

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 Pflanzenschutzmittelmengen 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.
- Legarra, 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.
- Legarra, 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.
- Legarra, 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.
- Vaishapayan, 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.