schadinsekten (Lü et al., 2020, 2021).

Ein weiterer Schädling, der durch RNA Sprays effektiv bekämpft werden kann, ist der Kartoffelkäfer, *Leptinotarsa decemlineata* (Mehlhorn et al., 2020), eines der wirtschaftlich bedeutsamsten Schadinsekten an Kartoffeln (Hare, 1990). Im Fokus der 2020 veröffentlichten Studie stand der Vergleich der RNAi Sensitivität 14 verschiedener *L. decemlineata* Populationen aus Europa (Deutschland, Niederlande, Portugal, Spanien, Italien, Ungarn, Ukraine, Rumänien). Interessanterweise fanden die Autoren auf Populationsebene nur eine geringe Variabilität der durch RNAi verursachten Phänotypen. Lediglich eine spanisch-stämmige Population zeigte eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegenüber der RNA Applikation, wobei die Käfer dennoch molekular responsiv waren; das heißt die Expression des Zielgens *Actin* war mit ca. 80%iger Verminderung vergleichbar mit dem Transkriptlevel der übr-

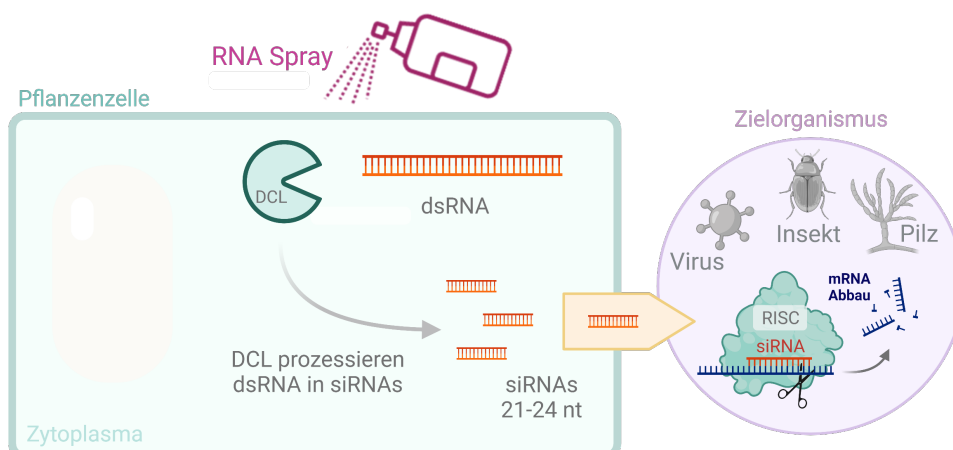


Abb. 2. Prinzip Spray-induced gene silencing. Created with BioRender.com

gen analysierten Kartoffelkäfer-Genotypen (Mehlhorn et al., 2020). Diese Studie liefert damit erste, wertvolle Erkenntnisse zur Variation von RNAi auf Populationsebene und verspricht eine universelle Anwendbarkeit von RNA-Biopestiziden auf alle Populationen eines Schaderregers. Gleichzeitig verspricht die Studie die Übertragbarkeit auf Schadinsekten vom Labor ins Freiland. In diesem Zusammenhang dokumentiert eine kürzlich veröffentlichte Studie die Wirksamkeit einer 490 bp dsRNA, welche die Proteasom Untereinheit Beta Typ 5 des Kartoffelkäfers targetiert (Rodrigues et al., 2021). Diese Studie ist nicht nur ein weiterer Beleg für die Effektivität von RNA Sprays, vielmehr handelt es sich um das erste marktreife RNA Biopestizid überhaupt. Die vom Unternehmen GreenLight Biosciences entwickelte dsRNA „Ledprona“ befindet sich aktuell in der Begutachtung durch die Environmental Protection Agency (EPA, USA), wobei GreenLight Biosciences das Testen des Ledprona Wirkstoffes (CAS No. 2433753-68-3) an Kartoffeln in Freilandversuchen in 11 Bundesstaaten der USA im Zeitraum von einem Jahr (Beginn 01. April 2022) beantragt hat¹⁰.

Exogen applizierte RNAs werden zunächst über die Blätter der Nahrungspflanzen aufgenommen, bevor sie sich dort über das Vaskulargewebe weiter verteilen (Koch et al., 2016; Biedenkopf et al., 2020). Dieser Umstand legt nahe, dass vor allem an Blättern fressende oder saugende Schadinsekten mit gesprühten RNAs effizient kontrolliert werden können (Abb. 3).

Um auch Schadinsekten beispielsweise an Knospen, Blüten oder Ähren bekämpfen zu können, ist daher die Frage entscheidend, inwiefern auch andere Pflanzenorgane gesprühte RNAs aufnehmen oder ob blattapplizierte RNAs in andere Teile der Pflanze transportiert werden oder sich dort ggf. sogar anreichern. Dies ist relevant, da eine Vielzahl wichtiger Schadinsekten auch Blüten oder Früchte befallen. In diesem Zusammenhang konnte eine 2021 veröffentlichte Studie zeigen, dass die Verfütterung von mit dsRNA-beschichteten Rapsknospen die Überlebensrate des Rapsglanzkäfers *Brassicoglyphus aeneus* erheblich beeinträchtigte (Willow et al., 2020).

Im Vergleich zur systemischen Applikation, ist die Aufnahme von mit RNA besprühten Pflanzengewebe wahrscheinlich unmittelbarer zu realisieren, da hier die technische Herausforderung auf die Gewährleistung der RNA Stabilität und die Adhärenz auf der Pflanzenoberfläche beschränkt ist. Dabei

müssen die RNAs vor Umwelteinflüssen, wie beispielsweise Abbau durch UV-Strahlung oder Abwaschen durch Regen geschützt werden. Die weit größere Herausforderung besteht darin, exogen applizierte RNAs zusätzlich nach Aufnahme in die Pflanze und in den Zielorganismus zu stabilisieren. Außerdem muss gewährleistet sein, dass sowohl ausreichend RNA in die pflanzlichen/tierischen Zellen aufgenommen wird als auch anschließend frei im Cytoplasma vorliegt (*endosomal escape*). Deshalb müssen die zugrundeliegenden molekularen Mechanismen genau verstanden werden, um Strategien zur Optimierung, beispielsweise Formulierungen, daraus abzuleiten.

Die Bekämpfung von stechend-saugenden Insekten durch RNA Sprays erfordert die Aufnahme in die pflanzlichen Zellen und die systemische Verteilung der RNA über das Phloem (Abb. 3). In diesem Zusammenhang konnte nach Sprühen einer fluoreszenzmarkierten dsRNA auf Gerstenblätter und anschließender Konfokalmikroskopie der Blattlängsschnitte die applizierte RNA in Parenchymzellen des Phloems, Geleitzellen und Mesophyllzellen sowie in Trichomen und Spaltöffnungen gefunden werden (Koch et al., 2016). Obwohl verschiedene Studien den systemischen Transport gesprühter RNAs nachweisen konnten (Koch et al., 2016; Konakalla et al., 2016; Kaldis et al., 2018; Biedenkopf et al., 2020), ist weiterhin unklar, inwiefern Verdünnungseffekte der transportierten RNAs deren Wirksamkeit beeinträchtigen. Deshalb ist es besonders relevant, dass die Transportrouten aufgeklärt werden, um zu klären, ob beispielsweise die Konzentration von Phloem-lokalisierter RNAs ausreicht, um nach Aufnahme durch phloemsaugende Schadinsekten wie Blattläuse eine *gene silencing* zu induzieren. In diesem Zusammenhang konnte bereits gezeigt werden, dass das Sprühen von dsRNA gegen das SHP-Gen der Getreideblattlaus *Sitobion avenae*, eine RNAi-bedingte 50%ige Reduktion der mRNA Transkriptmenge des Zielgens zur Folge hatte (Biedenkopf et al., 2020). Allerdings wurden diese Experimente an abgeschnittenen Gerstenblättern durchgeführt, wobei die Blattläuse nur wenige Zentimeter von der RNA Applikationsstelle entfernt saugten. Demzufolge war die lokale Konzentration der RNA vermutlich entsprechend hoch und nicht repräsentativ für RNA Konzentrationen weiter weg von der Applikationsstelle (entfernte Blätter, Stängel und Wurzeln). Umso entscheidender sind Beobachtungen aus der gleichen Studie, dass sich die gesprühte RNA innerhalb von drei Tagen nach Applikation

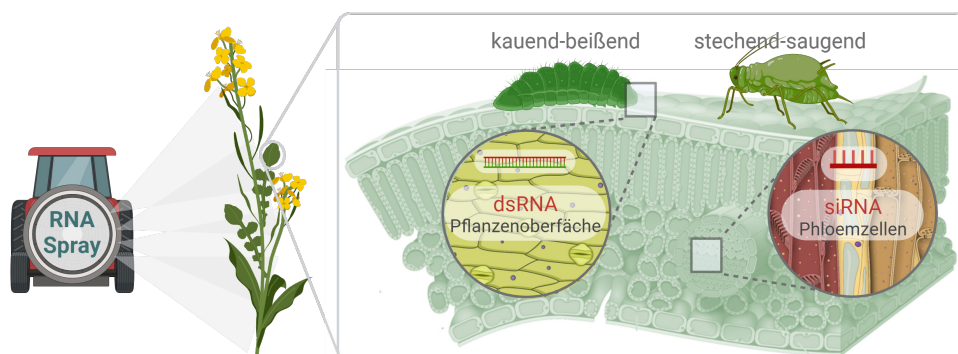


Abb. 3. Vergleich RNA Aufnahme zwischen verschiedenen Typen der Nahrungsaufnahme. Created with BioRender.com

¹⁰ Federal Register, Volume 86 Issue 116 (Monday, June 21, 2021) (govinfo.gov)

auf Gerstenblätter über die Stängel bis zum Wurzelgewebe verteilte (Biedenkopf et al., 2020). Dies ist besonders relevant für die Bekämpfung von wurzelfressenden bodenbürtigen Schaderregern, da die direkte Bodenapplikation von RNA bislang immer deren unmittelbaren Abbau zur Folge hatte (Dubelman et al., 2014; Parker et al., 2019; Bachman et al., 2020; Qiao et al., 2021). Dennoch ist auch hier fraglich, inwiefern der systemische Transport und die damit einhergehende Verdünnung eine mehrmalige RNA Applikation notwendig machen könnte. Angesichts dieser Unklarheiten plädieren einige Wissenschaftler*innen dafür, Symbiosen von Pflanzen und Bakterien zu nutzen und postulieren, dass biotechnologisch modifizierte Symbionten als Vektoren zur dauerhaften dsRNA Produktion in Pflanzen eingesetzt werden könnten (Whitten et al., 2016; Whitten & Dyson, 2017).

Es ist wichtig zu betonen, dass auch die Bekämpfung von stechend-saugenden Schadinsekten durch RNA Sprays nicht zwangsläufig die Aufnahme der RNA in die Nahrungspflanzen erfordert (Thairu et al., 2017; Niu et al., 2019; Linyu et al., 2021). Aufgrund von Schwierigkeiten bei der oralen Verabreichung von dsRNA an Blattläuse haben Wissenschaftler*innen eine Methode zur RNAi-Induktion in der Erbsenblattlaus *Acyrtosiphon pisum* entwickelt, die auf dem Besprühen der Blattläuse selbst beruht (Niu et al., 2019). Ähnliches wurde in einer kürzlich publizierten Studie gezeigt (Linyu et al., 2021). Die Autoren verwendeten eine Nanopartikel-basierte Technologie, sogenannte Nanocarrier SPC (Star Polycation) für eine verbesserte transdermale Passage und effizientere Aufnahme in die Zielzellen der Blattlaus *Aphis gossypii* (Linyu et al., 2021). Beide Studien implizieren eindrucksvoll die Sensitivität und Effektivität von RNA-Blattlaussprays, wodurch eine Aufnahme in die Pflanze (und damit die Ungewissheit über Persistenz, Perfusionsgrad und Verdünnung) obsolet wird. Möglicherweise stellen derartige Verfahren einen vielversprechenden Ansatz für die direkte Behandlung eines Blattlausbefalls dar, wenngleich weniger zweckmäßig als Präventivmaßnahme. Trotz des Potenzials muss zunächst untersucht werden, inwieweit Blattlaussprays unter Realbedingungen wirksam sind und inwiefern sich dieser Ansatz (transdermale Formulierungen) auf andere Schadinsekten übertragen lässt oder sich von anderen Kontaktinsektiziden abgrenzt. Darüber hinaus könnte die Entwicklung von Formulierungen, welche die Steuerung der transdermalen Passage vielleicht sogar in einem schädlingsspezifischen Kontext ermöglichen, im Kontext der Selektivität zur Vermeidung von Off-Target-Effekten sehr interessant sein.

Vom Labor ins Freiland: Neue Herausforderungen erfordern innovative Lösungsansätze

Der Mangel an zuverlässigen Daten aus Freilandversuchen oder unter simulierten Freilandbedingungen erschwert Vorhersagen zur Effektivität von RNA Sprays im Freiland. Aus diesem Grund werden verschiedene Szenarien angenommen und neue Herausforderungen der Applikation von RNA unter Realbedingungen antizipiert. Dabei sind verschiedene Aspekte miteinander verknüpft. Zum Beispiel werden die Konzentrationen der zu sprühenden RNA Wirkstoffe je nach Pflan-

zenspezies variieren, weil bestimmte Pflanzeigenschaften die RNA Aufnahme und Stabilität (z. B. Cuticula, Stomatadichte) sowohl begünstigen als auch erschweren werden. Davon wird nicht nur die Auftragsmenge, sondern vielmehr auch die Applikationshäufigkeit abhängen, was sich unmittelbar auf die Kostenkalkulation auswirken wird. Außerdem werden die jeweiligen Standort- und Umweltbedingungen die Wirksamkeit unmittelbar beeinflussen. Des Weiteren unterscheiden sich im Freiland gewachsene Pflanzen deutlich von Pflanzen, die unter kontrollierten Bedingungen angezogen wurden. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass Unterschiede in Morphologie, Physiologie bis hin zur (Epi)Genetik die Sensitivität gegenüber RNA Sprays beeinflussen. All dies sind Zusammenhänge, die wir gerade erst beginnen, zu verstehen.

Weitere Herausforderungen liegen in der Ökonomie und Wirtschaftlichkeit dieser neuen Technologie im Vergleich zu herkömmlichen Pflanzenschutzmitteln. Bis vor wenigen Jahren kostete bereits die Produktion von wenigen Gramm dsRNA über 100.000 US-Dollar. Seitdem sind die Synthesekosten drastisch gesunken. Aktuelle Schätzungen zufolge wird es schon bald möglich sein, dsRNA für unter zwei US-Dollar pro Gramm zu produzieren¹¹. Damit ist aber noch nicht garantiert, dass RNA Sprays mit den Preisen gängiger Pflanzenschutzmittel konkurrieren können. Der Preis für gängige Fungizide bei einmaliger Anwendung liegt bei ca. 17 bis 55 US-Dollar/ha. Für eine effektive Behandlung sind in Laborversuchen (Gerste-Fusarium) eine Menge von 10 µg dsRNA für eine Fläche von 50 cm² nötig. Würde man diese Aufwandsmenge auf einen Hektar Fläche hochrechnen, wären ca. 20 g dsRNA erforderlich. Bei Produktionskosten von 2 US-Dollar/g würde der Preis für eine einmalige Spritzanwendung mit reiner (nicht-formulierter) dsRNA somit bei ca. 40 US-Dollar/ha, und damit vergleichbar zu gängigen Fungiziden, liegen. Wäre eine längere Schutzwirkung (bis zu 3 Wochen) durch spezifische Formulierungen (bspw. BioClay (Mitter et al., 2017) gegeben, könnte sich der Einsatz von RNA Sprays sogar als rentabler herausstellen, da gängige Fungizide gegen viele Schaderreger keinen Langzeitschutz bieten. Bestenfalls gelingt es, die Herstellungskosten der RNA Wirkstoffe weiter zu reduzieren, sodass Auftragsmenge und -häufigkeit (abhängig von Kultur und Erreger) sowie Rentabilität im Vergleich zu chemisch-synthetischen Pestiziden sogar günstiger werden.

Allein die Senkung der Produktionskosten wird jedoch nicht ausreichen, da auch die Menge an ausgebrachter RNA minimiert werden soll, um mögliche Risiken für Umwelt, Anwender oder Verbraucher zu vermeiden. Deshalb ist es entscheidend, dass wir die Mechanismen und Faktoren, die die Aufnahme, den Transport, die Stabilität und den Abbau von gesprühten RNAs bestimmen, möglichst detailliert aufschlüsseln. Damit können wir nicht nur die Effektivität erhöhen, sondern vielmehr präzise die erforderliche Mindestkonzentration ermitteln. Hierbei wird vor allem die Entwicklung innovativer Formulierungen der Wirkstoffe in Abhängigkeit von der Kulturpflanze und dem zu bekämpfenden Schaderreger einen entscheidenden Beitrag leisten.

Mit Hilfe neuester Formulierungen werden RNAs verkapselt, wodurch eine gerichtete Aufnahme in die Zielzellen (der

¹¹ <http://www.globalengage.co.uk/pgc/docs/PosterMaxwell.pdf>

Pflanze und/oder des Schaderregers) und die Freisetzung im Zellinneren ermöglicht wird. Dabei sind Formulierungen zur Verkapselung oder zum Verpacken von RNA besonders elegant, weil sie auf vielfältige Weise für verschiedene Problemstellungen ggf. eine unmittelbare Lösung bieten. Zunächst werden die RNAs vor schädigenden Umweltfaktoren (z. B. UV-Strahlung) abgeschirmt, wodurch sich ihre Langlebigkeit im Vergleich zu „nackten“ RNAs wesentlich erhöht (Rank & Koch 2021). In diesem Kontext können auch Organismen auf eine duale Weise genutzt werden. Transformierte Zellen von *E. coli* werden beispielsweise nicht nur für die kostengünstige Produktion von dsRNA verwendet, sondern stellen gleichsam auch eine Schutzhülle für die produzierte RNA dar (Lü et al., 2020; Máximo et al., 2020; Wang et al., 2021; Wu et al., 2021). Bei ausreichender Kapselgröße, kann zudem auch die Aufnahme von dsRNA in die Pflanze verhindert werden. Damit kann die Prozessierung der dsRNA durch pflanzliche Dicer (Endonuklease) umgangen werden, was in einigen berichteten Fällen eine Steigerung der Effektivität zur Folge hatte. Zum Beispiel resultierte die Expression von dsRNA in Chloroplasten (Dicer-freie Organellen) gegen das β -Actin Gen von *L. decemlineata* in einer gesteigerten Mortalität der Larven (Zhang et al., 2015). Auch bei der Kontrolle des Getreidepilzes *Fusarium graminearum* hat sich gezeigt, dass die Aufnahme von dsRNA und deren Prozessierung durch die pilzlichen Dicer selbst (und nicht durch die pflanzlichen) eine wichtige Voraussetzung für das Silencing der Zielgene im Pilz darstellt (Koch et al., 2016; Gaffar et al., 2019). Darüber hinaus kann das Verkapseln auch nach zellulärer Aufnahme vor dem enzymatischen Abbau durch Ribonukleasen oder anderen destabilisierenden Bedingungen (z. B. extremer pH-Wert) in der Pflanze und/oder dem Schadinsekt schützen. Von verschiedenen Insekten weiß man bereits, dass sie über die Fähigkeit verfügen, dsRNA abzubauen (Singh et al., 2017), wofür Nukleasen verantwortlich sind (Peng et al., 2018). Zusätzlich ist der Abbau von dsRNA im Darm der Insekten besonders hoch (Peng et al., 2018). Durch Chitosan-basierte Nanopartikel konnte jedoch dsRNA vor Abbau durch Nukleasen und den Einflüssen des Darm-pH in Raupen des Eulenfalters *Helicoverpa armigera* geschützt werden (Kolge et al., 2021). Darüber hinaus können weitere dsRNAs mitverpackt werden, um beispielsweise Negativregulatoren des RNAi Mechanismus sowie Enzyme des Fremdstoffwechsels (bspw. P450 s, oder ABC Transporter) herunterzuregulieren (Sharma et al., 2021; Wang et al., 2021). Damit könnte man ebenso wie durch Beigabe von Nukleaseinhibitoren die Wirksamkeit gesprühter RNAs erhöhen.

Weiterhin kann über die Kapsel die Blattanhaftung verbessert und damit das Abwaschen durch Bewässerungsmaßnahmen oder Regen vermindert werden. So können bisher bereits geringe Niederschlagsmengen ein fast vollständiges Abwaschen von Pflanzenschutzverbindungen herbeiführen (Hunsche et al., 2011) und somit ihre Wirksamkeit drastisch mindern. In diesem Zusammenhang konnte durch vorausgegangene Studien das große Potential von sogenannten Mikrogelen zur regenfesten Anbindung von Zielsubstanzen an Pflanzenoberflächen bereits verdeutlicht werden (Meurer et al., 2017). In einem aktuell durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft-geförderten Drittmittelprojekt (Akronym:

ho[rtkulturNA]¹²) sollen, um eine möglichst lang andauernde Schutzwirkung von applizierten RNA Biopestiziden unter Freilandbedingungen zu erzielen, die dsRNAs in Mikrogel-Container verpackt werden, um diese vor äußeren Einflüssen wie Regen oder UV-Strahlung, aber auch RNA-abbauenden Enzymen (Ribonukleasen) zu schützen¹³.

Neben der Erhöhung der Stabilität gegenüber Umweltfaktoren oder der vorzeitigen Prozessierung durch Dicer, kann durch das Verkapseln auch die Selektivität unter Freilandbedingungen verbessert werden. Insbesondere die Formulierung auf Nanomaterialbasis kann helfen, die Selektivität zu erhöhen, nicht nur durch Abschirmung der dsRNA von der Umwelt, sondern auch durch Bereitstellung einer zielortspezifischen RNA-Freisetzung oder Selektivität, die durch Lockstoffe erleichtert wird, die in die Kapselhülle eingearbeitet werden, so dass die Kapseln nach dem *attract-and-kill* Prinzip funktionieren.

Biopestizide auf RNA-Basis? Perspektiven und Prognosen

Trotz der Entwicklung von „Ledprona“ und der zahlreichen Proof-of-Concept-Studien, die das Potenzial von RNA Wirkstoffen im Pflanzenschutz verdeutlichen, ist die Anwendung im Freiland noch immer wenig erprobt. Damit zusammenhängend stehen wir vor komplexen und vielschichtigen wissenschaftlich-technischen (Stabilität, Selektivität und breite Anwendbarkeit) sowie gesellschaftspolitischen (Akzeptanz, Zulassung und Regulierung) Herausforderungen. Um diesen Anforderungen zu entsprechen, wurden erhebliche Fortschritte in der Weiterentwicklung von RNA Sprays erzielt, beispielsweise durch Nanotechnologie-basierte Formulierungen, deren Entwicklung nun aufgrund der Nachfrage und dem Bedarf an mRNA Impfstoffen rasant voranschreitet. Davon kann auch der RNA Spray-basierte Pflanzenschutz profitieren, zumal viele der bereits verwendeten Formulierungen durch die medizinische Anwendung inspiriert wurden. Allerdings muss das Verhalten von nanoformulierten RNAs unter Realbedingungen noch untersucht und beurteilt werden. Außerdem benötigen wir dringend mehr Forschung zur Persistenz und Bioabbaubarkeit von gesprühten RNAs, um eine adäquate Risikobewertung durchführen zu können. Zur optimalen Wirksamkeit sollen einerseits die RNAs möglichst stabil und langlebig und andererseits schnell und rückstandlos abbaubar sein, um die Umwelt nicht zu belasten. Hierfür bedarf es innovativer Lösungsansätze, welche u. a. in der Fusion oder dem Transfer verschiedener Technologien liegen.

Der Bedarf an neuen Verfahren zur Reduktion chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel und zum Schutz der Biodiversität ist enorm und angesichts der immer lauter werdenden gesellschaftspolitischen Forderungen sollten Alternativen möglichst schnell verfügbar sein. Im Zuge dessen drängen sich etliche Fragen aus unterschiedlichen Perspektiven auf – hinsichtlich der Handhabung durch potenzielle Anwender*innen u. a.:

¹² Themenservice: Detailansicht: Universität Hohenheim (uni-hohenheim.de)

¹³ BLE – Projektsuche

- Wann, wie oft und in welchen Mengen müssen die RNAs ausgebracht werden?
- Gibt es besondere Anforderungen für die Handhabung und Lagerung von RNA Wirkstoffen?
- Was werden RNA Biopestizide kosten?
- Für welche Kulturen und Schaderreger werden Wirkstoffe verfügbar sein?

Weitere Fragen entstehen seitens der Umwelt- und Verbraucherschützer*innen:

- Ist der Verzehr von RNA-behandelten Erzeugnissen unbedenklich?
- Werden die Lebensmittel teurer sein?
- Welche Auswirkungen hat das Sprühen von RNA für lokale Ökosysteme?
- Werden sich die RNAs im Boden oder im Wasser anreichern?

Aus unternehmerischer Sicht:

- Was wird die Zulassung von RNA Wirkstoffen kosten?
- Wie werden diese reguliert?
- Ist mit Resistenzentwicklung zu rechnen?
- Werden RNA Wirkstoffe öffentlich akzeptiert?

Einige der Fragen oder Bedenken können wir schon heute adressieren. Zum Beispiel ob und welche Risiken vom Verzehr von mit RNA behandelten Lebensmitteln oder daraus gewonnenen Erzeugnissen ausgehen. Grundsätzlich besitzen die aufgenommenen RNAs genregulatorisches Potenzial, denn sie binden komplementäre mRNAs und interferieren mit deren Translation in ein funktionelles Protein. Die Frage ist also, ob die RNAs im Menschen oder anderen Nichtzielorganismen unspezifische, nicht-intendierte sogenannte off-target Effekte hervorrufen können. In diesem Zusammenhang sammelte und beurteilte ein kürzlich publizierter Übersichtsartikel die Beweise für und gegen die Übertragung von mit der Nahrung aufgenommenen miRNAs aus Pflanzen, Fleisch und Milch und deren genregulatorische Funktion (Mar-Aguilar et al., 2020; del Pozo-Acebo et al., 2021). Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die Übertragung von miRNAs aus der Nahrung ins Blut nicht schlüssig und belastbar dargelegt wurde und, dass die Hauptursache für die kontroverse Beurteilung durch nicht reproduzierbare Daten zustande kommt. Derzeit stuft die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) das Sprühen von RNA als sicher ein (Dávalos et al., 2019). Die Risiken einer dysfunktionalen Genexpression ausgelöst durch den Verzehr von RNAi-Produkten beim Menschen sei gering. Das entscheidende Argument war, dass nach der oralen Aufnahme von RNA zu viele biologische und physikalische Barrieren überwunden werden müssten, weshalb es wahrscheinlicher ist, dass sie, bevor sie eine potenzielle off-Target mRNA binden, abgebaut werden (Schiemann et al., 2019; Kleter, 2020). Allerdings mangelt es bislang an wissenschaftlich fundierten und belastbaren Daten zur Umwelt-, Verbraucher- und Anwendersicherheit von RNA Sprays, insbesondere deren neuartigen Formulierungen. Erste, vorläufige Daten zum Verbleib in der Umwelt (Persistenz und Abbaubarkeit) von gesprühten dsRNAs deuten auf einen schnellen Abbau, also geringe Persistenz nach Bodenaufnahme hin (Parker et al., 2019; Bachman et al., 2020).

Außerdem wurden erste, wichtige Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit von Resistenzbildungen erzielt. Eine erste Studie wurde 2018 von Monsanto (Khajuria et al., 2018) veröffentlicht, mit dem Ziel mögliche Resistenzmechanismen gegen dsRNAs in Insekten zu charakterisieren. Dabei wurde eine Population des Maiswurzelbohrers *Diabrotica virgifera virgifera* gezielt auf eine dsRNA(DvSnf7)-Resistenz selektiert. Die Resistenz manifestierte sich darin, dass die Tiere die Mais-exprimierte DvSnf7 dsRNA nicht über den Darm aufnehmen konnten. Diese Aufnahmeunfähigkeit war sequenzunabhängig und zeigte sich auch nach Injektion der dsRNA in die Hämolymphe. Die Erkenntnisse dieser Studie bildeten die Grundlage zur Entwicklung des gentechnisch-modifizierten Mais SmartStaxPro, wobei der Resistenzentwicklung durch die „smarte“ Kombination verschiedener Wirkstoffe mit unterschiedlichem mode-of-action entgegen gewirkt werden soll (s. o.). Darüber hinaus kam eine Folgestudie zu dem Schluss, dass das Auftreten von Resistenzen durch exogene RNA Applikation im Vergleich zu HIGS-basierter Exposition sehr viel wahrscheinlicher sei (Mishra et al., 2021), wodurch RNA Biopestizide wie „Ledprona“ verglichen mit SmartStaxPro vermeintlich schlechter abschneiden. Inwiefern die künstlich selektierten Resistenzen die natürlichen Entwicklungen abbilden, bleibt jedoch unklar. Darüber hinaus bleibt offen, inwiefern diese Szenarien für andere Schadinsekten, die weniger schnell Wirkstoffresistenzen ausbilden als der Maiswurzelbohrer (Meinke et al., 2021) und der Kartoffelkäfer (Alyokhin et al., 2008) zutreffen würden.

Trotz erster wichtiger Erkenntnisse sind noch viele Fragen offen und müssen zunächst durch weitere Studien und in Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Behörden, Interessenverbänden und der Politik erarbeitet werden. Dabei müssen die Vorteile dieser Technologie in Abgrenzung zu bereits bestehenden Verfahren deutlicher herausgestellt werden. Ein entscheidendes Argument für die Anwendung von RNA Sprays liegt insbesondere in der hohen Selektivität und der Möglichkeit mit Sequenz-basierten Wirkstoffen sehr schnell und präzise auf neue oder plötzlich auftretende Krankheitserreger sowie damit verbundene Epidemien reagieren zu können (z. B. Schilfglasflügelzikade). Wie wichtig dies ist, wurde uns durch das Auftreten der Virusvariante SARS-CoV-2 2020 bewusst, wobei sich die Schwere und Konsequenz von Epidemien unmittelbar auf Bereiche der Nahrungsmittelproduktion übertragen lässt. Die Vorteile von Biopestiziden auf RNA Basis werden allerdings nur dann Bestand haben, wenn diese ein modifiziertes und kürzeres Zulassungsverfahren durchlaufen. Wenngleich diese Möglichkeit seitens der EU besteht/ingeräumt wird (EC, 2009), existiert aktuell kein spezifisches Leitliniendokument zur Beurteilung von RNA-basierten Wirkstoffen (Schenkel & Gathmann, 2021). Möglicherweise wird „Ledprona“ hier den Weg für die zukünftige Zulassung weiterer RNA Biopestizide ebnen (Rodrigues et al., 2021), wobei die Risikobeurteilung vermutlich zunächst auf Einzelfallbasis stattfinden wird. Gründe hierfür sind spezifische Entwicklungen, wie bspw. der Einsatz spezifisch-entwickelter Formulierungen die RNA Stabilität und die zelluläre Aufnahme topisch applizierter RNAs verbessern sollen sowie die Kombination verschiedener RNA Wirkstoffe, wodurch neue Frage hinsichtlich des Umweltverhaltens (z. B. Abbaubarkeit, Anreicherung) entstehen, die es von Fall zu Fall zu beantworten gilt.

Aus den genannten Gründen sehen sich Wissenschaftler*innen weltweit in der Verantwortung, bestehende Konzepte vor den aktuellen Herausforderungen (nachhaltiges, biobasiertes Wirtschaften, Schonung natürlicher Ressourcen und der Umwelt, Stärkung der Biodiversität) neu zu beurteilen. Vor allem wird es darauf ankommen, dass wir unser Wissen zu den zugrundeliegenden molekularen Mechanismen weiter vertiefen und neue Erkenntnisse kontinuierlich und unmittelbar in die Weiterentwicklung integrieren.

Danksagung

Dieser Artikel steht im Kontext zweier durch den Bund und eines durch das Land Baden-Württemberg geförderten Drittmittelprojekte. Wir bedanken uns explizit bei den Fördermittelgebern des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Förderkennzeichen: 2819NA060), des Ministeriums für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) (Förderkennzeichen: BWFE120181) und dem QS-Wissenschaftsfonds Obst, Gemüse und Kartoffeln (Akronym: RNAbait).

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren/die Autorinnen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- Alyokhin, A., M. Baker, D. Mota-Sanchez, G. Dively, E. Grafius, 2008:** Colorado Potato Beetle Resistance to Insecticides. *American Journal of Potato Research* **85**, 395–413. DOI: 10.1007/s12230-008-9052-0.
- Bachman, P., J. Fischer, Z. Song, E. Urbanczyk-Wochniak, G. Watson, 2020:** Environmental Fate and Dissipation of Applied dsRNA in Soil, Aquatic Systems, and Plants. *Frontiers in Plant Science* **11**, 21, DOI: 10.3389/fpls.2020.00021.
- Biedenkopf, D., T. Will, T. Knauer, L. Jelonek, A.C.U. Furch, T. Busche, A. Koch, 2020:** Systemic spreading of exogenous applied RNA biopesticides in the crop plant *Hordeum vulgare*. *ExRNA* **2**, 12, DOI: 10.1186/s41544-020-00052-3.
- Dávalos, A., R. Henriques, M.J. Latasa, M. Laparra, M. Coca, 2019:** Literature review of baseline information on non-coding RNA (ncRNA) to support the risk assessment of ncRNA-based genetically modified plants for food and feed. *EFSA Supporting Publications* **16**, 1688E, DOI: 10.2903/sp.efsa.2019.EN-1688.
- De Schutter, K., C.N.T. Taning, L. Van Daele, E.J.M. Van Damme, P. Dubruel, G. Smagghe, 2022:** RNAi-Based Biocontrol Products: Market Status, Regulatory Aspects, and Risk Assessment. *Frontiers in Insect Science* **1**, 22. DOI: 10.3389/finsc.2021.818037.
- del Pozo-Acebo, L., M.-C. López de las Hazas, A. Margollés, A. Dávalos, A. García-Ruiz, 2021:** Eating microRNAs: pharmacological opportunities for cross-kingdom regulation and implications in host gene and gut microbiota modulation. *British Journal of Pharmacology* **178**, 2218–2245, DOI: 10.1111/bph.15421.
- Dubelman, S., J. Fischer, F. Zapata, K. Huizinga, C. Jiang, J. Uffman, S. Levine, D. Carson, 2014:** Environmental Fate of Double-Stranded RNA in Agricultural Soils. *PLoS One* **9**, e93155, DOI: 10.1371/journal.pone.0093155.
- EC, 2009:** Regulation (EC) no. 1107/2009 of the European parliament and of the Council of 21 October 2009 concerning the placing of plant protection products on the market and repealing Council Directives 79/117/EEC and 91/414/EEC. *Official Journal of the European Union* **309**, 1–50.
- Gaffar, F.Y., J. Imani, P. Karlovsky, A. Koch, K.-H. Kogel, 2019:** Different Components of the RNA Interference Machinery Are Required for Conidiation, Ascosporeogenesis, Virulence, Deoxynivalenol Production, and Fungal Inhibition by Exogenous Double-Stranded RNA in the Head Blight Pathogen *Fusarium graminearum*. *Frontiers in Microbiology* **10**, 1–13, DOI: 10.3389/fmicb.2019.01662.
- Gaffar, F. Y., A. Koch, 2019:** Catch me if you can! RNA silencing-based improvement of antiviral plant immunity. *Viruses* **11**, DOI: 10.3390/v11070673.
- Hare, J.D., 1990:** Ecology and Management of the Colorado Potato Beetle. *Annual Reviews of Entomology* **35**, 81–100, DOI: 10.1146/annurev.en.35.010190.000501.
- Hunsche, M., A. Alexeenko, L. Damerow, G. Noga, 2011:** Rain-induced removal of copper from apple leaves: Influence of rain properties and tank-mix adjuvants on deposit characteristics at the micro scale. *Crop Protection* **30**, 495–501, DOI: 10.1016/j.cropro.2010.11.028.
- Kaldis, A., M. Berbati, O. Melita, C. Reppa, M. Holeva, P. Otten, A. Voloudakis, 2018:** Exogenously applied dsRNA molecules deriving from the Zucchini yellow mosaic virus (ZYMV) genome move systemically and protect cucurbits against ZYMV. *Molecular Plant Pathology* **19**, 883–895, DOI: 10.1111/mpp.12572.
- Khajuria, C., S. Ivashuta, E. Wiggins, L. Flagel, W. Moar, M. Pleau, K. Miller, Y. Zhang, P. Ramaseshadri, C. Jiang, T. Hodge, P. Jensen, M. Chen, A. Gowda, B. McNulty, C. Vazquez, R. Bolognesi, J. Haas, G. Head, T. Clark 2018:** Development and characterization of the first dsRNA-resistant insect population from western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte. *PLoS One* **13**, e0197059, DOI: 10.1371/journal.pone.0197059.
- Kleter, G.A., 2020:** Food safety assessment of crops engineered with RNA interference and other methods to modulate expression of endogenous and plant pest genes. *Pest Management Science* **76**, 3333–3339, DOI: 10.1002/ps.5957.
- Koch, A., D. Biedenkopf, A. Furch, L. Weber, O. Rossbach, E. Abdellatef, L. Linicus, J. Johannsmeier, L. Jelonek, A. Goemann, V. Cardoza, J. McMillan, T. Mentzel, K.-H. Kogel, 2016:** An RNAi-Based Control of *Fusarium graminearum* Infections Through Spraying of Long dsRNAs Involves a Plant Passage and Is Controlled by the Fungal Silencing Machinery. *PLoS Pathogens* **12**, 1–22, DOI: 10.1371/journal.ppat.1005901.

- Koch, A., K.H. Kogel, 2014:** New wind in the sails: Improving the agronomic value of crop plants through RNAi-mediated gene silencing. *Plant Biotechnology Journal* **12**, 821–831, DOI: 10.1111/pbi.12226.
- Koch, A., M. Wassenegger, 2021:** Host-induced gene silencing – mechanisms and applications. *New Phytologist* **231**, 54–59, DOI: 10.1111/nph.17364.
- Kolge, H., K. Kadam, S. Galande, V. Lanjekar, V. Ghormade, 2021:** New Frontiers in Pest Control: Chitosan Nanoparticles-Shielded dsRNA as an Effective Topical RNAi Spray for Gram Podborer Biocontrol. *ACS Applied Bio Materials* **4**, 6, 5145–5157, DOI:10.1021/acsabm.1c00349.
- Konakalla, N.C., A. Kaldis, M. Berbati, H. Masarapu, A.E. Voloudakis, 2016:** Exogenous application of double-stranded RNA molecules from TMV p126 and CP genes confers resistance against TMV in tobacco. *Planta* **244**, 961–969, DOI: 10.1007/s00425-016-2567-6.
- Kwon, D. H., J.H. Park, P.A. Ashok, U. Lee, S.H. Lee, 2016:** Screening of target genes for RNAi in *Tetranychus urticae* and RNAi toxicity enhancement by chimeric genes. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **130**, 1–7, DOI: 10.1016/j.pestbp.2015.11.005.
- Linyu, W., Z. Lianjun, L. Ning, G. Xiwu, L. Xiaoning, 2021:** Effect of RNAi targeting CYP6CY3 on the growth, development and insecticide susceptibility of *Aphis gossypii* by using nano-carrier-based transdermal dsRNA delivery system. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **177**, 104878, DOI: 10.1016/j.pestbp.2021.104878.
- Lü, J., Z. Liu, W. Guo, M. Guo, S. Chen, H. Li, C. Yang, Y. Zhang, H. Pan, 2020:** Feeding delivery of dsHvSnf7 is a promising method for management of the pest *Henosepilachna vigintioctopunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Insects* **11**, DOI: 10.3390/insects11010034.
- Lü, J., C. Yang, Z. Liu, A.M. Vélez, M. Guo, S. Chen, B. Qiu, Y. Zhang, X. Zhou, H. Pan, 2021:** Dietary RNAi toxicity assay suggests α and γ subunits of HvCOPI as novel molecular targets for *Henosepilachna vigintioctopunctata*, an emerging coccinellid pest. *Journal of Pest Science* **94**, 1473–1486, DOI: 10.1007/s10340-021-01350-x.
- Mar-aguilar, F., A. Arreola-triana, D. Mata-cardona, V. Gonzalez-villasana, C. Rodríguez-padilla, 2020:** Evidence of transfer of miRNAs from the diet to the blood still inconclusive. *PeerJ* **8**, e9567, DOI: 10.7717/peerj.9567.
- Máximo, W.P.F., J.L. Howell, K. Mogilicherla, M. Basij, S.C.R.R. Chereddy, S.R. Palli, 2020:** Inhibitor of apoptosis is an effective target gene for RNAi-mediated control of Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology* **104**, 1–11, DOI: 10.1002/arch.21685.
- Mehlhorn, S.G., S. Geibel, G. Bucher, R. Nauen, 2020:** Profiling of RNAi sensitivity after foliar dsRNA exposure in different European populations of Colorado potato beetle reveals a robust response with minor variability. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **166**, 104569; DOI: 10.1016/j.pestbp.2020.104569.
- Meinke, L.J., D. Souza, B.D. Siegfried, 2021:** The Use of Insecticides to Manage the Western Corn Rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera*, LeConte: History, Field-Evolved Resistance, and Associated Mechanisms. *Insects* **12**, DOI: 10.3390/insects12020112.
- Meurer, R.A., S. Kemper, S. Knopp, T. Eichert, F. Jakob, H.E. Goldbach, U. Schwaneberg, A. Pich, 2017:** Biofunctional Microgel-Based Fertilizers for Controlled Foliar Delivery of Nutrients to Plants. *Angewandte Chemie International Edition* **56**, 7380–7386, DOI: 10.1002/anie.201701620.
- Mishra, S., J. Dee, W. Moar, J.D. Beattie, J. Baum, N.P. Dias, A. Alyokhin, A. Buzza, S.I. Rondon, M. Clough, S. Menasha, R. Groves, J. Clements, K. Ostlie, G. Felton, T. Waters, W.E. Snyder, J.L. Jurat-Fuentes, 2021:** Selection for high levels of resistance to double - stranded RNA (dsRNA) in Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) using non - transgenic foliar delivery. *Scientific Reports*, 1–12, DOI: 10.1038/s41598-021-85876-1.
- Mitter, N., E.A. Worrall, K.E. Robinson, P. Li, R.G. Jain, C. Taochy, S.J. Fletcher, B.J. Carroll, G.Q. (Max) Lu, Z. Ping Xu, 2017:** Clay nanosheets for topical delivery of RNAi for sustained protection against plant viruses. *Nature Plants* **3**, DOI: 10.1038/nplants.2016.207.
- Niu, J., W.-J. Yang, Y. Tian, J.-Y. Fan, C. Ye, F. Shang, B.-Y. Ding, J. Zhang, X. An, L. Yang, T.-Y. Chang, O. Christiaens, G. Smaghe, J.-J. Wang 2019:** Topical dsRNA delivery induces gene silencing and mortality in the pea aphid. *Pest Management Science* **75**, 2873–2881, DOI: 10.1002/ps.5457.
- OECD, 2020:** Considerations for the Environmental Risk Assessment of the Application of Sprayed or Externally Applied dsRNA-based Pesticides. Series on Pesticides No. 104, ENV/JM/MONO (2020) 26 (Paris).
- Parker, K.M., V. Barragán Borrero, D.M. van Leeuwen, M.A. Lever, B. Mateescu, M. Sander, 2019:** Environmental Fate of RNA Interference Pesticides: Adsorption and Degradation of Double-Stranded RNA Molecules in Agricultural Soils. *Environmental Science & Technology* **53**, 3027–3036, DOI: 10.1021/acs.est.8b05576.
- Peng, Y., K. Wang, W. Fu, C. Sheng, Z. Han, 2018:** Biochemical Comparison of dsRNA Degrading Nucleases in Four Different Insects. *Frontiers in Physiology* **9**, 624, DOI: 10.3389/fphys.2018.00624.
- Qiao, L., C. Lan, L. Capriotti, A. Ah-Fong, J. Nino Sanchez, R. Hamby, J. Heller, H. Zhao, N.L. Glass, H.S. Judelson, B. Mezzetti, D. Niu, H. Jin, 2021:** Spray-induced gene silencing for disease control is dependent on the efficiency of pathogen RNA uptake. *Plant Biotechnology Journal* **19** (9), 1756–1768, DOI: 10.1111/pbi.13589.
- Rank, A.P., A. Koch, 2021:** Lab-to-Field Transition of RNA Spray Applications – How Far Are We? *Frontiers in Plant Science* **12**, 2243, DOI: 10.3389/fpls.2021.755203.
- Rodrigues, T.B., S.K. Mishra, K. Sridharan, E.R. Barnes, A. Alyokhin, R. Tuttle, W. Kokulapalan, D. Garby, N.J. Skizim, Y.-w. Tang, B. Manley, L. Aulisa, R.D. Flannagan, C. Cobb, K.E. Narva, 2021:** First Sprayable Double-Stranded RNA-Ba-

- sed Biopesticide Product Targets Proteasome Subunit Beta Type-5 in Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). *Frontiers in Plant Science* **12**, 728652, DOI: 10.3389/fpls.2021.728652.
- Schenkel, W., A. Gathmann, 2021:** Regulatory aspects of RNAi in plant production. In Mezzetti, B., J.B. Sweet, L. Burgos (eds.). *RNAi for Improved Crop Performance Plant Improvement and Protection*, Oxfordshire, CABI, 154–168, DOI: 10.1079/9781789248890.0154.
- Schiemann, J., A. Dietz-Pfeilstetter, F. Hartung, C. Kohl, J. Romeis, T. Sprink, 2019:** Risk Assessment and Regulation of Plants Modified by Modern Biotechniques: Current Status and Future Challenges. *Annual Review of Plant Biology* **70**, 699–726, DOI: 10.1146/annurev-arplant-050718-100025.
- Sharma, S., R. Kooner, R. Arora, 2017:** Insect Pests and Crop Losses. In Arora, R., S. Sandhu (eds.). *Breeding Insect Resistant Crops for Sustainable Agriculture*, Singapore, Springer, 45–66, DOI: 10.1007/978-981-10-6056-4_2.
- Sharma, P., S. Kumar, R.K. DeLong, 2021:** Nanomaterials for Agricultural and Ecological Defense Applications: Active Agents and Sensors. *WIREs Nanomedicine and Nanobiotechnology* **13** (5), e1713, 1–18, DOI: 10.1002/wnan.1713.
- Singh, I.K., S. Singh, K. Mogilicherla, J.N. Shukla, S.R. Palli, 2017:** Comparative analysis of double-stranded RNA degradation and processing in insects. *Scientific Reports* **7**, 17059, DOI: 10.1038/s41598-017-17134-2.
- Thairu, M.W., I.H. Skidmore, R. Bansal, E. Nováková, T.E. Hansen, H. Li-Byarlay, S.A. Wickline, A.K. Hansen, 2017:** Efficacy of RNA interference knockdown using aerosolized short interfering RNAs bound to nanoparticles in three diverse aphid species. *Insect Molecular Biology* **26**, 356–368, DOI: 10.1111/imb.12301.
- Van Leeuwen, T., J. Vontas, A. Tsagkarakou, W. Dermauw, L. Tirry, 2010:** Acaricide resistance mechanisms in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and other important Acari: A review. *Insect Biochemistry and Molecular Biology* **40**, 563–572, DOI: 10.1016/j.ibmb.2010.05.008.
- Wagner, D.L., E.M. Grames, M.L. Forister, M.R. Berenbaum, D. Stopak, 2021:** Insect decline in the Anthropocene: Death by a thousand cuts. *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* **118**, e2023989118, DOI: 10.1073/pnas.2023989118.
- Wang, K., B. Li, Y. Yu, J. Wei, J. Zhu, J. Wang, F. Lin, H. Xu, 2021:** Bacterial RdI2 dsRNA increased the insecticidal activity of GABAR blockers and allosteric modulators against *Plutella xylostella*. *bioRxiv*, DOI: 10.1101/2021.03.24.436736.
- Wang, M., A. Weiberg, F.-M. Lin, B.P.H.J. Thomma, H.-D. Huang, H. Jin, 2016:** Bidirectional cross-kingdom RNAi and fungal uptake of external RNAs confer plant protection. *Nature Plants* **2**, 16151, DOI: 10.1038/nplants.2016.151.
- Whitten, M., P. Dyson, 2017:** Gene silencing in non-model insects: Overcoming hurdles using symbiotic bacteria for trauma-free sustainable delivery of RNA interference. *BioEssays* **39**, 1600247, DOI: 10.1002/bies.201600247.
- Whitten, M.M.A., P.D. Facey, R. Del Sol, L.T. Fernández-Martínez, M.C. Evans, J.J. Mitchell, O.G. Bodger, P.J. Dyson, 2016:** Symbiont-mediated RNA interference in insects. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences* **283**, 20160042, DOI: 10.1098/rspb.2016.0042.
- Willow, J., L. Soonvald, S. Sulg, R. Kaasik, A.I. Silva, C. Nji Tizi Taning, O. Christiaens, G. Smagghe, E. Veromann, 2020:** First Evidence of Bud Feeding-Induced RNAi in a Crop Pest via Exogenous Application of dsRNA. *Insects* **11** (11), 769, DOI: 10.3390/insects11110769.
- Wu, J.J., L.L. Mu, W.N. Kang, L.J. Ze, C.H. Shen, L. Jin, A. Ali Anjum, G.-Q. Li, 2021:** RNA interference targeting ecdysone receptor blocks the larval–pupal transition in *Henosepilachna vigintioctopunctata*. *Insect Science* **28**, 419–429, DOI: 10.1111/1744-7917.12777.
- Zhang, J., S.A. Khan, C. Hasse, S. Ruf, D.G. Heckel, R. Bock, 2015:** Full crop protection from an insect pest by expression of long double-stranded RNAs in plastids. *Science* **347** (6225), 991–994, DOI: 10.1126/science.1261680.

Yvonne Becker¹, Sascha Patz², Stephanie Werner³, Björn Hoppe⁴, Stephanie Feltgen⁴, Beatrice Berger⁵, Adam Schikora¹, René Glenz⁴, Stephan König⁴, Silvio Erler⁶, Gritta Schrader⁴, Daniel Huson², Matthias Becker⁴

Bacteria producing contractile phage tail-like particles (CPTPs) are promising alternatives to conventional pesticides

Bakterien, die kontraktile Phagenderivate produzieren, sind vielversprechende Alternativen zu konventionellen Pflanzenschutzmitteln

Affiliations

¹Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Epidemiology and Pathogen Diagnostics, Braunschweig, Germany.

²University of Tübingen, Institute for Bioinformatics and Medical Informatics, Tübingen, Germany.

³Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Biosafety in Plant Biotechnology, Quedlinburg, Germany.

⁴Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for National and International Plant Health, Braunschweig, Germany.

⁵Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Plant Protection in Field Crops and Grassland, Braunschweig, Germany.

⁶Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Bee Protection, Braunschweig, Germany.

Correspondence

Dr. Yvonne Becker, Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Epidemiology and Pathogen Diagnostics, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, Germany, email: yvonne.becker@julius-kuehn.de

Dr. Matthias Becker, Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for National and International Plant Health, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, Germany, email: matthias.becker@julius-kuehn.de

Abstract

This mini-review aims at raising the interest in contractile phage tail-like particles (CPTPs) of bacteria as an efficient and pest-specific alternative to conventional chemical pesticides in agriculture, horticulture and forestry. CPTPs are used by various bacteria in diverse environments for interbacterial competition or for manipulation of eukaryotic hosts, such as fungi or insects. This review gives examples for the versatile use of CPTPs as powerful biological control agents. We introduce the different types of CPTPs with a special focus on those with activity against insect plant pests. In addition, we present two currently established web services that combine the permanently increasing knowledge on CPTPs with a selection approach of the best candidate bacteria for targeted CPTP application in sustainable plant production.

Keywords

bacteria, bacteriophages, contractile phage tail-like particles, pest control, insecticides

Zusammenfassung

Diese Übersichtsarbeit verfolgt das Ziel, über bakterielle kontraktile Phagenderivate (englisch CPTPs) und ihr Potenzial als effiziente und Schadorganismus-spezifische Alternativen zu konventionellen chemischen Pflanzenschutzmitteln in der Land-/Forstwirtschaft und im Gartenbau zu informieren. CPTPs werden von verschiedenen Bakterien in diversen Habitaten für den interbakteriellen Konkurrenzkampf sowie zur

Beeinflussung eukaryotischer Wirte, wie Pilze und Insekten, verwendet. Diese Arbeit präsentiert interessante und bemerkenswerte Beispiele für den vielfältigen Einsatz von CPTPs als leistungsfähige biologische Bekämpfungsmittel. Wir stellen die verschiedenen Typen von CPTPs vor und legen einen besonderen Fokus auf diejenigen, die eine Wirkung gegen Schadinsekten besitzen. Zusätzlich stellen wir zwei kürzlich etablierte Webservices vor, die das permanent wachsende Wissen über CPTPs mit einem Auswahlverfahren für die besten Bakterienkandidaten kombinieren, um eine zielgerichtete Anwendung der CPTPs in der nachhaltigen Pflanzenproduktion zu ermöglichen.

Stichwörter

Bakterien, Bakteriophagen, kontraktile Phagenderivate, Pflanzenschutz, Insektizide

Introduction

Plant pests are a threat to plant production and forestry. Loss of biodiversity and climate change create new ecological niches, which can be easily occupied by invasive species, such as plant pathogenic bacteria, fungi, nematodes, and insects. Phytosanitary measures for eradication of quarantine pests or – once stable populations have established – the containment of invasive pests, is expensive. Moreover, one needs to mention the costs of harvest losses caused by pests that developed resistance to conventional chemical pesticides and those that developed mechanisms to break crop resistance. Environment-friendly crop production and forest-



(c) The author(s) 2022

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

ry rely on breeding of resilient varieties, habitat biodiversity and sustainable farm/forest management practices. Recently the potential of *in situ* plant-associated microorganisms, such as bacteria and fungi, has gained high awareness, because of their plant-beneficial capabilities, e.g. to reduce the deleterious impact of pests by enhancing plant resilience or by direct pest-antagonizing mechanisms. Targeted application of these microorganisms is used to enhance plant performance and/or support the native (micro-) biota of plants in (agro/forest-) ecosystems (Glick, 2012; Kondo et al., 2020; Lopes et al., 2021).

Here, we present an alternative plant protection strategy that addresses pests individually. The approach is based on the application of bacteria that naturally produce derivatives of bacterial viruses (bacteriophages or prophages, short: phages), that lost their viral autonomy and have been transformed over a long evolutionary time into tools for interbacterial competition and interaction with eukaryotes, called “phage tail-like particles” (CPTPs). Several types of phage derivatives differing in their mode of action have been described, and different synonyms for the same type of phage derivative have been used in recent publications. Previously, we have described the existing synonyms in more detail (Patz et al., 2019) and seek to simplify the (sometimes misleading) terminology for this mini-review. CPTP types, subgroups, and most frequently used synonyms are presented in Table 1.

The idea to apply such phage derivatives to plants differs significantly from phage therapy, which has been suggested as part of an integrated plant disease management strategy (Balogh et al., 2010; Buttner et al., 2017). In contrast to phages, phage derivatives do not need to be isolated from bacteria before application, do not require protective formulations or sheltering from sunlight, have a much higher persistence in the plant environment and can be used as part of an inoculum of CPTP-producing bacteria, providing the important benefit of plant-colonizing bacteria serving as vectors for phage derivatives. Most importantly, phages do only address bacteria, but phage derivatives, can affect different kinds of organisms, including insects.

However, the great potential of CPTPs in plant protection has been underestimated and research towards application in crop production and forestry has rarely been tackled until

now (Lavermicocca et al., 2002; Príncipe et al., 2018). The different CPTP-types and their potential as alternatives to conventional chemical pesticides are presented in the course of this mini-review.

What is a CPTP?

The term “phage tail-like” correctly suggests ancestral and structural similarities to bacteriophages, which are viruses of bacteria. However, in contrast to phages, **CPTPs are not viruses**: The CPTP syntenic gene clusters lack genes for viral DNA transfer, and for the capsid biosynthesis, acting as the viral DNA storage structure (Figure 1B). The latter was repeatedly confirmed microscopically and genetically (Fernandez et al., 2017; Patz et al., 2019). First-grade research on CPTPs has been published in the past few years unravelling the atomic structure (Ge et al., 2015; Chang et al., 2017; Jiang et al., 2019) and their fascinating mode of action (Taylor et al., 2016; Böck et al., 2017; Vacheron et al., 2021). Two characteristics describing their place of action (intracellular/membrane-anchored vs. extracellular space) and the mode of action (mechanical vs. effector/toxin delivery) allow differentiation of three main types of CPTPs, which are relevant for pest control: (i) **type VI secretion systems (T6SSs)** constituting the intracellular/membrane-anchored CPTPs, (ii) **tailocins** constituting mechanically functioning extracellular CPTPs and (iii) **extracellular contractile injection systems (eCISs)** constituting effector/toxin delivering extracellular CPTPs (Fig. 1A).

Effector and toxin delivery CPTPs are of particular interest, since their mode of action includes injection of compounds into the target-organisms. Two types of effector/toxin delivery CPTPs have been distinguished: the first type (eCIS) functions outside the producer cells (Fig. 1 and 2). The extracellular activity by itself is not astonishing as many bacterial compounds are transported to the extracellular space via a large assortment of bacterial secretion systems, but eCISs are that large in size that it is impossible to transport them through the cell wall of a living cell. Thus, producer cells have to lyse (and die) in order to release eCISs. In other words, producer cells “sacrifice” themselves for the sake of the population. From a human point of view, this may appear altruistic, however, from an evo-

Table 1. Contractile phage tail-like particles (CPTPs): Main types, frequently used synonyms, and subgroups (for more detail see Patz et al., 2019)

Type	(Rigid contractile) Tailocin	Extracellular Contractile Injection System: eCIS	Type VI Secretion System: T6SS
synonyms	Rigid-Type Tailocin R-Type Tailocin R-Type Pyocin Pyocin	Toxin Delivery Tailocin PLTS (Phage-like Protein Translocation Structure)	no synonyms
subgroups	no subgroups	Afp, AfpX (Antifeeding prophage, tailocin designated Afp) PVC (Photorhabdus Virulence Cassette) MAC (Metamorphosis-associated contractile structure) BIS (Bacteroidales injection system) T6SS type IV	T6SS type I T6SS type II T6SS type III

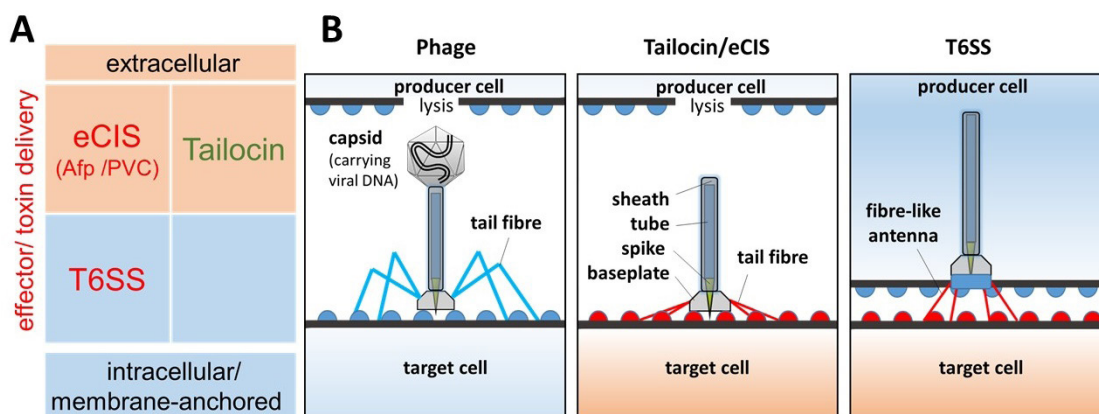


Fig. 1. Subgroups of contractile phage tail-like particles (CPTPs): A. Main types of CPTPs distinguished by two characteristics: (i) place of action: extracellular vs. intracellular/membrane-anchored, (ii) mode of action: effector/toxin delivery (in red font) vs. mechanical (in green font); B. Main structural differences between CPTPs and bacteriophages. Note that the target cell of the phage is from the same bacterial strain as the producer cell and becomes a putative new producer cell after infection, whereas target cells of tailocins, eCISs and T6SSs belong to a different bacterial strain and are supposed to be killed immediately. Half circles on the outside of bacterial cells represent specific surface determinants (e.g. lipopolysaccharides), which are recognized by tail fibres and fibre-like antennae, respectively. Created with Power Point.

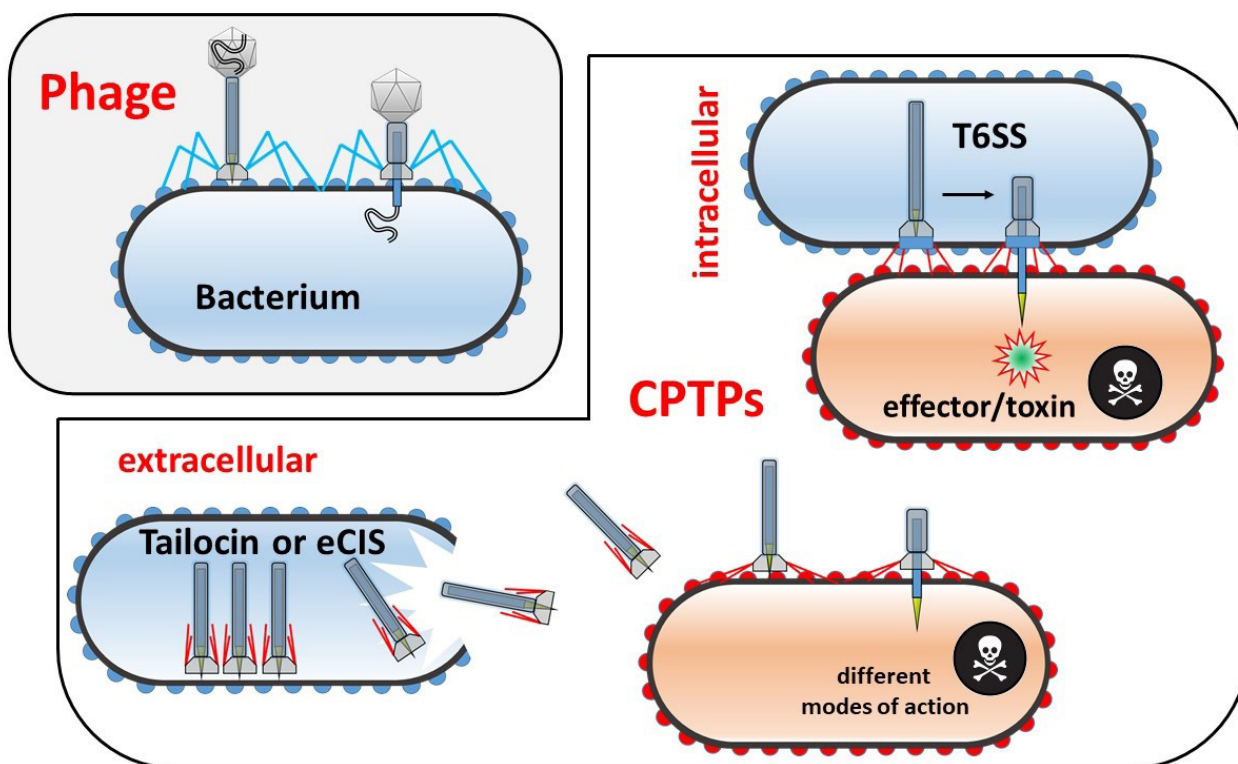


Fig. 2. Schematic depiction of morphological differences between a contractile phage, carrying a capsid with viral DNA, and contractile phage tail-like particles (CPTPs) lacking the capsid; the type VI secretion system (T6SS) differs from the extracellular CPTPs in its intracellular/membrane-anchored place of action. In contrast to the T6SS, there are multiple copies of an extracellular contractile injection system (eCIS) or a tailocin within a single bacterial cell. For simplification, the different modes of action of eCISs and tailocin are not depicted here, but in Fig. 3. Created with Power Point.

lutionary point of view, “division of labour” (including death of particular cells) is a highly beneficial trait for the population. Well analysed eCISs (Afp, AfpX, PVC, MAC) target eukaryotic cells, however recent bioinformatic studies indicate that certain types of eCIS can target prokaryotes (Fig. 3), which needs to be confirmed experimentally (Geller et al., 2021). The second type of effector/toxin delivery CPTPs is the T6SS, which remains anchored inside the producer cell while being in action

and does not require cell lysis (Fig. 1 and 2). Activity of T6SS against gram-negative bacteria and eukaryotic cells (reviewed in Monjarás Feria & Valvano, 2020) is well established. Recently activity of T6SS against yeast (Trunk et al., 2018) and gram-positive bacteria (Le et al., 2021) was shown as well.

R-Type tailocins (rigid contractile tailocins) represent another important type of extracellular CPTPs, but their mode of action is different. Whereas eCIS and T6SS inject chemical com-

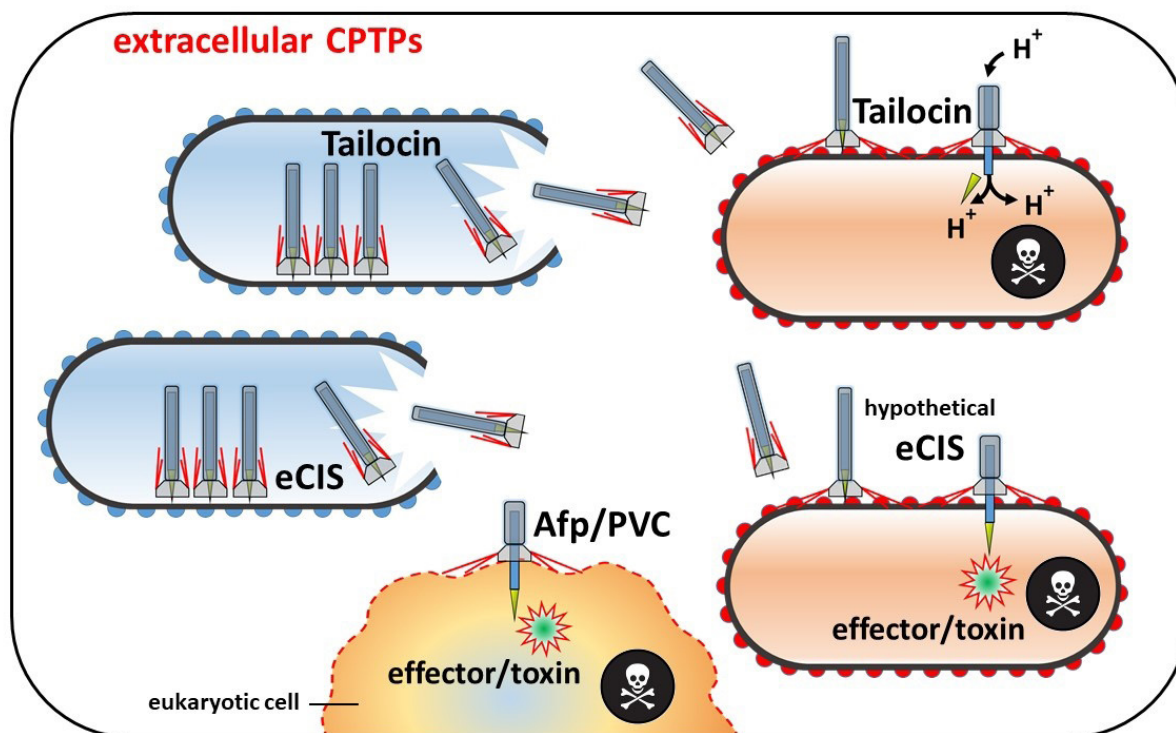


Fig. 3. Schematic depiction of functional differences between three types of extracellular CPTPs, causing death of the target cell: a tailocin functioning mechanically and two subgroups of extracellular contractile injection systems (eCISs) delivering effectors/toxins into target cells: (i) Antifeeding prophages (Afps) and Photorhabdus virulence cassettes (PVCs) attack insect (eukaryotic) cells, (ii) Bioinformatic studies indicate that certain types of (hypothetical) eCISs might target prokaryotes. Created with Power Point.

pounds (toxins, effectors) into target cells, tailocins puncture a hole in the bacterial cell wall and the plasma membrane of the target, which causes loss of the proton motive force and subsequent starvation of the target cell (Fig. 3). Due to the homology between eCIS and R-Type tailocin syntenic gene clusters, the differentiation of both on a genomic scale is quite challenging and relies often on specific domains and the absence/presence of an effector/toxin-encoding gene close to the respective gene cluster. From an evolutionary point of view, R-Type tailocins originates from the contractile phage family Myoviridae. However, we like to mention here, that there is another type of tailocins diverged from the family Siphoviridae that is non-contractile and termed F-Type (flexible) tailocin. Its potential is less documented and will not be further considered in this review. Both types of tailocins are well studied in gram-negative bacteria (reviewed in Ghequire & Mot, 2015 and Patz et al., 2019) but have also been identified in gram-positive bacteria (Gebhart et al., 2015; Lee et al., 2016).

How do CPTPs work?

All three types of CPTPs share the same physical composition. They are syringe-like devices or spear-like projectiles that consist of an outer contractile sheath and an inner rigid tube, a baseplate, which allows a tight binding to the target cell surface, and six tail fibres carrying receptor-binding proteins (RBPs) that guarantee specificity (Figure 3). However, the different places of action (inside or outside the producer cell) require substantial adaptations in the different types of CPTPs.

While almost all CPTPs are released from producer cells by cell lysis, the T6SS is attached to the cell envelope of its producer cell by a membrane anchor. The energy stored in the extended sheath is used to thrust the spike and tube with the associated effectors out of the producer cell and across membranes of both producer and target cell (Fig. 2). During the assembly of the T6SS, effectors or toxins are preloaded onto the spike or into the tube, and after action, subunits of the contracted sheath are recycled by a T6SS-specific unfoldase, to allow for a new round of assembly (Basler, 2015). At first glance, the recycling of the T6SS appears a much more efficient strategy than lysing the producer cell, but the numbers of active CPTPs per bacterial cell differ conspicuously. Usually, only a single T6SS per cell can be built at a time, but hundreds of extracellular CPTPs. Yao and co-workers calculated that *Burkholderia cenocepacia* releases on average approximately 600 tailocins from a lysed cell (Yao et al., 2017). Although T6SSs are believed to play a predominant role in bacteria-bacteria competition (Ho et al., 2014; Chen et al., 2015), recently also anti-yeast action has been demonstrated for *Serratia marcescens* against *Saccharomyces cerevisiae* and *Candida albicans* (Trunk et al., 2018). Trunk and co-workers showed that bacteria-yeast cell contact is essential for T6SS activity causing arrest of yeast cell growth and death. T6SS toxin delivering activity against filamentous fungi has not been shown yet, to the best of our knowledge. However this area of study could open up exciting new areas of bacterial-fungal interaction (BFI) research (Deveau et al., 2018) and potentially for biological control of phytopathogenic fungi by plant-associated bacteria. Tailocins are produced by bacteria to target closely related bacterial strains in the same biologi-

cal niche (Dorosky et al., 2017; Scholl, 2017; Vacheron et al., 2021), but the target range might be extended by e.g. horizontal transfer of tail fibre genes or a higher mutation rate in the genetic domains of tail fibres (Haggård-Ljungquist et al., 1992; Yao et al., 2017).

What confers target-specificity to CPTPs?

Brackmann and co-workers (Brackmann et al., 2017) stated that using physical force to translocate macromolecules across a membrane, which requires a sharp tip, a source of energy, and the ability to strongly bind to the target, has the advantage of being a universal solution independent of the properties of the target membrane and cell wall. Regardless of this, specificity is provided by the target surface: All CPTPs, targeting either gram-negative bacteria, gram-positive bacteria or eukaryotic cells, have in common that target specificity is presumably conferred by tail fibre/receptor recognition. For instance, the properties of lipopolysaccharides (LPSs) on the outside of the target cell wall of gram-negative bacteria are crucial for a strong binding of CPTP tail-fibres. The density and specificity of LPS moieties, particularly O-specific antigens, renders them either a receptor for, or a shield against CPTPs and determines whether a strain is sensitive or resistant (Carim et al., 2021). Altered LPS composition is supposedly the reason why tailocin-producing strains manage to avoid self-intoxication. This has also been shown for T6SSs of *Vibrio fischeri* (Speare et al., 2021). LPS thinning seems to be a mechanism by which resistant strains can become more sensitive to tailocins (Carim et al., 2021). Gram-positive bacteria have no LPS on their outer surface, but carry peptidoglycans that may serve as receptors; however, this has to our knowledge, not been studied yet. Recently, it was speculated by Smith and co-workers that a single T6SS, though dependent on cell-cell contact, may have a broad target spectrum without relying on target cells' surface receptors (Smith et al., 2020). Different from tailocins and eCISs cell-cell contact can be possibly established between T6SS-producing strains by other modes than tail fibre-binding. However, it was shown that T6SSs of *Myxococcus xanthus* (Chang et al., 2017) produce fibre-like antennae on the surface (also depicted in Fig. 1B), which the authors supposed to be important for recognizing targets.

Why are some CPTPs effective as insecticides?

Insecticidal activity was reported for T6SSs and two of the eCIS subgroups: Afps and PVCs. T6SSs have an impact on bacteria by using anti-prokaryotic effectors and an impact on yeast, insects and other animals using anti-eukaryotic effectors (Monjarás Feria & Valvano, 2020). Afps and PVCs attack exclusively insect cells. Further subgroups of eCIS (Table 1) have been described (Penz et al., 2012; Shikuma et al., 2014; Rojas et al., 2020), but have little or no insecticidal activity and thus are beyond the scope of this article. Afps, PVCs and T6SSs are applied by entomopathogenic bacteria to eventually invade the insect haemocoel. The haemocoel is the body cavity of insects filled by haemolymph, the insect “blood”, a fluid plasma that contains haemocytes, which are immune cells analogous to human leucocytes. Insect haemocytes bind to invading microorganisms and mediate immune responses like phagocytosis or encapsulation (Lavine & Strand, 2002).

In the following, we present for each of the insecticidal CPTP subgroups one compelling example from literature, showing that CPTP-producing bacteria manage to invade the insect haemocoel, which appears to be an obligatory precondition for deploying a lethal effect.

T6SS: Vacheron and co-workers found that the T6SS of the plant-colonizing bacterium *Pseudomonas protegens* contributes significantly to insect pathogenicity in oral infection assays on larvae of the cabbage pest *Pieris brassicae*, while causing severe changes in the insect gut microbiome, but not when bacteria were injected directly into the haemocoel (Vacheron et al., 2019). The authors concluded that entomopathogenic bacteria deploy T6SS-based strategies to first disrupt the commensal microbiota and establish in the insect gut, before they pass through the peritrophic membrane and gut epithelial barrier, and proliferate in the haemocoel where they kill the host eventually by expression of virulence factors. In order to escape from haemocyte-mediated immunity of insects, entomopathogenic bacteria have evolved a highly protective cell envelope (Kupferschmied et al., 2016). Like *P. protegens* many other plant-colonizing bacteria have been reported to contain gene clusters encoding type VI secretion systems (Becker et al., 2018), but whether these T6SSs address prokaryotes or eukaryotes still needs to be elucidated, offering a giant pool of yet unused resources for “biological pesticides”.

Afp: The *Serratia entomophila* antifeeding prophage (Afp), located on a plasmid, causes amber disease in the New Zealand grass grub, *Costelytra zealandica*. The term “antifeeding” describes adequately the response, the cessation of feeding, of insect larvae two days after ingesting plant tissue colonized by Afp-producing bacteria. The name-giving amber colour of larvae appears one day later due to clearing of the usually dark larval gut. Infected larvae may remain in a chronic, non-feeding state for more than 4 months before bacteria eventually invade the haemocoel, resulting in rapid death of the insect (Jackson et al., 2001). Hurst and co-workers showed that the purified Afp caused the same symptoms in grass grub larvae and thus verified that Afp is the causative agent of amber disease (Hurst et al., 2007). Another species from genus *Serratia*, *S. proteamaculans* was also shown to produce antifeeding prophages, here termed AfpXs, targeting other New Zealand pasture pests: Grass Grub (*Costelytra giveni*) and Manuka Beetle (*Pyronota* species). Demonstrating that *Serratia entomophila* and *S. proteamaculans* have no impact on other Scarabaeidae insect species, the authors inferred a high target-specificity of Afps. Genome analyses revealed that other bacteria, such as the plant endophyte *Erwinia oleae*, contain Afp variants (Hurst et al., 2018) pointing to the unemployed potential of Afps to defeat insect pests other than those endemic to New Zealand.

PVC: Other CPTPs, which are very similar to Afps, have been discovered in bacteria from genera *Xenorhabdus* and *Photorhabdus*, which are mutualistically associated with entomopathogenic nematodes: *Photorhabdus* with nematodes from the family Heterorhabditidae and *Xenorhabdus* with family Steinernematidae (Hinchliffe, 2013). The bacteria use the nematodes as a vector to enter an insect, where they invade the haemolymph and produce toxins, which eventually kill the insect. A single strain of *Xenorhabdus* may produce a variety

of bioactive compounds against bacteria, fungi, insects, nematodes, protozoa, and cancer cells (reviewed in Dreyer et al., 2018). Surprisingly, the PVC products of *Photorhabdus* have no antibacterial activity but trigger rapid destruction of insect haemocytes. *Photorhabdus* Virulence Cassettes inject insecticidal toxins directly into insect cells to cause actin cytoskeleton condensation (Yang et al., 2006). Produced for killing the blood cells of insects, the use of PVCs appears an extraordinary aggressive, though sophisticated bacterial strategy for escaping haemocyte recognition. Since the PVC products of *Photorhabdus* lack the antibacterial activity of T6SSs and tailocins, but possess a variable number of putative anti-insect effectors instead, Yang and co-workers hypothesized that the PVC products of *Photorhabdus* have been modified to attack eukaryotic host cells. Bacteria from both genera, *Xenorhabdus* and *Photorhabdus*, produce a multitude of insecticidal and other toxins. For *Photorhabdus* the significant impact of PVCs was shown, for *Xenorhabdus* this still needs to be confirmed, but genomic analyses revealed that *Xenorhabdus* strains also possess PVC gene clusters (Vlisidou et al., 2019).

Contractile tailocin: R-Type tailocins are the only CPTPs working mechanically and are effective bacteriocins/bactericides (Patz et al., 2019), nonetheless, a significant impact on insect pests has to the best of our knowledge not been shown. It is conceivable that R-Type tailocin-producing bacteria have the potential to affect significantly the gut microbiome of insects. However, the status quo of current CPTP research suggests that bacteria have to invade the insect haemocoel and secrete effectors for having a lethal effect on the insect.

Why are some CPTP-producing bacteria protecting their insect hosts?

An example: CPTP-producing bacteria from the bees' gut

Pollinators are in major focus when it comes to application of new plant protection products, and the application of potentially harmful compounds needs to be reduced. Thus, specificity of CPTPs needs to be verified to avoid non-target effects, and the risk of horizontal gene transfer needs to be assessed. Not surprisingly many bacteria associated with insects (mainly those from the insect gut system) employ CPTPs naturally. Within the core microbial community of honey bees and bumble bees, genome studies revealed that several bacterial species have T6SS loci and effectors/toxins (e.g. Rhs proteins) for which expression was confirmed by transcriptome analysis; namely *Apibacter* spp. (Kwong et al., 2018), *Candidatus Schmidhempelia bombi* (Martinson et al., 2014), *Frischella perrara* (Engel et al., 2015), *Gilliamella apicola* and *Snodgrassella alvi* (Kwong et al., 2014). The huge variety of T6SS classes and diversification of related toxins among strains and species might mediate cell-cell interactions and help colonization of the different sections of the gut system. The antagonistic interaction of bacterial species via T6SSs may have finally resulted in (i) the coevolution of the bacteria within the host-associated microbial communities and (ii) an active defence system against invading microorganisms (Kwong et al., 2014; Steele et al., 2017; Steele et al., 2021). In particular, resistance to in-

vasion by potential pathogens (e.g. *Serratia* sp. and other Enterobacteriaceae) (Steele et al., 2017) and the exclusion of potential commensals in metabolic interactions are enhanced by T6SS specificity. Recently, it was shown that the core community of the honey bee gut microbiome possessing T6SSs can rapidly eliminate the opportunistic pathogen *Serratia marcescens*, with limited negative effects on the bee symbionts (Steele et al., 2021). Noteworthy, *S. marcescens* has a T6SS itself, which helps the pathogen to persist in the bee gut (Steele et al., 2021). This observation inspires the idea of using symbiotic strains as probiotics against pathogenic bacteria. Further interaction with pathogenic organisms and their extracellular contractile injection systems (eCISs), e.g. *Paenibacillus larvae* causing American foulbrood (AFB) disease, cannot be excluded, but have not been studied yet.

Outlook: Classification and use of CPTP-producing bacteria in crop production and forestry

Astonishing observations made on natural insecticidal effects of bacterial strains, turned out to be caused by bacterial T6SSs, Afps or PVCs. Other studies reported bactericidal and fungicidal effects of tailocins and other CPTPs (reviewed by Ghequire & de Mot, 2015; Patz et al., 2019). The fact, that CPTPs have been discovered in mutualistic, commensal and pathogenic bacteria is not surprising, since bacteria benefit from producing different types of CPTPs in competitive environments. Nowadays genome analyses tools are sufficiently robust to inform us on the symbiotic and pathogenic potential of newly discovered bacteria and enable us to select interesting CPTP-producing candidates from an ever-increasing range of fully sequenced strains. Thus, in our opinion, CPTPs may offer **alternative, sustainable and safe** solutions to a range of threats imposed by plant pathogens and herbivorous insect pests.

Based on the increasing availability of genetic/genomic information we are currently developing bioinformatical algorithms for predicting the presence/distribution of all known and yet unknown CPTPs in extensively studied and still insufficiently investigated bacteria, in a joined project of JKI-AG and the University of Tübingen. Thus, we are analysing in total ~72,000 sequenced bacteria from the JGI/IMG server regarding their CPTPs and are currently optimizing the algorithm's accuracy. The CPTP-Pred algorithm annotates for bacterial strains, based on their protein-coding sequences of the entire genome, all possible CPTPs including their closest database hits. We are collecting all data on **contractile phage tail-like particles**, their hosts environments, and symbiotic or virulence potential, in a database termed CPTP-db. Also links to external databases, like eCISem, that lists only eCISs, are provided (Geller et al., 2021). CPTP-db and CPTP-Pred will enable educated guesses and research hypotheses for targeted and highly specific applications of CPTP-producing bacteria against insect plant pests, bacterial and fungal phytopathogens and against pathogens of bees.

Using bacteria with fully sequenced genomes only, may appear a heavy constraint while searching for promising candidate bacteria, however, our approach based on *in silico*-analyses is meant to incorporate also all relevant genes (plant-beneficial

and plant-pathogenic genes likewise) and not only those responsible for CPTP formation. The number of fully sequenced bacterial genomes is increasing rapidly and currently approximately 10,300 genomes of bacterial strains are listed as CPTP producers (excluding T6SS producers) in the CPTP-db. A more detailed view reveals approx. 6,200 R-type tailocin- and 4700 eCIS-producing strains. Only around a tenth of R-type tailocin producing strains seem to harbour an additional eCIS. Interestingly, Geller and co-workers identified 1,071 eCIS-containing strains only, when using a more restricted list of toxins compared to our analysis (Geller et al., 2021). However, their novel toxins are included in our algorithm and we are able to identify all of their declared eCISs. All services are available via the new web resource PLaBAsE (<https://plabase.informatik.uni-tuebingen.de/pb/plabase.php>) which provides among others (i) a database for screening approx. 5,600 plant-associated bacteria (PLaBA-db) and (ii) a plant growth-promoting traits prediction tool for bacterial genomes (PGPT-Pred). Further we host a tool for prediction of bacterial plant association by marker gene prediction (PIFAR-Pred) (Martínez-García et al., 2016).

Learning from nature to develop environment-friendly insecticides is appealing. Especially the high specificity of CPTPs leaving non-target organisms unaffected, in theory, renders them superior to conventional chemical pesticides, which often work on a broad spectrum of organisms, causing severe collateral damage. The impact of CPTPs on plants and ecosystems has to be determined for guaranteeing safe application of CPTP-producing bacteria in crop production systems and forestry. The genetic equipment of the bacterial strain needs to be assessed in detail and allows exclusion of candidates that harbour virulence factors. Nevertheless, *in vivo* experiments have to follow *in silico* analyses to guarantee the innocuousness of any kind of plant protecting agent. In this article, we report solely findings on bacterial strains that have been isolated from natural environments, i.e. from ecosystems in which they have established as part of a prokaryotic and eukaryotic community. Nonetheless, introducing living organisms into a new environment may have a significant impact on the ecosystem. Although CPTPs have been observed to possess a narrow target spectrum, this has to be confirmed by comprehensive experiments for any microbial strain, before its application in the field, not to mention the long lasting testing phase before reaching a status as a marketable plant protection product. Harmful effects on non-target organisms have not been reported for CPTPs yet, however, to advise caution should be good scientific practice in all approaches dealing with plant protecting agents. Accordingly, the two following goals should be pursued: (i) the development of environment-friendly plant protection products requires exact determination of targets and (ii) a human-induced enrichment of bacterial strains should be reversed by the native microbiota to minimize their environmental impact.

More and more evidence is produced that CPTP-producing bacteria dominate in a vast range of ecosystems and are highly abundant in our own microbiome. A recent study by Rojas and co-workers found that *Bacteroidales* bacteria from the human microbiome encode an eCIS, which the authors termed “*Bacteroidales* injection systems (BIS)”, that is present in the gut microbiomes of 99% of individuals from the United States and

Europe. Remarkably, BIS genes are more prevalent in the gut microbiomes of healthy individuals than in those individuals suffering from inflammatory bowel disease (Rojas et al., 2020), suggesting that the native human microbiome employs CPTPs to defeat invading microorganisms. Research on application of tailocins as alternatives to conventional antibiotics for medicinal use is underway (Gebhart et al., 2015; Kirk et al., 2017).

The search for effective and environment-friendly insecticides requires new scientific approaches. Here, we have introduced the idea to employ contractile phage tail-like particles (CPTPs) in pest control, substantiated by convincing studies, ranging from fundamental research on CPTPs deciphering their atomic structures and their molecular mode of action to successful application. Numerous first-grade publications in high-ranking journals have provided plenty of evidence that CPTPs are promising alternatives to conventional chemical pesticides.

Conflicts of interest statement

The author(s) declare that they do not have any conflicts of interest.

References

- Balogh, B., J.B. Jones, F.B. Iriarte, M.T. Momol, 2010: Phage therapy for plant disease control. *Current pharmaceutical biotechnology* **11** (1), 48–57, DOI: 10.2174/138920110790725302.
- Basler, M., 2015: Type VI secretion system: secretion by a contractile nanomachine. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **370** (1679), DOI: 10.1098/rstb.2015.0021.
- Becker, M., S. Patz, Y. Becker, B. Berger, M. Drungowski, B. Bunk, J. Overmann, C. Spröer, J. Reetz, G.V. Tchuisseu Tchakounte, S. Ruppel, 2018: Comparative Genomics Reveal a Flagellar System, a Type VI Secretion System and Plant Growth-Promoting Gene Clusters Unique to the Endophytic Bacterium *Kosakonia radicincitans*. *Frontiers in Microbiology* **9**, 1997, DOI: 10.3389/fmicb.2018.01997.
- Böck, D., J.M. Medeiros, H.-F. Tsao, T. Penz, G.L. Weiss, K. Aistleitner, M. Horn, M. Pilhofer, 2017: In situ architecture, function, and evolution of a contractile injection system. *Science* **357** (6352), 713–717, DOI: 10.1126/science.aan7904.
- Brackmann, M., S. Nazarov, J. Wang, M. Basler, 2017: Using Force to Punch Holes: Mechanics of Contractile Nanomachines. *Trends in cell biology* **27** (9), 623–632, DOI: 10.1016/j.tcb.2017.05.003.
- Buttimer, C., O. McAuliffe, R.P. Ross, C. Hill, J. O’Mahony, A. Coffey, 2017: Bacteriophages and Bacterial Plant Diseases. *Frontiers in Microbiology* **8**, 34, DOI: 10.3389/fmicb.2017.00034.
- Carim, S., A.L. Azadeh, A.E. Kazakov, M.N. Price, P.J. Walian, L.M. Lui, T.N. Nielsen, R. Chakraborty, A.M. Deutschbauer, V.K. Mutalik, A.P. Arkin, 2021: Systematic discovery of pseudomonad genetic factors involved in sensitivity to tailocins. *The ISME journal* **15** (8), 2289–2305, DOI: 10.1038/s41396-021-00921-1.

- Chang, Y.-W., L.A. Rettberg, D.R. Ortega, G.J. Jensen, 2017:** In vivo structures of an intact type VI secretion system revealed by electron cryotomography. *EMBO reports* **18** (7), 1090–1099, DOI: 10.15252/embr.201744072.
- Chen, L., Y. Zou, P. She, Y. Wu, 2015:** Composition, function, and regulation of T6SS in *Pseudomonas aeruginosa*. *Microbiological research* **172**, 19–25, DOI: 10.1016/j.micres.2015.01.004.
- Deveau, A., G. Bonito, J. Uehling, M. Paoletti, M. Becker, S. Bindschedler, S. Hacquard, V. Hervé, J. Labbé, O.A. Lastovetsky, S. Mieszkina, L.J. Millet, B. Vajna, P. Junier, P. Bonfante, B.P. Krom, S. Olsson, J.D. van Elsas, L.Y. Wick, 2018:** Bacterial-fungal interactions: ecology, mechanisms and challenges. *FEMS Microbiology Reviews* **42** (3), 335–352, DOI: 10.1093/femsre/fuy008.
- Dorosky, R.J., J.M. Yu, L.S. Pierson, E.A. Pierson, 2017:** *Pseudomonas chlororaphis* Produces Two Distinct R-Tailocins That Contribute to Bacterial Competition in Biofilms and on Roots. *Applied and Environmental Microbiology* **83** (15), DOI: 10.1128/AEM.00706-17.
- Dreyer, J., A.P. Malan, L.M.T. Dicks, 2018:** Bacteria of the Genus *Xenorhabdus*, a Novel Source of Bioactive Compounds. *Frontiers in Microbiology* **9**, 3177, DOI: 10.3389/fmicb.2018.03177.
- Engel, P., M.I. Vizcaino, J.M. Crawford, 2015:** Gut symbionts from distinct hosts exhibit genotoxic activity via divergent colibactin biosynthesis pathways. *Applied and Environmental Microbiology* **81** (4), 1502–1512, DOI: 10.1128/AEM.03283-14.
- Fernandez, M., A. Godino, A. Príncipe, G.M. Morales, S. Fischer, 2017:** Effect of a *Pseudomonas fluorescens* tailocin against phytopathogenic *Xanthomonas* observed by atomic force microscopy. *Journal of Biotechnology* **256**, 13–20, DOI: 10.1016/j.jbiotec.2017.07.002.
- Ge, P., D. Scholl, P.G. Leiman, X. Yu, J.F. Miller, Z.H. Zhou, 2015:** Atomic structures of a bactericidal contractile nanotube in its pre- and postcontraction states. *Nature Structural & Molecular Biology* **22** (5), 377–382, DOI: 10.1038/nsmb.2995.
- Gebhart, D., S. Lok, S. Clare, M. Tomas, M. Stares, D. Scholl, C.J. Donskey, T.D. Lawley, G.R. Govoni, 2015:** A modified R-type bacteriocin specifically targeting *Clostridium difficile* prevents colonization of mice without affecting gut microbiota diversity. *mBio* **6** (2), DOI: 10.1128/mBio.02368-14.
- Geller, A.M., I. Pollin, D. Zlotkin, A. Danov, N. Nachmias, W.B. Andreopoulos, K. Shemesh, A. Levy, 2021:** The extracellular contractile injection system is enriched in environmental microbes and associates with numerous toxins. *Nature Communications* **12** (1), 3743, DOI: 10.1038/s41467-021-23777-7.
- Ghequire, M.G.K., R. de Mot, 2015:** The Tailocin Tale: Peeling off Phage Tails. *Trends in Microbiology* **23** (10), 587–590, DOI: 10.1016/j.tim.2015.07.011.
- Glick, B.R., 2012:** Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica* **2012**, 963401, DOI: 10.6064/2012/963401.
- Haggård-Ljungquist, E., C. Halling, R. Calendar, 1992:** DNA sequences of the tail fiber genes of bacteriophage P2: evidence for horizontal transfer of tail fiber genes among unrelated bacteriophages. *Journal of Bacteriology* **174** (5), 1462–1477, DOI: 10.1128/jb.174.5.1462-1477.1992.
- Hinchliffe, S.J., 2013:** Insecticidal Toxins from the *Photorhabdus* and *Xenorhabdus* Bacteria. *The Open Toxinology Journal* **3** (1), 101–118, DOI: 10.2174/1875414701003010101.
- Ho, B.T., T.G. Dong, J.J. Mekalanos, 2014:** A view to a kill: the bacterial type VI secretion system. *Cell Host & Microbe* **15** (1), 9–21, DOI: 10.1016/j.chom.2013.11.008.
- Hurst, M.R.H., S.S. Beard, T.A. Jackson, S.M. Jones, 2007:** Isolation and characterization of the *Serratia entomophila* antifeeding prophage. *FEMS Microbiology Letters* **270** (1), 42–48, DOI: 10.1111/j.1574-6968.2007.00645.x.
- Hurst, M.R.H., A. Beattie, S.A. Jones, A. Laugraud, C. van Koten, L. Harper, 2018:** *Serratia proteamaculans* Strain AGR96X Encodes an Antifeeding Prophage (Tailocin) with Activity against Grass Grub (*Costelytra giveni*) and Manuka Beetle (*Pyronota* Species) Larvae. *Applied and Environmental Microbiology* **84** (10), DOI: 10.1128/AEM.02739-17.
- Jackson, T.A., D.G. Boucias, J.O. Thaler, 2001:** Pathobiology of amber disease, caused by *Serratia* Spp., in the New Zealand grass grub, *Costelytra zealandica*. *Journal of invertebrate pathology* **78** (4), 232–243, DOI: 10.1006/jipa.2002.5078.
- Jiang, F., N. Li, X. Wang, J. Cheng, Y. Huang, Y. Yang, J. Yang, B. Cai, Y.-P. Wang, Q. Jin, N. Gao, 2019:** Cryo-EM Structure and Assembly of an Extracellular Contractile Injection System. *Cell* **177** (2), 370–383.e15, DOI: 10.1016/j.cell.2019.02.020.
- Kirk, J.A., D. Gebhart, A.M. Buckley, S. Lok, D. Scholl, G.R. Douce, G.R. Govoni, R.P. Fagan, 2017:** New class of precision antimicrobials redefines role of *Clostridium difficile* S-layer in virulence and viability. *Science translational medicine* **9** (406), DOI: 10.1126/scitranslmed.aah6813.
- Kondo, Y.R., A.P. Primon, A.C.C.L. Da Fioreze, S.P. Da Cruz, 2020:** Growth promotion of genetically improved *Pinus taeda* seedlings by inoculation with species of *Bacillus*. *CERNE* **26** (4), 456–462, DOI: 10.1590/01047760202026042757.
- Kupferschmied, P., T. Chai, P. Flury, J. Blom, T.H.M. Smits, M. Maurhofer, C. Keel, 2016:** Specific surface glycan decorations enable antimicrobial peptide resistance in plant-beneficial pseudomonads with insect-pathogenic properties. *Environmental Microbiology* **18** (11), 4265–4281, DOI: 10.1111/1462-2920.13571.
- Kwong, W.K., P. Engel, H. Koch, N.A. Moran, 2014:** Genomics and host specialization of honey bee and bumble bee gut symbionts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111** (31), 11509–11514, DOI: 10.1073/pnas.1405838111.
- Kwong, W.K., M.I. Steele, N.A. Moran, 2018:** Genome Sequences of *Apibacter* spp., Gut Symbionts of Asian Honey Bees. *Genome Biology and Evolution* **10** (4), 1174–1179, DOI: 10.1093/gbe/evy076.
- Lavermicocca, P., S.L. Lonigro, F. Valerio, A. Evidente, A. Visconti, 2002:** Reduction of olive knot disease by a bacteriocin

- from *Pseudomonas syringae* pv. *ciccaronei*. Applied and Environmental Microbiology **68** (3), 1403–1407, DOI: 10.1128/AEM.68.3.1403-1407.2002.
- Lavine, M.D., M.R. Strand, 2002:** Insect hemocytes and their role in immunity. Insect Biochemistry and Molecular Biology **32** (10), 1295–1309, DOI: 10.1016/S0965-1748(02)00092-9.
- Le, N.-H., V. Pinedo, J. Lopez, F. Cava, M.F. Feldman, 2021:** Killing of Gram-negative and Gram-positive bacteria by a bi-functional cell wall-targeting T6SS effector. Proceedings of the National Academy of Sciences **118** (40), DOI: 10.1073/pnas.2106555118.
- Lee, G., U. Chakraborty, D. Gebhart, G.R. Govoni, Z.H. Zhou, D. Scholl, 2016:** F-Type Bacteriocins of *Listeria monocytogenes*: a New Class of Phage Tail-Like Structures Reveals Broad Parallel Coevolution between Tailed Bacteriophages and High-Molecular-Weight Bacteriocins. Journal of Bacteriology **198** (20), 2784–2793, DOI: 10.1128/JB.00489-16.
- Lopes, M.J.d.S., M.B. Dias-Filho, E.S.C. Gurgel, 2021:** Successful Plant Growth-Promoting Microbes: Inoculation Methods and Abiotic Factors. Frontiers in Sustainable Food Systems **5**, 606454, DOI: 10.3389/fsufs.2021.606454.
- Martínez-García, P.M., E. López-Solanilla, C. Ramos, P. Rodríguez-Palenzuela, 2016:** Prediction of bacterial associations with plants using a supervised machine-learning approach. Environmental Microbiology **18** (12), 4847–4861, DOI: 10.1111/1462-2920.13389.
- Martinson, V.G., T. Magoc, H. Koch, S.L. Salzberg, N.A. Moran, 2014:** Genomic features of a bumble bee symbiont reflect its host environment. Applied and Environmental Microbiology **80** (13), 3793–3803, DOI: 10.1128/AEM.00322-14.
- Monjarás Fera, J., M.A. Valvano, 2020:** An Overview of Anti-Eukaryotic T6SS Effectors. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology **10**, 584751, DOI: 10.3389/fcimb.2020.584751.
- Patz, S., Y. Becker, K.R. Richert-Pöggeler, B. Berger, R. Ruppel, D. H. Huson, M. Becker, 2019:** Phage tail-like particles are versatile bacterial nanomachines – A mini-review. Journal of Advanced Research **19**, 75–84, DOI: 10.1016/j.jare.2019.04.003.
- Penz, T., S. Schmitz-Esser, S.E. Kelly, B.N. Cass, A. Müller, T. Woyke, S.A. Malfatti, M.S. Hunter, M. Horn, 2012:** Comparative genomics suggests an independent origin of cytoplasmic incompatibility in *Cardinium hertigii*. PLoS genetics **8** (10), e1003012, DOI: 10.1371/journal.pgen.1003012.
- Príncipe, A., M. Fernandez, M. Torasso, A. Godino, S. Fischer, 2018:** Effectiveness of tailocins produced by *Pseudomonas fluorescens* SF4c in controlling the bacterial-spot disease in tomatoes caused by *Xanthomonas vesicatoria*. Microbiological research **212-213**, 94–102, DOI: 10.1016/j.micres.2018.05.010.
- Rojas, M.I., G.S. Cavalcanti, K. McNair, S. Benler, A.T. Alker, A.G. Cobián-Güemes, M. Giluso, K. Levi, F. Rohwer, B.A. Bailey, S. Beyhan, R.A. Edwards, N.J. Shikuma, 2020:** A Distinct Contractile Injection System Gene Cluster Found in a Majority of Healthy Adult Human Microbiomes. mSystems **5** (4), DOI: 10.1128/mSystems.00648-20.
- Scholl, D., 2017:** Phage Tail-Like Bacteriocins. Annual review of virology **4** (1), 453–467, DOI: 10.1146/annurev-virology-101416-041632.
- Shikuma, N.J., M. Pilhofer, G.L. Weiss, M.G. Hadfield, G.J. Jensen, D.K. Newman, 2014:** Marine tubeworm metamorphosis induced by arrays of bacterial phage tail-like structures. Science **343** (6170), 529–533, DOI: 10.1126/science.1246794.
- Smith, W.P.J., A. Vettiger, J. Winter, T. Ryser, L.E. Comstock, M. Basler, K.R. Foster, 2020:** The evolution of the type VI secretion system as a disintegration weapon. PLOS Biology **18** (5), e3000720, DOI: 10.1371/journal.pbio.3000720.
- Speare, L., M. Woo, A. K. Dunn, A. N. Septer, 2021:** A large lipoprotein mediates target specificity for T6SS-dependent killing, DOI: 10.1101/2021.04.26.440508.
- Steele, M.I., W.K. Kwong, M. Whiteley, N.A. Moran, 2017:** Diversification of Type VI Secretion System Toxins Reveals Ancient Antagonism among Bee Gut Microbes. mBio **8** (6), DOI: 10.1128/mBio.01630-17.
- Steele, M.I., E. V.S. Motta, T. Gattu, D. Martinez, N.A. Moran, 2021:** The Gut Microbiota Protects Bees from Invasion by a Bacterial Pathogen. Microbiology spectrum **9** (2), e0039421, DOI: 10.1128/Spectrum.00394-21.
- Taylor, N.M.I., N.S. Prokhorov, R.C. Guerrero-Ferreira, M.M. Shneider, C. Browning, K.N. Goldie, H. Stahlberg, P.G. Leiman, 2016:** Structure of the T4 baseplate and its function in triggering sheath contraction. Nature **533** (7603), 346–352, DOI: 10.1038/nature17971.
- Trunk, K., J. Peltier, Y.-C. Liu, B.D. Dill, L. Walker, N.A.R. Gow, M.J.R. Stark, J. Quinn, H. Strahl, M. Trost, S.J. Coulthurst, 2018:** The type VI secretion system deploys antifungal effectors against microbial competitors. Nature Microbiology **3** (8), 920–931, DOI: 10.1038/s41564-018-0191-x.
- Vacheron, J., C.M. Heiman, C. Keel, 2021:** Live cell dynamics of production, explosive release and killing activity of phage tail-like weapons for *Pseudomonas* kin exclusion. Communications biology **4** (1), 87, DOI: 10.1038/s42003-020-01581-1.
- Vacheron, J., M. Péchy-Tarr, S. Brochet, C.M. Heiman, M. Stojiljkovic, M. Maurhofer, C. Keel, 2019:** T6SS contributes to gut microbiome invasion and killing of an herbivorous pest insect by plant-beneficial *Pseudomonas protegens*. The ISME journal **13** (5), 1318–1329, DOI: 10.1038/s41396-019-0353-8.
- Vlisidou, I., A. Hapeshi, J.R. Healey, K. Smart, G. Yang, N.R. Waterfield, 2019:** *Photobacterium asymbiotica* virulence cassettes deliver protein effectors directly into target eukaryotic cells. eLife **8**, DOI: 10.7554/eLife.46259.
- Yang, G., A.J. Dowling, U. Gerike, R.H. French-Constant, N.R. Waterfield, 2006:** *Photobacterium* virulence cassettes confer injectable insecticidal activity against the wax moth. Journal of Bacteriology **188** (6), 2254–2261, DOI: 10.1128/JB.188.6.2254-2261.2006.
- Yao, G.W., I. Duarte, T.T. Le, L. Carmody, J.J. LiPuma, R. Young, C.F. Gonzalez, 2017:** A Broad-Host-Range Tailocin from *Burkholderia cenocepacia*. Applied and Environmental Microbiology **83** (10), DOI: 10.1128/AEM.03414-16.

Anna Moyses¹, Sarah Mottinger², Stephan Manhalter¹, Richard A. Gottsberger³

Erstnachweis des Eiparasitoiden *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) in Österreich (Hymenoptera: Scelionidae)

First report of the parasitoid wasp *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) in Austria (Hymenoptera: Scelionidae)

Affiliationen

¹Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Abteilung für Nachhaltigen Ackerbau, Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, Wien, Österreich.

²Insect Laboratories Research GmbH, Traiskirchen, Österreich.

³Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Abteilung für Molekularbiologische Diagnose von Pflanzenkrankheiten, Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, Wien, Österreich.

Kontaktanschrift

Dipl. Ing. Anna Moyses, Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, Abteilung für Nachhaltigen Ackerbau, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien, Österreich, E-Mail: anna.moyeses@ages.at

Zusammenfassung

Im Sommer 2021 wurden parasitierte Eigelege der Grünen Reisswanze *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758) in Wiener Privatgärten festgestellt. Die morphologischen und molekularbiologischen Untersuchungen ergaben, dass es sich um den Eiparasitoiden *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) handelt. Dies ist der erste Nachweis von *Trissolcus basalis* aus *Nezara viridula* Eigelegen in Österreich.

Stichwörter

***Trissolcus basalis*, *Nezara viridula*, *Solanum lycopersicum*, Eiparasitoid, Erstnachweis, Österreich**

Abstract

Trissolcus basalis (Wollaston, 1858) was recorded for the first time in Austria. The scelionid wasp parasitized egg masses of the southern green stink bug *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758), which were collected in private gardens in Vienna in summer 2021.

Keywords

***Trissolcus basalis*, *Nezara viridula*, *Solanum lycopersicum*, egg parasitoid, first report, Austria**

Einleitung

Parasitoide Wespen der Familie Scelionidae (Hymenoptera: Platygastroidea) gewinnen aufgrund ihrer Parasitierung von Eiern wichtiger landwirtschaftlicher Schadinsekten zuneh-

mend an Bedeutung für die biologische Schädlingsbekämpfung. *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) (Hymenoptera: Scelionidae) gehört zur *basalis*-Artengruppe der Gattung *Trissolcus* (Talamas et al., 2017) und ist ein solitärer Endoparasitoid von Pentatomiden mit einer vermutlich weltweiten Verbreitung (Jones, 1988, Balusu et al., 2019) (Abb. 1). Die Taxonomie der Überfamilie Platygastroidea wurde kürzlich überarbeitet, wobei die Scelionidae als gültige Familie bestätigt wurde (Chen et al., 2021).

T. basalis parasitiert als Generalist die Eier einer Vielzahl von Insekten. Der häufigste Wirt ist die Grüne Reisswanze *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758) (Hemiptera: Pentatomidae). Es handelt sich hierbei um eine nicht-heimische Wanzenart, welche sich in Österreich und anderen Mitteleuropäischen Ländern im vergangenen Jahrzehnt etabliert hat und aufgrund ihrer Polyphagie an zahlreichen Kulturpflanzen im Freiland und ge-



Abb. 1. Der Eiparasitoid *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) (Foto: Moyses, AGES).

schützten Anbau Schäden verursacht hat (Rabitsch, 2016a, Rabitsch, 2016b). *T. basalis* wurde zudem auch als Parasitoid der Marmorierten Baumwanze *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Pentatomidae) in den Vereinigten Staaten beschrieben (Balusu et al., 2019). Auch in einigen österreichischen Nachbarländern, u. a. in Italien, Slowenien, Deutschland und der Schweiz konnte *T. basalis* in *H. halys*-Eigelegen bereits mehrmals nachgewiesen werden (Zapponi et al., 2021, Dieckhoff et al., 2021, Rot et al., 2021). *H. halys* stammt ursprünglich aus Ostasien und wird in zahlreichen US-Staaten sowie in Süd- und Westeuropa als Schädling in Obst- und Gemüsekulturen eingestuft. Seit ihrem Erstauftreten in Österreich, hat sie sich hauptsächlich in städtischen Gebieten etabliert und verbreitet (Rabitsch & Friebe, 2015).

Die adulten und larvalen Tiere beider Wanzenarten verursachen durch die Saugtätigkeit vor allem an jungen Sprossen, Früchten und Samen Deformationen, lokale Verkorkungen und Fleckenbildung, was sowohl qualitative als auch quantitative Ertragsminderung zur Folge hat.

In Österreich wurden bislang noch keine wirtschaftlich relevanten Schäden an Freilandkulturen gemeldet, jedoch wurden Populationen von *N. viridula* bereits an *Glycine max* ((L.) Merrill, 1917) und *Oryza* sp. (Linnaeus, 1753) beobachtet. Auch an Gemüsekulturen im geschützten Anbau, wie *Cucumis* sp. (Linnaeus, 1753), *Solanum melongena* (Linnaeus, 1753) und *Solanum lycopersicum* (Linnaeus, 1753) trat sie in den vergangenen Jahren bereits negativ in Erscheinung. *H. halys* hingegen spielt im österreichischen Gemüseanbau noch eher eine untergeordnete Rolle und wurde bislang vorwiegend an Obstkulturen beobachtet.

Natürliche Gegenspieler, wie die parasitoiden Wespe *T. basalis*, können bei der biologischen Bekämpfung der invasiven Wanzenarten *N. viridula* und *H. halys* zum Einsatz kommen und diese in Kombination mit anderen Bekämpfungsansätzen, wie dem Einsatz von mechanischen Barrieren oder von Semiochemikalien in „attract & kill“- oder „push & pull“-Methoden, langfristig unter Kontrolle bringen (Conti et al., 2021). Derartige Erstnachweise sind besonders wertvoll, da sie nicht nur das Zulassungsverfahren und den Einsatz neuer Nützlinge als biologische Bekämpfungsmethode erleichtern, sondern auch eine Alternative zu breitenwirksamen Insektiziden bieten. Zudem zählen viele der parasitoiden Hymenoptera zu der sogenannten Dark Taxa. In Deutschland wird der Anteil der unerforschten parasitoiden Wespen an der gesamten Fauna auf 16 % geschätzt. Auch das aktuelle „Verbundprojekt GBOL – German Barcode of Life“ (GBOL III: Dark Taxa), in dem unter anderem das Wissen um die Dark Taxa der parasitoiden Hymenoptera erweitert werden soll, verweist auf die nicht zu unterschätzende Bedeutung dieser vielfältigen und „charismatischen“ Insekten für das Ökosystem (Rdusch & Peters, 2020).

Material und Methoden

Im Sommer 2021 wurde von der Arbeitsgruppe für Entomologie im Feld- und Gartenbau der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES GmbH Wien) ein Eigelege-Monitoring der invasiven Wanzenarten *Nezara*

viridula und *Halyomorpha halys* gestartet. Dabei wurde ein Aufruf gemacht, einen Wanzenbefall zu melden und gesichtete Eigelege zur Untersuchung auf Parasitoide an die AGES zu schicken. Eingesandte Eigelege wurden im Labor den jeweiligen Wanzenarten zugeordnet und auf Parasitierung überprüft. Parasitierte Eigelege wurden zur weiteren Untersuchung in einer Klimakammer unter Langtagbedingungen mit 16 Stunden Licht, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 %, einer Tagestemperatur von 25°C und einer Nachttemperatur von 15°C durchgezüchtet. Geschlüpfte Wespen wurden sowohl morphologisch (Johnson, 1984, Talamas et al., 2015, Peng & Gibson, 2020) als auch molekularbiologisch durch Barcoding des die Cytochrom Oxidase I kodierenden Gens (EPPO, 2021) auf die genaue Art bestimmt. Unvollständig entwickelte Wespen ohne Schlupferfolg wurden lediglich einer molekularbiologischen Untersuchung unterzogen.

Ergebnisse

Die Auswertung der insgesamt 170 Meldungen hat gezeigt, dass diese hauptsächlich von Privatpersonen mit Garten oder Balkon aus Wien, niederösterreichischen Gemeinden rund um Wien, dem Nordburgenland und aus Graz eingingen. Auffällig war, dass das Auftreten der *Nezara viridula* viermal häufiger gemeldet wurde als jenes der *Halyomorpha halys*. Am häufigsten wurde *N. viridula* an *Solanum lycopersicum* (Linnaeus, 1753), gefolgt von *Phaseolus vulgaris* (Linnaeus, 1758), *Cucumis* sp. (Linnaeus, 1753), *Capsicum* sp. (Linnaeus, 1753), *Rubus idaeus* (Linnaeus, 1753), *Helianthus* sp. (Linnaeus, 1753), *Lavandula* sp. (Linnaeus, 1753), *Rubus fruticosus* (Linnaeus, 1753), *Solanum melongena* (Linnaeus, 1753) und *Glycine max* ((L.) Merrill, 1917) beobachtet. Im Zuge des Monitorings konnten lediglich parasitierte Eigelege von *N. viridula* erhoben werden. Von den eingesandten *N. viridula* Eigelegen waren 20 von parasitoiden Wespen belegt (Abb. 2). Diese stammten von 15 Standorten, wovon sich 13 in acht Wiener Gemeindebezirken (1020, 1050, 1090, 1160, 1170, 1210, 1220, 1230), ein Standort in 2103 Langenzersdorf, Niederösterreich und ein Standort in 8262 Ilz, Steiermark befanden. Während in Langenzersdorf die Arten *Anastatus bifasciatus* (Geoffroy, 1785) und *Trissolcus belenus* (Walker, 1836) und in Ilz *Telenomus chloropus* (Thomson, 1861) fest-



Abb. 2. Teilweise parasitiertes *Nezara viridula* (Linnaeus, 1758) Eigelege mit dem Parasitoid *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) (Foto: Moyses, AGES).

gestellt wurden, dominierte in Wien, neben einem *Telenomus* sp. Fund in 1210 Wien, *Trissolcus basalus*. Dieses Ergebnis lässt vermuten, dass der Parasitoid *T. basalus* in Gebieten, in denen auch *N. viridula* stark vertreten ist, bereits weit verbreitet ist. Für Österreich ist dies der erste Nachweis von *T. basalus* aus *N. viridula* Eigelegen.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen am Monitoring beteiligten Personen für die zahlreichen Meldungen und Einsendungen des Untersuchungsmaterials.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren/die Autorinnen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- Balusu, R., E.J. Talamas, T. Cottrell, M. Toews, B. Blaauw, A. Sial, D. Buntin, H. Fadamiro, G. Tillman, 2019:** First record of *Trissolcus basalus* (Hymenoptera: Scelionidae) parasitizing *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in the United States. *Biodiversity Data Journal* **7**, 1-9, DOI: 10.3897/BDJ.7.e39247.
- Chen, H., Z. Lahey, E.J. Talamas, A.A. Valerio, O.A. Popovici, L. Musetti, H. Klompen, A. Polaszek, L. Masner, A.D. Austin, N.F. Johnson, 2021:** An integrated phylogenetic reassessment of the parasitoid superfamily Platygastridae (Hymenoptera: Proctotrupomorpha) results in a revised familial classification. *Systematic Entomology* **46** (4), 1088-1113, DOI:10.1111/syen.12511.
- Conti, E., A. Gonzalo, B. Barrett, F. Cingolani, S. Colazza, S. Guarino, K. Hoelmer, R.A. Laumann, L. Maistrello, G. Martel, E. Peri, C. Rodriguez-Saona, G. Rondoni, M. Rostás, P.F. Rovarsi, R.F.H. Sforza, L. Tavella, E. Wajnberg, 2021:** Biological control of invasive stink bugs: review of global state and future prospects. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **169** (1), 28-51, DOI: 10.1111/eea.12967.
- Dieckhoff, C., S. Wenz, M. Renninger, A. Reißig, H. Rauleder, C.P.W. Zebitz, J. Reetz, O. Zimmermann, 2021:** Add Germany to the List—Adventive Population of *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera: Scelionidae) Emerges in Germany. *Insects* **12** (5), 414, DOI: 10.3390/insects12050414.
- EPPO 2021:** PM 7/129 (2) DNA barcoding as an identification tool for a number of regulated pests. *EPPO Bulletin*, **51** 100-143, DOI: 10.1111/epp.12724.
- Johnson, N.F., 1984:** Systematics of Nearctic Telenomus: Classification and Revisions of the Podisi and Phymatae Species Groups (Hymenoptera: Scelionidae). *Bulletin of the Ohio Biological Survey* **6** (3), 1-113, DOI: 10.5281/zenodo.23887.
- Jones, W.A., 1988:** World review of the parasitoids of the southern green stinkbug, *Nezara viridula* (L.) (Heteroptera: Pentatomidae). *Annals of the Entomological Society of America* **81**, 262-273, DOI: 10.1093/aesa/81.2.262.
- Peng, B., G.A. Gibson, 2020:** Review of the species of *Anastatus* (Hymenoptera: Eupelmidae) known from China, with description of two new species with brachypterous females. *Zootaxa* **4767** (3), 351-401, DOI: 10.11646/zootaxa.4767.3.1.
- Rabitsch, W., G.J., Friebe, 2015:** From the west and from the east? First records of *Halyomorpha halys* (Stål, 1855) (Hemiptera: Heteroptera: Pentatomidae) in Vorarlberg and Vienna, Austria. *Beiträge zur Entomofaunistik* **16**, 126-129.
- Rabitsch, W., 2016a:** Beitrag zur Kenntnis der Wanzenfauna Vorarlbergs (Insecta: Hemiptera: Heteroptera). *Joannea Zoologie* **15**, 127-159. URL: https://www.zobodat.at/pdf/Joannea_Zoo_15_0127-0159.pdf.
- Rabitsch, W., 2016b:** Notizen zur Wanzenfauna (Hemiptera: Heteroptera) von Wien, mit fünf Neufunden für Österreich. *Beiträge zur Entomofaunistik* **17**, 39-54. URL: https://www.zobodat.at/pdf/BEF_17_0039-0054.pdf.
- Rdych, V., R.S. Peters, 2020:** GBOL III: Dark Taxa – die dritte Phase der German Barcode of Life Initiative hat begonnen. *Koenigiana* **14** (2), 91-107, ISSN 2627-0005.
- Rot, M., L. Maistrello, E. Costi, I. Bernardinelli, G. Malossini, L. Benvenuto, S. Trdan, 2021:** Native and Non-Native Egg Parasitoids Associated with Brown Marmorated Stink Bug (*Halyomorpha halys* [Stål, 1855]; Hemiptera: Pentatomidae) in Western Slovenia. *Insects* **12** (6), 505. DOI: 10.3390/insects12060505.
- Talamas, E.J., N.F. Johnson, M. Buffington, 2015:** Key to Nearctic species of *Trissolcus* Ashmead (Hymenoptera, Scelionidae), natural enemies of native and invasive stink bugs (Hemiptera, Pentatomidae). *Journal of Hymenoptera Research* **43**, 45-110, DOI: 10.3897/jhr.43.8560.
- Talamas, E., J., Buffington, M., L., Hoelmer, K., 2017:** Revision of Palearctic *Trissolcus* Ashmead (Hymenoptera, Scelionidae). In: Talamas E., J., M.L. Buffington (Hrsg.) *Advances in the systematics of Platygastridae*. *Journal of Hymenoptera Research* **56**, 3-85, DOI: 10.3897/jhr.56.10158.
- Zapponi, L., F. Tortorici, G. Anfora, S. Bardella, M. Bariselli, L. Benvenuto, I. Bernardinelli, A. Butturini, S. Caruso, R. Colla, E. Costi, P. Culatti, E. Di Bella, M. Falagiarda, L. Giovannini, T. Haye, L. Maistrello, G. Malossini, C. Marazzi, L. Marianelli, A. Mele, L. Michelon, S.T. Moraglio, A. Pozzebon, M. Preti, M. Salvetti, D. Scaccini, S. Schmidt, D. Szalatnay, P.F. Rovarsi, L. Tavella, M.G. Tommasini, G. Vaccari, P. Zandigiacomo, G. Sabbatini-Peverieri, 2021:** Assessing the Distribution of Exotic Egg Parasitoids of *Halyomorpha halys* in Europe with a Large-Scale Monitoring Program. *Insects* **12** (4), 316, DOI: 10.3390/insects12040316.

Aus dem JKI Newsletter

Interessiert? Den aktuellen Newsletter finden Sie hier:

<https://www.julius-kuehn.de/newsletter-des-jki/>

Um weiter auf dem Laufenden zu bleiben, können Sie dort auch den Newsletter direkt abonnieren.

Aktuelles



Konzept für Pflanz
ausgezeichnet
Das gemeinsam mit der
Konzept des JKI wurde in
gezeichnet. Unter den
ierarbeiten aber auch z
lschaft (DLG) mit einen
r Presseinformation: K
n Video der Preisverlei
w.agritechnica.com/en

Aus der Forschung Projektstarts



Auf der Suche nach der Feuerbrandresistenz b

Die von *Erwinia amylovora* hervorgerufene Bakterios im Birnenanbau in Deutschland dar. Alle angebauten weshalb ein Befall in einzelnen Jahren zur Rodung ganzer Anlagen tunnen kann. Ein Projekt des JKI mit internationalen Partnern aus Wirtschaft und Forschung soll Impulse für Züchtungsprogramme widerstandsfähiger neuer Birnensorten liefern. Dazu werden die genetischen Ressourcen bei Birne und Pyrus-Wildarten daraufhin untersucht, ob sie Resistenzen gegen Feuerbrand tragen, welche Gene an der Krankheitsabwehr beteiligt sind und wie diese vererbt werden. Die Ergebnisse tragen dazu bei, die Züchtung neuer Feuerbrandresistenter Sorten zu beschleunigen.

[Link zur Meldung: Forschungsallianz will Birne ...](#)

Im Gespräch



mit dem neu berufenen Leiter des JKI-Fachinstituts für Züchtungsgartenbaulichen Kulturen in Quedlinburg, Dr. Frank Marthe
[Link zum Interview](#)

Aus der Forschung Publikationen

Kandidatengene für die Steuerung der Winterknosp

Aufgrund der Klimaerwärmung blühen Apfelbäume heute 10-15 Tage vor 50 Jahren. In dem Zeitraum gibt es jedoch häufig Nachtfröste, die zu Schäden führen können. Dieses Risiko kann durch eine gezielte Züchtung an den Klimawandel stark reduziert werden. Das JKI zeigt in einer Studie von Kandidatengenen für die Regulation der Knospenruhe. Von September bis April. Aufgrund der langen und dichten Probepflanzen gebildet werden, die zu unterschiedlichen Phasen der Winterknospenruhe wurden Gene identifiziert, deren Expression signifikant mit dem Klimawandel korreliert. *Frontiers in Plant Science*, doi.org/10.3389/fpls.2023.1121212

Journal für Kulturpflanzen

Journal of Cultivated Plants

Inhalt: Band 74 (03-04). S. 33-96, 2022, ISSN 1867-0911, eISSN: 1867-0938
Themenheft „Zukünftige Wege des Pflanzenschutzes gegen Schadinsekten“

Torsten Meiners, Torsten Will

Zurück in die Zukunft ins Auenland? _____ 33

Niklas Stukenberg, Jan-Uwe Niemann

Anlocken, Verwirren, Abwehren: Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und Möglichkeiten der optischen Manipulation von Schadinsekten

Attract, confuse, repel: Basics of visual perception and possibilities of optical manipulation of insect pests _____ 36

Jan-Uwe Niemann, Max Messen, Hans-Michael Poehling

Reducing initial aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films

Reduzierung des Initialbefalls durch Aphiden unter Nutzung von gefärbten Mulchfolien und neu entwickelten bioabbaubaren Sprühfilmen _____ 49

Astrid Eben, Christine Dieckhoff, Olaf Zimmermann, Bianca Boehnke, Heidrun Vogt, Annette Herz, Kirsten Köppler

Ausgewählte schädliche Neozoen im Obstbau – Überblick zur Situation und aktuellen Forschungsvorhaben zur Kirschessigfliege und invasiven Stinkwanzen

Selected invasive pests in fruiticulture – overview of the current situation and ongoing research projects on spotted wing drosophila and stink bugs _____ 63

Aline Koch, Georg Petschenka

Exogene Anwendung von RNA zur umweltfreundlichen Bekämpfung von Schadinsekten

Exogenous application of RNA for the eco-friendly control of insect pests _____ 75

Yvonne Becker, Sascha Patz, Stephanie Werner, Björn Hoppe, Stephanie Feltgen, Beatrice Berger, Adam Schikora, René Glenz, Stephan König, Silvio Erler, Gritta Schrader, Daniel Huson, Matthias Becker

Bacteria producing contractile phage tail-like particles (CPTPs) are promising alternatives to conventional pesticides

Bakterien, die kontraktile Phagenderivate produzieren, sind vielversprechende Alternativen zu konventionellen Pflanzenschutzmitteln _____ 85

Kurzmitteilung

Anna Moyses, Sarah Mottinger, Stephan Manhalter, Richard A. Gottsberger

Erstnachweis des Eiparasitoiden *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) in Österreich (Hymenoptera: Scelionidae)

First report of the parasitoid wasp *Trissolcus basalis* (Wollaston, 1858) in Austria (Hymenoptera: Scelionidae) _____ 94

Unser Titelbild:

Zukünftige Wege des Pflanzenschutzes gegen Schadinsekten nutzen neue Anbauverfahren, Züchtungen, Techniken, biologische Kontrollmaßnahmen und Pflanzenschutzmittel in diversifizierten Systemen und berücksichtigen die Förderung der Pflanzen- und Insektenvielfalt in der Agrarlandschaft. Foto: jean wimmerlin auf Unsplash (<https://unsplash.com/@jwimmerli>). Lizenz: <https://unsplash.com/license>.