

**Optische Manipulation der visuellen
Wahrnehmung von Weißen Fliegen und
Blattläusen zur Reduzierung des
Initialbefalls von gartenbaulichen
Kulturpflanzen**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades
Doktor der Gartenbauwissenschaften (Dr. rer. hort.)

genehmigte Dissertation
von
Jan-Uwe Niemann, M. Sc.

2023

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Dr. rer. hort habil Hans-Michael Poehling

Korreferent: Prof. Dr. rer. hort. Edgar Maiß

Tag der Promotion 14.07.2023

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 Zuflugrate in den Pflanzenbestand 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 und Verwirrungstechniken 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.

Im Gewächshaus wurden Versuche zur optischen Manipulation von von verschiedenen Arten von Aphiden (Blattläusen) und Aleurodida (Weiße Fliegen) durchgeführt. Im ersten Versuch sollten zwei verschiedene Arten der Weißen Fliegen, die sich in Wirtspflanzenpräferenz und Wirtswahlverhalten unterscheiden, *Trialeurodes vaporariorum* und *Aleyrodes proletella*, mit weißen und grünen Folien in ihrem Verhalten zu manipulieren. Weiße Folie unter den Pflanzen zeigte für *T. vaporariorum* einen signifikanten Einfluss auf die Landehäufigkeit, bei *A. proletella* war der Effekt weniger stark ausgeprägt. Der These, dass die Reflektion im blauen Bereich für diesen repellenten Effekt verantwortlich sei, wurde in einem späteren Versuch mit LEDs nachgegangen. Die grüne Folie, die die Pflanzen optisch maskieren sollte, hat auch einen Effekt gezeigt, dieser war jedoch nicht ausreichend für eine praktische Anwendung der Methode im Feld.

In Feldversuchen mit der Modellkultur Salat wurden verschiedene schwarze/grau und grüne Folien untersucht. In den Versuchen wurden kommerziell erhältliche Polyethylenfolien mit den selbstentwickelten Sprühfolien verglichen. Als Kontrolle diente der offene Boden. Die schwarzen Folien zeigten einen hochsignifikanten Einfluss auf die Zuflugrate von *Nasonovia ribisnigri*. Die grünen Folien boten hingegen im Freilandversuch keinen effektiven Schutzmechanismus, der den Zuflug ausreichend begrenzen konnte.

Die selbstentwickelte Sprühfolie zeigte technische Probleme, die in einem geplanten Folgeprojekt gelöst werden sollen. Hier werden auch Kombinationen der Mulchabdeckung mit weiteren Maßnahmen des Integrierten Pflanzenschutzes zu einem Gesamtsystem untersucht werden.

Um zu prüfen, ob der in der Literatur beschriebene Blau-Grün Antagonismus auch direkt im Pflanzenschutz nutzbar ist, wurden Gewächshausversuche mit blauen LEDs durchgeführt. Die im Versuch genutzte Anlage strahlte direkt aus dem Bestand. Die Versuche zeigten, dass der Einfluss der Anlage auf *T. vaporariorum* signifikant den Befall senken konnte, bei *N. ribisnigri* war der Effekt deutlich weniger stark ausgeprägt, aber auch die Rückfangquote der Tiere deutlich geringer.

Aus den Versuchen und weiteren Literaturrecherchen wurde abschließend ein Übersichtsartikel verfasst, der die optische Manipulation und die zugrundeliegende visuelle Ökologie der Schadinsekten miteinander verknüpft und einen allgemeinen Überblick zum Stand der Forschung und Einführung in das Thema liefert.

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 underlying basis for this is 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.

Various experiments were carried out in the greenhouse on the optical manipulation of different aphid and whitefly species. In the first experiment, the behaviour of two different whitefly species, *Trialeurodes vaporariorum* and *Aleyrodes proletella*, was manipulated using white and green films. White film as mulch under the plants had a significant influence on the landing frequency of *T. vaporariorum*, while the effect was less strong for *A. proletella*. The hypothesis that the reflection in the blue area was responsible for this repellent effect was investigated in a later experiment with LEDs. The green foil, which was supposed to optically mask the plants, also showed an effect, but this was not sufficient for a practical application of the method in the field.

In field trials with the model crop lettuce, different black/grey and green films were investigated. In the trials, commercially available polyethylene films were compared with self-developed spray films. The open soil served as a control. The black films showed a highly significant influence on the influx rate of *Nasonovia ribisnigri*. The green films did not show an effective protective mechanism that could sufficiently limit the influx, even in the field trial.

The self-developed spray film showed technical problems that are to be solved in a forthcoming follow-up project. Here, combinations of the mulch cover with other measures of integrated pest management to form an overall system are also to be investigated.

In order to test whether the blue-green antagonism described in the literature can also be used directly in crop protection, greenhouse trials were carried out with blue LEDs. The system used in the trial emitted light directly from the crop. The trials showed that the influence of the system on *T. vaporariorum* was able to significantly reduce infestation; for *N. ribisnigri*, the effect was significantly less pronounced, but also the recapture rate of the animals was significantly lower.

From the experiments and further literature research, a review article was finally written that links the optical manipulation and the underlying visual ecology of the insect pests and provides a general overview of the state of research and introduction to the topic.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	3
ABSTRACT	4
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
TABELLENVERZEICHNIS	6
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1. Einführung in das Thema.....	8
1.1. Hintergrund und grundsätzlicher Forschungsansatz im Hinblick auf die optische Manipulation als integrierte Methode zum Pflanzenschutz	8
1.2. Möglichkeiten der optischen Manipulation von Insekten durch optische Systeme..	10
1.3. Stukenberg, N; Niemann, J-U (2022): Anlocken, Verwirren, Abwehren: Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und Möglichkeiten der optischen Manipulation von Schadinsekten	14
1.4. Optische Manipulation der visuellen Wahrnehmung von Weißen Fliegen und Blattläusen zur Nutzung in Systemen zum Integrierten Pflanzenschutz	28
1.5. Versuchsorganismen	30
1.5.1. Die Grüne Salatblattlaus <i>Nasonovia ribisnigri</i>	30
1.5.2. Die Gewächshausmottenschildlaus <i>Trialeurodes vaporariorum</i>	34
1.5.3. Die Kohlmottenschildlaus <i>Aleyrodes proletella</i>	35
2. Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2021): Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils.....	36
3. Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2022): Reducing initial aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films.....	49
4. Niemann, J-U; Poehling, H-M (2022): Effect of narrow-banded blue LED device on host plant settlement by greenhouse whitefly and currant-lettuce aphid	57
5. Diskussion und Ausblick.....	67
5.1. Der Effekt der „optische Barriere“ im Versuch.....	67
5.2. Effekt des Hintergrundes und der Oberflächenstruktur	69
5.3. Kritische Versuchsstruktur Freilandversuch	69
5.4. Anwendung und Probleme der entwickelten Sprühfolie.....	70
5.5. Die offene Zucht als ergänzende Maßnahme für ein IPM System.....	70
5.6. LEDs als optische Systeme für Schutz vor Schadinsekten und deren potentielle praktische Nutzung.....	71
5.7. Gesamtfazit.....	71
6. Referenzen	73
6.1. Literaturverzeichnis	73
8. Publikationen	80
9. Lebenslauf.....	81

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Lebenszyklus von <i>Nasonovia ribisnigri</i> (verändert nach McDougall and Creek 2007).....	31
-----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Deutscher und Lateinischer Name der Versuchspflanzen und Befallsstärke bei Besatz mit <i>Nasonovia ribisnigri</i>	32
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzungen in den publizierten Artikeln sind dort erklärt!

BLE = Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung

BMEL = Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2013-aktuell)

BMELV = Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2005-2013)

BMJ = Bundesministerium der Justiz

CaMV = Cauliflower mosaic virus

CMV = Cucumber mosaic virus

EG = Europäische Gemeinschaft

engl. = Englisch (im Sinne von „im Englischen“)

EU = Europäische Union

FNR = Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe

GVBD = Gooseberry vein-banding disease

IPS = Integrierter Pflanzenschutz (engl. integrated pest management - IPM)

L. = Linnaeus

LED = Licht emittierende Diode (light emitting diode)

LMV = Lettuce mosaic virus

NAP = Nationaler Aktionsplan Pflanzenschutz

NaWaRos = Nachwachsende Rohstoffe

nm = Nanometer (10^{-9} Meter)

PflSchG = Pflanzenschutzgesetz, Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen

ssp. = Subspezies (Unterart)

UV = Ultraviolett, spektraler Bereich von 100 nm bis 380 nm

var. = variety (Kultursorte)

1. Einführung in das Thema

1.1. Hintergrund und grundsätzlicher Forschungsansatz im Hinblick auf die optische Manipulation als integrierte Methode zum Pflanzenschutz

Der Schutz von Kulturpflanzen vor Schadinsekten ist eine notwendige Maßnahme, um die hohen Qualitäts- und Quantitätsansprüche an gartenbauliche Produkte zu erfüllen. Durch die zunehmende Nachfrage nach Frischgemüse, das ohne den Einsatz chemischer Insektizide produziert wird, und Einschränkung von verfügbaren chemischen Wirkstoffen durch Handel und Gesetze ist dem Integrierten Pflanzenschutz (IPS) in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit entgegengebracht worden. Der integrierte Pflanzenschutz in der Europäischen Union (EU) wird basierend auf der Europäischen Pflanzenschutz-Rahmenrichtlinie 2009/128/EG in den Mitgliedsstaaten in nationale Aktionspläne umgesetzt. In Deutschland sind die Grundsätze und ihre Einhaltung als Teil der „guten fachlichen Praxis“ im §3 im Pflanzenschutzgesetz (Bundesministerium der Justiz 2012) verankert und für alle Anwender von Pflanzenschutzmitteln verbindlich (BMEL 2022). Die Umsetzung und die Weiterentwicklung des IPS ist auch Teil des Nationalen Aktionsplans Pflanzenschutz (NAP) des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV, heute BMEL) (BMEL 2017). Der integrierte Pflanzenschutz ist nach der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (BMEL 2023a) wie folgt definiert:

„Der integrierte Pflanzenschutz ist eine Kombination von Verfahren, bei denen unter vorrangiger Berücksichtigung biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer sowie anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen die Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß begrenzt wird.“

Es heißt weiter: „Das **notwendige Maß** bei der Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln beschreibt die Intensität der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln, die notwendig ist, um den Anbau der Kulturpflanzen, besonders auch vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit, zu sichern. Dabei wird vorausgesetzt, dass alle anderen praktikablen Möglichkeiten zur Abwehr und Bekämpfung von Schadorganismen ausgeschöpft und die Belange des Verbraucher- und

Umweltschutzes sowie des Anwenderschutzes ausreichend berücksichtigt werden.“ (Punkt 6.1.4 des NAP vom 10. April 2013).

In der vorliegenden Forschungsarbeit geht es um die optische Manipulation der visuellen Wahrnehmung von Schadinsekten. Es handelt sich damit um eine physikalische Maßnahme des IPS (BMEL 2023b). Physikalische Maßnahmen und speziell optische Methoden bieten folgende Vorteile (Weintraub und Berlinger 2004):

- Sehr geringe bis keine direkten Auswirkungen auf die Umwelt, Nicht-Zielorganismen werden vertrieben, nicht getötet;
- Keine Rückstände im Erntegut oder auf den Pflanzen;
- Keine Zulassung notwendig, keine Limitation der Applikationsintervalle;
- Keine Wartezeiten nach Applikation;
- Kompatibel mit fast allen anderen Methoden des Pflanzenschutzes (integrativ).

Die vergleichsweise seltene Anwendung in der Praxis ist damit zu begründen, dass optische Methoden, gerade im Freiland, von sich ändernden äußeren Faktoren abhängen, und selten Wirkungsgrade von chemischen Pflanzenschutzmitteln erreichen können. Dazu kommt, dass die Implementation eines integrierten Pflanzenschutzsystems deutlich mehr Zeit und Kompetenz erfordert. Da eine chemische Pflanzenschutzrüstung und die dementsprechende Kompetenz und Erfahrung auf jedem pflanzenbaulichen Betrieb vorhanden sind, ist es unter wirtschaftlichen Aspekten nur folgerichtig, dass ein Großteil der Betriebe, im erlaubten Umfang, den Fokus auf eine chemische Bekämpfung legt. Erst gesellschaftliche Veränderungen und daraus folgende strengere Gesetze zur Anwendung von Pflanzenschutzmitteln haben zur verstärkten Aufmerksamkeit für die sogenannten alternativen Pflanzenschutzmaßnahmen geführt und es ermöglicht die anfallenden Mehrkosten zu externalisieren (einzupreisen).

Ein Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist es herauszuarbeiten, welchen Beitrag optische Systeme, in diesem Fall farbige Folien und LEDs (Licht emittierende Dioden) zur Manipulation der visuellen Wahrnehmung von Schadinsekten in einem System zum Integrierten Pflanzenschutz leisten können. Der Fokus lag auf der Verringerung von Zuflug und Ansiedlung der in die Bestände einwandernden Schadinsekten, um die Populationszahlen schon in der initialen Befallsphase zu senken. Im Vordergrund standen die Arten *Nasonovia ribisnigri* (Mosley, 1841; Grüne Salatblattlaus) und *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood, 1856; Gewächshausweißfliege). Beide Arten

zeigen sehr hohe Vermehrungsraten im Feld und eine kryptische Lebensweise, die eine Bekämpfung mit chemischen Wirkstoffen stark erschwert. Zudem gibt es zahlreiche Nachweise für Resistenzbildung gegen insektizide Wirkstoffe (siehe 3.). Durch die hohen Vermehrungsraten werden aus relativ wenigen immigrierenden Individuen im Verlauf der Kultur große Populationen, die nur noch schwer kontrollierbar sind. Hier liegt der Ansatzpunkt der Methode: Durch die Reduktion des Zufluges und der Ansiedlung soll die Populationsdynamik im Verlauf der Kultur stark gedämpft werden.

1.2.Möglichkeiten der optischen Manipulation von Insekten durch optische Systeme

Es gibt verschiedene Ansätze und Methoden zur optischen Manipulation mit dem Ziel Schadinsekten von Kulturpflanzen fernzuhalten und/oder die Populationsdynamik im Bestand zu beeinflussen:

- Anlocken: z.B. Gelbtafeln, Blautafeln;
- Verwirren: z.B. UV-selektive Gewächshausfolien und Netze, (UV-)reflektierende Mulchfolien;
- Abwehren: z.B. blau emittierende LEDs, reflektierende Mulchmaterialien;
- Maskieren: z.B. Mulchkultur (lebend als Untersaat oder grünes Material, z.B. Folien) zur Angleichung des Kontrastes Pflanze-Hintergrund.

Mit einer Klebefläche versehene Gelb- und Blautafeln werden in der Praxis und der Forschung als Monitoringinstrument genutzt, um Befallsstärken von Schädlingen bis zu einem festgelegten Schwellenwert zu überwachen, bei dem dann mit biologischen oder chemischen Mitteln/Methoden eingegriffen wird. Gelbtafeln besitzen auch eine hohe, dem menschlichen Auge verborgene, Reflektion des grünen Spektralbereichs, der für viele herbivore Insekten anlockend (Pflanzenbestand) wirkt. Eine seltenere aber auch praktizierte Anwendungsvariante ist es die Fläche der Gelbtafeln (oder in diesen Fall auch gelbe Folienbahnen) deutlich zu vergrößern, um das Monitoringinstrument zu einem Bekämpfungsinstrument (Massenfang) zu machen (z.B. Lu et al. 2012). Auch Kombinationen von reflektierenden Farbtafeln mit strahlenden LEDs (Otieno et al. 2018; Castresana und Puhl 2016; Stukenberg et al. 2015) haben sich als effektiv erwiesen um die Fangquote zu verbessern. Farbige Tafeln, Karten und Folien zur Anlockung von Schadinsekten wurden in verschiedenen

Veröffentlichungen und Reviews beschrieben (Pinto-Zevallos und Vänninen 2013; Mani 2022), sind jedoch kein Teil dieser Forschungsarbeit.

UV-selektive Gewächshausfolien und Netze stören die Orientierung von Insekten, indem das Verhältnis von UV-Licht (100 nm bis 380 nm) zu den anderen Spektralbereichen (>380 nm) verändert wird. Dadurch wird insbesondere die Orientierung der Insekten im Distanzflug erschwert und sie meiden den UV-defizienten Bereich. Besonders in wärmeren Klimaten hat sich diese Technik für Folien- und Netzhäuser als befallsmindernd bewährt (Antignus et al. 2001; Antignus und Ben-Yakir 2004; Kumar und Poehling 2006; Legarrea et al. 2012a; Legarrea et al. 2012b; Legarrea et al. 2012c), auch für weitere Schaderreger wie z.B. Thripse (Kigathi und Poehling 2012; Díaz et al. 2006) oder spezialisierte Schädlinge (Blattläuse und Weiße Fliegen) an Kohlgewächsen (Gulidov und Poehling 2013). Für *N. ribisnigri* gibt es keine Untersuchungen zu diesem Thema bei anderen Blattläusen an Salat konnten im Versuch aber erfolgreich Immigration und Ausbreitung verringert werden (Díaz et al. 2006). Dies konnte auch für die Art *Myzus persicae* (Sulzer, 1776; Grüne Pfirsichblattlaus) gezeigt werden (Chyzik et al. 2003). Für *T. vaporariorum* wurde in verschiedenen Studien (Mutwiwa et al. 2005; Doukas und Payne 2007) gezeigt, dass die Insekten UV-defiziente Bereiche meiden.

Der direkte Befallsflug von herbivoren Insekten hingegen kann durch Mulchmaterialien, insbesondere Folien, manipuliert werden. Einerseits können reflektierende Materialien (z.B. UV, Blau) repellent wirken, andererseits können farbige Materialien, die den Kontrast von Pflanzen (Zielobjekt) zum Hintergrund (Boden) nivellieren, die gezielte Ansiedlung auf Pflanzen (Kontrastorientierung) beeinflussen.

Mulchfolien, die im kurzwelligen Lichtspektrum (<400 nm) vom Boden (Pflanzenbestand) aus reflektieren, können den Befallsflug unterbinden und Distanzflüge stimulieren. Das Problem ist, dass die in den Versuchen genutzten Materialien nur unzureichend beschrieben sind, als dass eine sichere Interpretation des Effektes möglich wäre. Da häufig silberne (auch als reflektierend, spiegelnd, metallisch oder Aluminium bezeichnet) Materialien genutzt werden, ist das reflektierte Spektrum in dieser Gruppe sicher nicht einheitlich, wird aber auch nur in wenigen Fällen angegeben (Csizinszky et al. 1995; Hommes et al. 2003; Summers et al. 2005). Es gibt wenige Versuche in denen spezifische UV-Reflektoren eingesetzt werden (Übersicht in Greer und Dole 2003). Für Weiße Fliegen und Blattläuse wird mit UV-

reflektierenden Materialien eigentlich immer eine Reduktion der zufliegenden Individuen erreicht (Adlerz und Everett 1968; Csizinszky et al. 1995; Summers et al. 2005), dieser Effekt ist aber nur bis Bestandesschluss stabil (Hommes et al. 2003). Bei diesem System sind aber immer alle potenziellen Schädlinge und Nützlinge einzubeziehen, so zeigte sich in Versuchen von Hommes et al (2003), dass der Kleine Kohlweißling (*Pieris rapae*, L.1758; Kleiner Kohlweißling) und andere Lepidopterenarten von UV-reflektierenden Folien angezogen werden und dazu die Zahl der Marienkäfer stark abnahm. Viele Untersuchungen zielen auf eine Verringerung der Virusverbreitung im Pflanzenbestand ab (Arbeiten von Summers et al. 2005; 2002; Nawrocka et al. 1975; Csizinszky et al. 1995). Da hierbei häufig die Virusverbreitung und nicht die Anzahl der Schädlinge bestimmt wurde, kommt hier ein weiterer Unsicherheitsfaktor dazu, da die Anzahl von virusbefallenen Pflanzen und die Anzahl an Schädlingen auf den Pflanzen nicht fest korreliert ist. Wenn das Ziel ist, wie in dieser Arbeit, den Initialbefall mit fliegenden Insekten zu verringern, können diese Arbeiten nur Tendenzen aufzeigen, die aber fast durchgehend auf einen befallsmindernden Effekt hindeuten.

Neben UV sind vor allem blaue Farbtöne von Mulchmaterialien für einzelne Arten von Herbivoren (z.B. Blattläuse, Weiße Fliegen) repellent. So zeigen die jüngeren Arbeiten von Stukenberg et al. (z.B. 2019; 2018b; 2020; 2018a; 2015) und Döring et al. (z.B. 2011; 2016; 2014; 2007) für verschiedene Insektenarten, dass die Attraktivität von Grün durch blaue Wellenlängen reduziert werden kann, also einen Blau-Grün-Antagonismus. Gerade bei breitbandig reflektierenden Mulchmaterialien könnte dieser Mechanismus für die befallssenkende Wirkung verantwortlich sein. Auf den Erkenntnissen zu dem Blau-Grün Antagonismus baut auch die Nutzung von blau emittierenden Lichtquellen auf, die im Pflanzenbestand etabliert vom Boden nach oben strahlen. Die erste Publikation zu diesem Thema findet sich in dieser Dissertationsschrift (siehe 4.).

Die bekannte Orientierung von Herbivoren in der pflanzennahen Befallssituation (Finch und Collier 2000) wird bei der Nutzung von grünen Mulchmaterialien oder Untersaaten zum relevanten Faktor (Döring und Chittka 2007; Döring 2014). Durch die grüne Pflanze und den grünen Hintergrund verschwimmt die Wirtspflanze vor den Augen der Insekten und kann so nicht gefunden werden. Der grundsätzliche Effekt, dass ein verringerter Kontrast zwischen Hintergrund und Ziel zu verringerter Wirtsfindung führt, ist jedoch von Döring et al. (2004) aufgezeigt worden. Die in der Praxis und Forschung

am häufigsten genutzte Variante ist der lebende grüne Mulch als Untersaat oder Mischkultur, die in dieser Forschungsarbeit nicht bearbeitet wurde. Zu diesem Thema sind verschiedene Arbeiten erschienen (z.B. Bhaskar et al. 2021) aber der optische Aspekt wird, mit wenigen Ausnahmen (z.B. Lehnhus 2001) nicht näher untersucht. Praktische Studien mit grünen Mulchfolien sind recht selten (Hommes et al. 2003; Jones und Chapman 1968) und neben den verschiedenen Versuchsansätzen, kommen noch weitere biotische und abiotische Faktoren dazu, die eine Interpretation der Ergebnisse erschweren.

In Versuch und Praxis stößt die Effizienz dieser Methode auch an Grenzen (Döring 2014), da ein Befall besonders im homogenen Bereich des Feldinneren beeinflusst wird aber Feldränder - wenn hier die Mulchmaterialien nicht deutlich über Bestandesgrenzen hinaus etabliert werden - doch besiedelt und damit eine generelle Immigration nur partiell reduziert wird.

Die grundsätzliche Idee, Insekten durch optische Methoden an der Wirtsfindung und -besiedlung zu hindern, ist schon häufig Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen gewesen und mehrere Reviews geben einen Überblick (Antignus 2000; Johansen et al. 2011; Shimoda und Honda 2013; Shimoda 2018; Döring und Chittka 2007; Döring 2014; Greer und Dole 2003). Ein grundsätzliches Problem ist, dass zwar empirische Daten zum Verhalten von Insekten in optisch manipulierten Umgebungen erhoben wurden, aber das Wissen über die zugrundeliegenden optischen Eigenschaften (Morphologie, Physiologie) der Zielorganismen und spezifischen Farbwahrnehmungen noch begrenzt ist, was die Interpretation für grundlegende Mechanismen erschwert. Auch wenn zu vielen Insektenarten Informationen zu Sehschärfe (z.B. Land 1997) und Farbsehen (z.B. Briscoe und Chittka 2001) vorliegen, sind die herbivoren Insekten diesbezüglich stark unterrepräsentiert. Nur zu wenigen Blattlausarten liegen Daten zu Augengröße, Auflösung der Sehschärfe (Döring und Spaethe 2009; Döring et al. 2011), dem Farbsehen (Döring und Chittka 2007; Kelber et al. 2003; Kelber und Osorio 2010) oder der spektralen Sensitivität (Kirchner et al. 2005; Hardie 1989) vor.

Der aktuelle Stand zu optischen Methoden der Manipulation von herbivoren Insekten soll mittels der folgenden Publikation zusammenfassend dargestellt und damit in die bearbeitete Forschungsthematik eingeführt werden.

**1.3. Stukenberg, N; Niemann, J-U (2022): Anlocken, Verwirren,
Abwehren: Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und
Möglichkeiten der optischen Manipulation von Schadinsekten**

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-

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 Blüthenrips, *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 Pfirsichblattlaus (*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 Farbweizen 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 Gesamtrefektion;
- 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 Farbflächen 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 Fotorezeptoradaptation, 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 Blaulichtreflexion 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; Legarra 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 Blüenthrrips 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 Acrylglasscheibe 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 repellerter 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 Nützlinge 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 Kulturschutznetze 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 Vectored 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. Fereres, 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. Fereres, 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. Fereres, 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-iki-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.
- 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.

1.4. Optische Manipulation der visuellen Wahrnehmung von Weißen Fliegen und Blattläusen zur Nutzung in Systemen zum Integrierten Pflanzenschutz

Die grundlegende Hypothese zu dem folgenden Versuchsprogramm war, dass für die Populationsdynamik der relevanten Schadinsekten in der Salatkultur insbesondere die Beeinflussung des initialen Zufluges von entscheidender Bedeutung ist, da sich bereits aus wenigen angesiedelten Individuen aufgrund der extremen Reproduktionsfähigkeit schnell schädigende Befallsdichten auch bei der relativ kurzen Kulturzeit entwickeln können. Notwendig sind also Maßnahmen, die vorbeugend wirken. Eingesetzt wurden primär, wie oben referiert, optische Maßnahmen zur Beeinflussung der Schadinsekten. Die Untersuchungen mit verschiedenen farbigen Folien erfolgten innerhalb des FNR Verbundvorhabens „Entwicklung einer biologisch abbaubaren, sprühfähigen Mulchfolie aus NaWaRos zur Steigerung der Nachhaltigkeit beim Integrierten Pflanzenschutz von intensiven gartenbaulichen Freilandkulturen“, als Teilvorhaben 1: Optimierung der optischen Eigenschaften, Parzellenversuche (Akronym: Spruehmulchfolie, FKZ 22008214). Die folgenden Publikationen konzentrieren sich primär auf den Folien- und Lichtaspekt. Es sollte an dieser Stelle allerdings auch erwähnt werden, dass in dem Projekt weitere ergänzende Maßnahmen integrativ geplant waren, die aber aus verschiedenen Gründen nicht mit ausreichender Tiefe bearbeitet werden konnten und daher in diese Arbeit nicht einbezogen wurden. Insbesondere wurden offene Zuchten in der Kultur als Maßnahme zur Erhöhung des Antagonistenpotentials als Ergänzung zu dem optischen System im Freiland untersucht. Die offene Zucht bestand aus einem Pflanzenmix und wurde gezielt mit Schädlingen infiziert, die die Kulturpflanze Salat nicht befallen. Diese Schädlinge bildeten die Grundlage für die Anlockung und Ansiedelung von Nützlingen aus dem Freiland (Poehling und Niemann 2019). Salatkulturen mit offener Zucht zeigten im Versuch auch ohne zusätzliche Ausbringung von Nützlingen einen signifikant geringeren Befall mit Aphiden. Eine Kombination des Ansatzes der offenen Zucht mit reflektierenden Mulchfolien, dem Fokus dieser Arbeit, war im Projektzeitraum aber nicht mehr möglich.

Weiterhin wurden im Rahmen dieser Arbeit (siehe unten) auch grundsätzliche Aspekte der Reaktion von Schadinsekten in der Salatkultur auf definierte Farbqualitäten mit Hilfe von exakt schmalbandigen LED-basierten Farben analysiert. Bei allen Versuchen

stand der Praxisbezug im Fokus, d.h. die Versuche wurden im Rahmen der Möglichkeiten so geplant, dass sie möglichst großen Praxisbezug aufwiesen und auch bewertet bezüglich ihres Potentials als interventive Maßnahmen im Integrierten Pflanzenschutz.

Als Modellpflanze diente aus mehreren Gründen der Eissalat (*Lactuca sativa* L.):

Der Anbau findet in mehreren Sätzen pro Jahr statt, was eine hohe Wiederholungsrate der Versuche ermöglicht. Weiterhin wird Salat schon heute in der Praxis in Folie kultiviert, was eine spätere Implementierung von farbigen Folien in der Praxis wahrscheinlicher macht, als bei Kulturen, bei denen Mulchkultur unüblich ist. Salat hat zudem für den Befall mit Insekten im Grunde genommen keine Schadschwelle: Wenn im Produkt Insektenbefall festgestellt wird, werden teilweise ganze Lieferungen vom Handel abgewiesen. Dieser hohe Standard bedingt auch einen verhältnismäßig häufigen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und alternative Maßnahmen bergen damit nicht nur ein ökonomisch relevantes Einsparpotenzial für chemische Insektizide, sondern sind auch für die Rückstandssituation bedeutend.

Im Folgenden werden die verschiedenen Ansätze der optischen Manipulation der visuellen Wahrnehmung von Schadinsekten für die Anwendung im Gewächshaus- und im Freilandanbau anhand von Publikationen vorgestellt.

Da im ersten Projektjahr Konzentration und Färbung der Sprühfolie noch nicht anwendungsreif entwickelt werden konnten, musste zunächst mit farbigen festen Folien gearbeitet werden. Da es im Handel keine undurchlässigen farbigen PE Folien gab, wurden PVC Folien genutzt, deren Reflektion unabhängig von dem Untergrund ist, auf dem sie liegen (siehe **2.**). Ein weiterer Vorteil dieser Folien war, dass sie eine RAL Normierung besitzen und die Farbe somit exakt replizierbar ist. Es wurden Versuche mit weißen Folien zur Verwirrung und mit grünen Folien, die die Pflanzen maskieren sollten, durchgeführt. Den signifikantesten Effekt hatten die weißen Folien auf *T. vaporariorum*. Es zeigte sich allerdings in der Weiterentwicklung der Sprühfolie, dass eine deckende Färbung in Weiß mit biologisch abbaubaren Materialien unter vertretbaren Kosten nur schwer möglich ist.

Für die folgenden Freilandversuche (**3.**) wurden dann grüne und silbergraue Folienlösungen zum Sprühen hergestellt. Die silbergrauen Sprühfolien und die schwarzen PE-Folien zeigten im Freilandversuch eine starke Reduktion des Zufluges von *N. ribisnigri*, auch wenn der Mechanismus dahinter noch unklar bleibt. Infrage

kämen hier Verwirrung und Abschreckung als präventive Mechanismen, die die Wirtsfindung behindern oder eine nach der Landung erfolgte Ablehnung des Wirtes (Wirtsakzeptanz) und Verlassen der Pflanze für einen erneuten Distanzflug.

Der Ansatz des dritten Versuchsprogrammes (4.) war es nachzuvollziehen, ob der „colour-opponent“ (Blau-Grün-Antagonismus) Mechanismus, der durch Stukenberg und Poehling (2019) aufgezeigt wurde, in einem praktischen Versuchsansatz für den Pflanzenschutz genutzt werden kann. Da Folien nicht relativ breit bezüglich der Spektralfarben reflektieren wurde die LED Technik genutzt, die es ermöglicht, Licht in einem sehr engbandigen Spektrum und zu ganz definierten Wellenlängen zu emittieren. Hierzu wurde eine patentierte Vorrichtung genutzt und mit den entsprechenden LEDs ausgestattet (Rakoski und Stukenberg 2019). Durch die Verfügbarkeit von geflügelten *N. ribisnigri* wurde diese Art in die Versuche einbezogen, um einen Vergleich zwischen Blattläusen und Weißen Fliegen ziehen zu können.

1.5. Versuchsorganismen

Im Folgenden werden die Versuchsinsekten, die in den drei folgenden Peer-Reviewed Veröffentlichungen untersucht wurden, kurz beschrieben. Der Fokus der Versuche war auf *N. ribisnigri* ausgerichtet, es gelang jedoch nur einmal geflügelte Individuen in der Zucht zu generieren. Aus diesem Grund wurde auch mit Weißen Fliegen gearbeitet, deren optische Orientierung der von Blattläusen stark ähnelt (Hardie 1989; Prokopy und Owens 1983)

1.5.1. Die Grüne Salatblattlaus *Nasonovia ribisnigri*

Nasonovia ribisnigri (Hemiptera: Aphididae) ist die im Salatanbau in Europa am häufigsten auftretende Blattlausart (Nebreda et al. 2004; Hommes et al. 2003; Reinink K., Dieleman F. L. 1993). Die Art wechselt ihre Wirtspflanzen, wobei sie im Herbst auf den Kulturpflanzen (Salat) und anderen krautigen Arten (Sekundärwirte) geflügelte Individuen bildet, die dann auf *Ribes* ssp. (Primärwirt) wechseln. Daher auch der synonyme Name „Große Johannisbeerblattlaus“ (engl. currant-lettuce aphid). Die Überwinterung erfolgt als Ei oder durch überlebende Individuen am Primärwirt. Im Frühling saugen die neu geborenen Nymphen an den Jungtrieben der Primärwirte und es entwickeln sich geflügelte Individuen. Diese wechseln dann auf die Sekundärwirte (holozyklischer Lebenszyklus), auf denen geschlechtslose Vermehrung

(Jungfernzeugung oder Parthenogenese) stattfindet. Im Herbst werden wieder geflügelte Individuen gebildet, die zum Primärwirt zurückwechseln (siehe **Abb.1**).

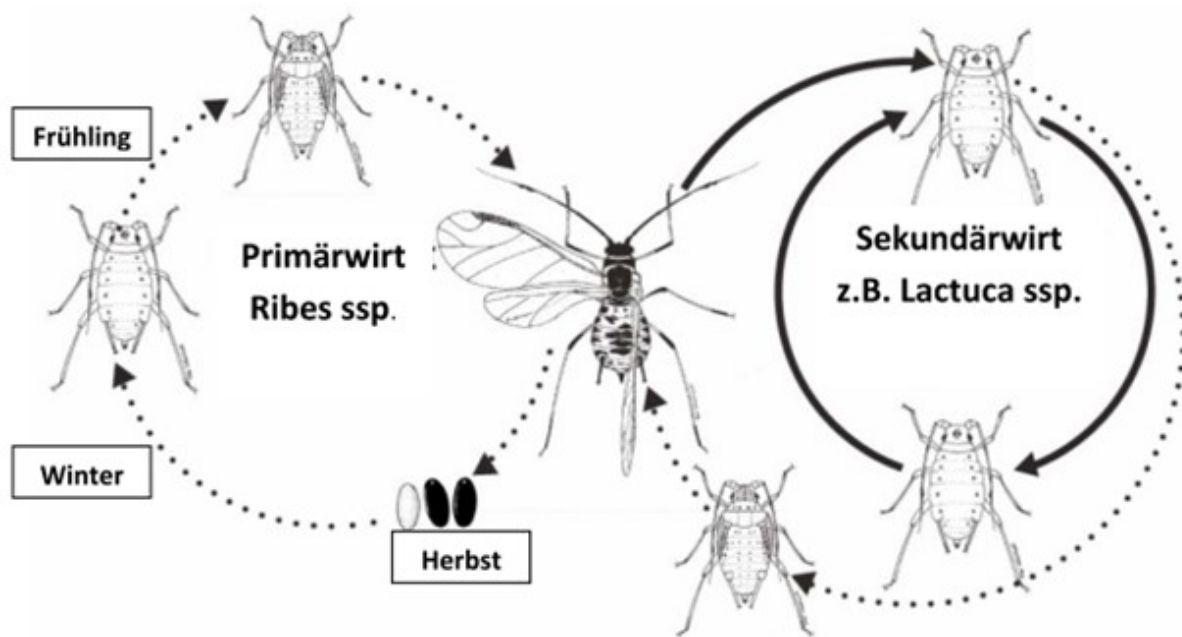


Abb. 1: Lebenszyklus von *Nasonovia ribisnigri* (verändert nach Mc Dougal und Creek 2011)

In warmen Klimaten und unter Zuchtbedingungen zeigt *N. ribisnigri* einen anholozyklischen Lebenszyklus und vermehrt sich dauerhaft geschlechtslos (Diaz et al. 2007). *N. ribisnigri* befällt nachweislich über 160 Pflanzenarten aus 15 Familien (Holman 2009), aber es können weit mehr sein. In der Zucht der Insekten zeigte sich vor allem ein Einfluss der Aufzucht bzw. Jungpflanzenentwicklung der potenziellen Wirtspflanzen auf die Möglichkeit eines Befalls durch *N. ribisnigri*. Alle 15 getesteten Pflanzenarten (siehe **Tab.1**), die unter Kunstlicht angezogen wurden, mit Ausnahme von Weizenkeimlingen (*Triticum L.*) und Rosenkohljungpflanzen (*Brassica oleracea* var. *gemmifera L.*), sind befallen worden.

Tab. 1: Deutscher und lateinische Bezeichnungen der Versuchspflanzen und Befallsstärke bei Besatz mit *Nasonovia ribisnigri*

Deutscher Name	Lateinischer Name	Befallsstärke
Petunien	<i>Petunia x hybrida</i>	Starker Befall, zur Zucht geeignet
Kornblume	<i>Centaurea cyanus</i>	Starker Befall
Koriander	<i>Coriandrum sativum</i>	Starker Befall
Phacelie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	Starker Befall
Lein	<i>Linum usitatissimum</i>	Starker Befall
Ringelblume	<i>Calendula officinalis</i>	Nur Befall von Gewächshauspflanzen
Buchweizen	<i>Fagopyrum esculentum</i>	Starker Befall
Dill	<i>Anethum graveolens</i>	Starker Befall
Perserklee	<i>Trifolium resupinatum</i>	Starker Befall
Steinkraut	<i>Lobularia maritima</i> (<i>Alyssum maritimum</i>)	Starker Befall
Weißer Gänsefuß	<i>Chenopodium album</i>	Nur Befall von Gewächshauspflanzen
Paprika	<i>Capsicum annuum</i>	Starker Befall von Jungpflanzen
Rosenkohl	<i>Brassica oleracea</i>	Kein Befall
Winterweizen	<i>Triticum aestivum</i>	Kein Befall

Die meisten Pflanzenarten wurden so massiv befallen, dass sie unter dem Befall zusammenbrachen. Für die beiden Arten *Chenopodium album* (L.) und *Calendula officinalis* (L.) wurden neben den Pflanzen, die unter Kunstlicht aufgewachsen waren, auch Pflanzen aus dem Freiland getestet. Diese Pflanzen der gleichen Art und aus denselben Herkunftten wurden aber nicht befallen. Dazu wurden die Salatpflanzen in der Insektenzucht, die unter Kunstlicht aufgezogen wurden, komplett befallen und nicht nur im Herzteil der Pflanze. Dies beides legt nahe, dass der Hauptgrund für den kryptischen Saugort der Aphiden im Inneren des Salatkopfes am dort weicheren (leicht glasigem) Gewebe liegt. Tiefergehende Untersuchungen hierzu waren im Projektrahmen und -zeitraum nicht möglich. Auf Versuche, geflügelte Individuen gezielt zu induzieren, reagierte *N. ribisnigri* nicht. Die Induktion wurde mit

...Trockenstress der Salatpflanzen;

...extrem hohen Besatzdichten von Blattläusen auf den Zuchtpflanzen;

...hohen Temperaturen in der Blattlauszucht;

...einer Blattlauszucht im geschützten Freiland;

...Marienkäfern (*Coccinella septempunctata*, L. 1758) als Stressfaktor;

ausprobiert, was nicht zum Erfolg führte. Aus diesem Grund wurden in den Gewächshausversuchen auch Arten der Kohlmottenschildläuse (Aleyrodidae) zur Untersuchung der Fragestellungen genutzt, da für die Versuche geflügelte Individuen unabdingbar waren.

Die Art *N. ribisnigri* wird vor allem mit dem Salat assoziiert, wo sie auch den größten wirtschaftlichen Schaden und die höchsten Kosten verursacht. Der Hauptschaden liegt in der Abgabe von Honigtau durch die Läuse und darauf wachsenden Pilzen, die eine Vermarktung der Salatköpfe verhindern. Der Salatmosaikvirus (LMV) wird durch *N. ribisnigri* nicht übertragen (Blackman und Eastop 2000; Nebreda et al. 2004), die Tiere sind aber Überträger des *Gooseberry vein-banding disease* (GVBD), *Cauliflower mosaic virus* (CaMV) und *cucumber mosaic virus* (CMV), die in wärmeren Klimaten hohe Relevanz haben können. Seit der Zucht und Markteinführung von *Nasonovia*-resistenten Salatsorten (Nr:0) Mitte der 90er Jahre war die Grüne Salatblattlaus zehn Jahre lang kein Problem mehr im Anbau von Kopfsalaten (van Helden 1995; van der Arend 2003). Im Jahr 2007 wurde in Nordeuropa eine immer größere Anzahl Populationen von *N. ribisnigri* festgestellt, die die vorhandene Resistenz (Nr:0) gegen diese Art gebrochen hatten. Die neue Form wird als Biotyp Nr:1 bezeichnet (Sauer-Kesper et al. 2011). Im Gegensatz zu anderen Blattläusen, die den Salat befallen, wie z.B. die Grünstreifige Kartoffellaus *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas, 1878) oder die Grüne Pfirsichblattlaus *M. persicae* befällt *N. ribisnigri* nicht die Unterseiten der Randblätter, sondern saugt an jungen Blättern im inneren des sich bildenden Salatkopfes. Bei Salatsorten mit geschlossenen Köpfen ist sowohl die Bekämpfung eingeschränkt und auch eine Reinigung der geschlossenen Köpfe zur Erne ist nicht möglich. Dies führt in vielen Fällen zur präventiven Nutzung von systemischen Pflanzenschutzmitteln (Barrière et al. 2014), welche aber vor dem Befall appliziert werden müssen, da sie nicht sofort wirken. Eine solche Strategie widerspricht aber wichtigen Grundsätzen des Integrierten Pflanzenschutzes, die eine Schaderregerdetektion und Dichtebewertung (Bekämpfungsschwelle) vor Bekämpfung fordern, ist aber im Vertragsanbau von Salat nicht zu vermeiden. Derartige präventive Maßnahmen mit insektiziden Wirkstoffen fördern auch Resistenzbildungen, was bereits durch zahlreiche Berichte zur Resistenz gegen einzelne insektizide Wirkstoffe belegt wird (Kift et al. 2004; Barber et al. 1999; Rufingier

et al. 1997; IRAC 2023) und eine integrative Bekämpfungsstrategie ist schon zur Vermeidung weiterer Resistenzbildungen absolut notwendig.

Bromley und Anderson (1982) zeigten in Versuchen mit elektrophysiologischen Aufnahmen, dass *N. ribisnigri* wenig spezifisch Geruchsstoffe unterscheiden kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Orientierung zum Wirt im Flug vor allem visuell stattfindet und olfaktorische Reize der Pflanze erst im Nahbereich der potenziellen Wirtspflanze eine Rolle spielen (Finch und Collier 2000). Bezüglich der optischen Orientierung wird von Analogien zu anderen untersuchten Blattlausarten ausgegangen. Ein Sensitivitätsspektrum ist bekannt für *M. persicae* (Kirchner et al. 2005), *Acyrtosiphon pisum* (Harris, 1776; Erbsenlaus)(Döring et al. 2011) und *Brevicoryne brassicae* (L., 1758, Mehligke Kohlblattlaus)(Döring und Kirchner 2007). Speziell für *N. ribisnigri* ist aber, wie für viele Aphidenarten, das optische System im Detail nicht beschrieben, weder die morphologische Struktur der Augen (z.B. Anzahl der Ommatidien pro Auge) noch liegen physiologische Untersuchungen zum Sensitivitätsspektrum oder ähnliche Untersuchungen vor. Ob die bekannten Arten hier als Vergleich ausreichen, müsste aber untersucht werden, da die bekannten Untersuchungen kein einheitliches Sensitivitätsspektrum aufzeigen.

1.5.2. Die Gewächshausmottenschildlaus *Trialeurodes vaporariorum*

Trialeurodes vaporariorum (Hemiptera: Aleyrodidae), die Gewächshausmottenschildlaus, oder auch häufig als Gewächshaus-Weiße-Fliege bezeichnet, ist in Deutschland vor allem in Gewächshauskulturen zu finden, tritt in wärmeren Klima aber auch im Freiland auf. Bei Befall werden die Eier an der Unterseite der Wirtspflanzenblätter abgelegt und entwickeln sich dort. Das erste Stadium ist eingeschränkt mobil, die weiteren Stadien sind sessil und von einer schützenden Wachsicht bedeckt. Die adulten Insekten zeigen eine versteckte Lebensweise auf der Unterseite der Blätter und sind sehr mobil, was eine chemische Bekämpfung erschwert und die Bildung von Resistenzen fördert, von deren Auftreten schon häufig berichtet wurde (Wardlow et al. 1976; Gorman et al. 2007; Gorman et al. 2002; Kapantaidaki et al. 2018; Pappas et al. 2013). *Trialeurodes vaporariorum* befällt über 800 Pflanzenarten aus 82 Familien und ist damit hoch polyphag. Der Hauptschaden entsteht auch hier durch die Exkretion von Honigtau, der wiederum sekundär Schadpilze, sog. Schwärzepilze, begünstigt die insbesondere die Photosyntheseleistung der Pflanzen beeinträchtigen. Im Salatanbau in Deutschland ist

T. vaporariorum kein bedeutender Schädling, kann aber in wärmeren Klimaten auch in dieser Kultur durch Massenvermehrung im Gewächshaus und durch die Übertragung von Viren (CABI 2022) große Schäden verursachen.

Für *T. vaporariorum* zeigten Vaishampayan et al. (1975a; 1975b) [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.](#), dass eine grundsätzliche olfaktorische Orientierung in Richtung Wirt möglich ist (Y-Olfaktometer). In weiteren Versuchen, unter Ausschluss der Wirtspflanzenvolatile wurde aber gezeigt, dass *T. vaporariorum* keine olfaktorischen Reize benötigt um die Wirtspflanzen zu finden. Auch hier ist die Theorie, dass olfaktorische Reize, im Zusammenspiel mit optischen und taktilen Reizen, vor allem nach dem Landen (Wirtsfindung) genutzt werden, um die Eignung der Pflanze näher zu testen (Wirtsakzeptanz). Da *T. vaporariorum* als Modellorganismus wegen ihres breiten Wirtsspektrums schon häufig Gegenstand von Untersuchungen war, liegen hier sowohl morphologische Daten (Mellor und Anderson 1995a, 1995b; Mellor et al. 1997), als auch Daten zu spektraler Sensitivität (Macdowall 1972), visuellem Verhalten (Coombe 1982) und wellenlängenspezifischem Verhalten (Coombe, 1981; Coombe 1981; Stukenberg und Poehling 2019) vor. Nachdem *T. vaporariorum* lange als dichromatisch angesehen wurde, zeigten Stukenberg und Poehling (2019) in Versuchen mit LEDs einen trichromatischen Mechanismus, wie auch für die Blattlaus *M. persicae* bekannt (Kirchner et al. 2005). Hierbei zeigte sich eine Sensitivität für UV-Licht, blaues und Grünes Licht. Die Präferenz für gelb über grün ergibt sich aus einem fehlenden Rotrezeptor und der Tatsache, dass gelbes Licht einen größeren Anteil „grüner“ Wellenlängen zwischen 500 nm und 550 nm aufzeigt, als grünes Licht selbst. Weiter wurde aufgezeigt, dass UV-Licht einen migratorischen Verhaltensreflex auslöst. Der aufgezeigte Blau-Grün Antagonismus, bei dem die Zugabe von blauem Licht zum Spektrum die Attraktivität potenzieller Wirte herabsetzt, kann für den Integrierten Pflanzenschutz genutzt werden (siehe 4.)

1.5.3. Die Kohlmottenschildlaus *Aleyrodes proletella*

Aleyrodes proletella (Hemiptera: Aleyrodidae), die Kohlmottenschildlaus ist in der Lage Pflanzenarten aus zwölf Familien zu befallen, tritt in Europa aber fast ausschließlich auf Asteraceae und Brassicaceae auf, wobei letztere deutlich bevorzugt werden (engl. cabbage whitefly). Befall und Entwicklung verlaufen grundsätzlich analog zu der von *T. vaporariorum* (siehe 1.5.2), auch *A. proletella* bevorzugt das gleiche kryptische Habitat unter den Blättern.

Für die Wirtsfindung dieser Art konnte, im Gegensatz zu anderen Arten der Aleyrodidae (van Lenteren und Noldus 1990) in Laborstudien am Y-Olfaktometer eine olfaktorische Orientierung zur Wirtspflanze gezeigt werden (Butler 1938) deswegen wurde sie im Versuch als Vertreter der Spezialisten dem Generalisten *T. vaporariorum* gegenübergestellt (siehe 2.). Die Facettenaugen sind geteilt (Mallock 1922), die Anzahl von 50 dorsalen und 40 ventralen Ommatidien je Auge lässt auf eine Sehfähigkeit ähnlich der von *T. vaporariorum*, mit 54 Ommatidien dorsal und 30 ventral je Seite, schließen (Mellor et al. 1997). Sowohl die Möglichkeit der olfaktorischen Orientierung zum Wirt hin, als auch eine verringerte Reaktion auf farbig reflektierende Folien im direkten Vergleich (siehe 2.) lassen aber auf einen Unterschied im optischen Verhalten von *T. vaporariorum* und *A. proletella* schließen. Ob dies morphologisch begründet ist oder eine unterschiedliche Reaktion auf den gleichen Reiz, kann mit den bekannten Informationen nicht bestimmt werden.

2. Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2021): Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils



Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils

Jan-Uwe Niemann¹ · Max Menssen² · Hans-Michael Poehling¹

Received: 24 January 2020 / Accepted: 8 October 2020 / Published online: 19 October 2020
© The Author(s) 2020

Abstract

Whiteflies are major pests on several vegetable and ornamental crops. Landing behaviour is strongly influenced by wavelength (nm) of reflected light from ground and surrounding vegetation. This paper deals with manipulation of whitefly landing behaviour in semi-field greenhouse experiments using background foils, either white foils with high reflection of short wavelength radiation or green foils reducing contrast between target plants and background (soil). The reactions of two different whitefly species were compared to detect possible differences between specialist (*Aleyrodes proletella*) and generalist (*Trialeurodes vaporariorum*) species. Dual-choice experiments were performed in a greenhouse using ice-lettuce, *Lactuca sativa* var. capitata (*T. vaporariorum*) and broccoli, *brassica oleracea* var. Italica P (*A. proletella*) as model plants. The results show strong impact of the white reflective foil in controlling landing behaviour of both species, whereas the effect of the contrast-minimising foil was much lower. Light influence was stronger on generalist than on specialist species. Mechanisms behind these effects and opportunities for inclusion in an integrated pest management strategy are discussed.

Keywords Contrast minimising · Manipulating insect behaviour · Integrated pest management · Wavelength specific behaviour · Colour opponent mechanism · Plant protection

Introduction

Whiteflies are important pests in vegetables and ornamental plants (Byrne et al. 1990). *Aleyrodes proletella* L., the cabbage whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae), represents this pest group specialised in Brassicaceae (in Europe). It is able to infest plants within 12 families (Mound and Halsey 1978), but in agriculture it is mostly found on Asteraceae and Brassicaceae (de Barro and Carver 1997; Martin 1999; Chen et al. 2007), with preference for broccoli, cauliflower and kale. *Trialeurodes vaporariorum* W., the greenhouse whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae), is very polyphagous and infests over 82 plant families including about 800 species (Mound and Halsey 1978). It is a serious pest in protected

cultivation systems in Europe but also in field crops in warmer climates. Whitefly infestation of open fields starts mostly at field edges (Horowitz and Ishaaya 1996; Collins 2016). Due to this hidden and protected lifestyle, chemical control is primarily effective using systemic insecticides; however, reports of insecticide resistance are numerous (Gorman et al. 2001, 2007; Luo et al. 2010; Springate and Colvin 2012). Biological control of whiteflies using natural enemies in protected cultivation systems is well established. However, under field conditions the efficacy of beneficial insects is often reduced and unreliable and the cost–benefit ratio is not reliable. Regarding the population dynamics of whiteflies, a key factor for all biological control measures is the early suppression of alighting and settlement; hence, biotechnical measures influencing host finding and settlement as discussed here could be an interesting alternative. Restrictions in plant protection law and public demands for pesticide-free products require a minimisation of the use of chemical agents.

✉ Jan-Uwe Niemann
niemann@ipp.uni-hannover.de

¹ Section Phytomedicine, Institute of Horticultural Production Systems, Leibniz-Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Germany

² Section Biostatistics, Institute of Cell Biology and Biophysics, Leibniz-Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Germany

Host plant orientation of whiteflies

Distance orientation of whiteflies as well as descending flight and landing behaviour is well known to be mainly triggered by colours, in particular yellow, which is also the reason for whitefly trapping approaches with yellow traps (Vaishampayan et al. 1975b; Noldus and Van Lenteren, 1991; Döring and Chittka 2007; Shimoda and Honda 2013). Recently, the visual behaviour of the greenhouse whitefly was studied more in detail by Stukenberg and Poehling (2019), Stukenberg (2018), and Stukenberg et al. (2015). They showed that the preference for yellow colours is based on a colour opponent mechanism of green and blue and that target attractiveness can be much enhanced if green without inhibiting influence of blue is offered. Moreover, UV-light is relevant for whitefly orientation. Stukenberg and Poehling (2019) also confirmed Coombe (1981) who showed that *T. vaporariorum* responds differently depending on the light intensity as well as on its wavelength. Experiments about spectral sensitivity of aphids and whiteflies showed the same sensitivity peaks at 550 nm (Hardie 1989; Nottingham et al. 1991; Mellor et al. 1997; Döring et al. 2011). Like Legarrea et al. (2011), we assume comparable reaction in landing process in whiteflies as known for aphids, despite differences, especially in migratory and distance flight. Similarities in colour vision are evident (Prokopy and Owens 1983; Hardie 1989). The strong importance of light triggered control of host plant acceptance by whiteflies was also confirmed from virus transmission studies (Ferrerres et al. 2016). Apart from light control of host plant selection, olfactory orientation is an additional key factor, which has been shown first, in particular, for the cabbage whitefly (Butler 1938; Mound 1962), possibly correlated with their host-specificity and the strong delivery of host plant-specific volatiles by Brassicaceae (Noldus and Van Lenteren 1991). For other whitefly species, the results are inconsistent, but morphological studies showed that organs for perception of olfactory stimuli are present in *A. proletella* and *T. vaporariorum* (Mellor and Anderson 1995a,b), and effects on whitefly behaviour were observed by different plant odour blends (Schlaeger et al. 2018). Furthermore, the importance of olfactory and visual cues for host plant orientation was evaluated for *Bemisia tabaci*. Recent studies showed additional effects of visual and olfactory cues in host plant orientation if viruses are involved (Johnston and Martini 2020). Olfactory cues will probably be used by most whitefly species for host-recognition and settlement, after landing has occurred, and similarities to aphid behaviour (Kennedy et al 1961; Prokopy and Owens 1983) are proposed by different authors (Vaishampayan et al. 1975a; Coombe 1982). Experiments to examine the

olfactory stimuli on whiteflies are, however, often focused on host-recognition and host-acceptance and were not designed to evaluate descending flight and/or landing behaviour (Tsueda et al. 2014; Darshanee et al. 2017).

Visual manipulation of whiteflies

Contrast

For aphids, it is shown that the contrast between plant and soil is important for targeted landing on the host plant and that landing efficacy can be lowered if the contrast is reduced by coloured (e.g. green) backgrounds (Döring 2004, 2014; Hooks and Fereres 2006), even when the artificial background is attractive for itself (Döring and Röhrig 2016). For the whitefly species tested in this study, this is the first investigation of manipulation of landing and settling behaviour by means of artificially manipulated contrasts between plants and background. For whiteflies in general, some studies have examined barrier plants (Smith and McSorley 2000; Castle 2006) to reduce virus transmission, but colour contrast effects (Döring and Chittka 2007) have not been evaluated in detail so far.

UV ratio environment

Shifting the ratio of ambient near-UV light (UV-A) in the environment around plant stands can reduce the infestation by whiteflies. This was shown in field studies with foil tunnels which exclude the ambient UV light (Mutwiwa et al. 2005; Gulidov and Poehling 2013) and with artificially UV-emitting fluorescent tube-type lamps (Mutwiwa and Tantau 2005). Experiments by Antignus et al. (2001, 2004) showed the same tendencies in laboratory and field tests with UV-deficient tunnels.

Reflective foils

Moreover, specific light reflection from the ground area around plants can strongly influence whitefly landing behaviour. In studies with reflective foils, the material and optical properties vary greatly (Greer and Dole 2003). Summers and Stapleton (2002) showed that reflective mulch films can have the same control effect on infestation levels of *Bemisia argentifolii* as treatments with the pesticide imidacloprid. Only one study has dealt with the reaction of whiteflies (*B. argentifolii*) to white foil (Csizinszky et al. 1997), but reflection spectra are not given and experiments were not designed for evaluation of whitefly landing and/or settling behaviour. For aphids, the results differ greatly between studies using white foil/mulch. Some species are attracted (e.g. *Aphis gossypii* G.), some are repelled (e.g. *Aphis spiraecola* P.) (Adlerz 1968; Antignus 2000; Greer and Dole 2003). We

used a white foil with low UV reflectance to avoid the well-known repellent effect known triggered by reflected UV-light (< 400 nm). Reflection spectra for all materials were recorded to ensure comparability with other studies, which is often not possible due to a lack of (available) data, as mentioned by Döring (2014).

The aim of this study is to show basically that coloured foils reducing contrasts or foils reflecting repellent wavelengths can be an important (and cost-effective) additional physical measure for plant protection within an integrated plant management system. The results should be implemented in further developing herbivore controlling biodegradable, sprayable foil/films for use in horticultural production systems.

Materials and methods

Reflection measurement

Reflection spectra were measured with a UV/VIS/NIR spectrophotometer (Perkin-Elmer Instruments, Norwalk, USA) containing a 30-cm integrating sphere and a tungsten–halogen and deuterium lamp. Each foil 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 by positioning the sample.) Samples were measured from 300 to 700 nm results given in reflection percentage.

Experimental plants and insects

Lettuce plants (*Lactuca sativa* L. var. capitata, Rijk Zwaan, cultivar Diamantinas) were used as experimental host plant for *T. vaporariorum*. Plants were grown in 12-cm PET pots (Teku®). Growing conditions were 21 ± 1 °C during the day (6 a.m. to 10 p.m.) and 17 ± 1 °C at night time (10 p.m. to 6:00 a.m.) in a climate chamber. When lettuce plants reached the phenological BBCH (Biologische Bundesanstalt, Julius Kühn-Institut), Bundessortenamt, Chemische Industrie-scale) stage 16 to 18 representing seedlings with 6–8 fully developed leaves (Feller et al. 1995), they were used for the experiments.

Broccoli plants (*Brassica oleracea* var. italica P., Syn-genta, cultivar Monrello) served as experimental host plant for the cabbage whitefly, *A. proletella*. Evans (2007) also reported *Lactuca* sp. as a potential host, however, for the lettuce cultivar used in our experiments we cannot confirm this. They were grown under the same conditions as the lettuce plants. Plants were used at phenological BBCH stage 15 for the experiments. BBCH stage 15 represented

seedling with 5 fully developed leaves and plants had about the same leaf areas as the lettuce seedlings.

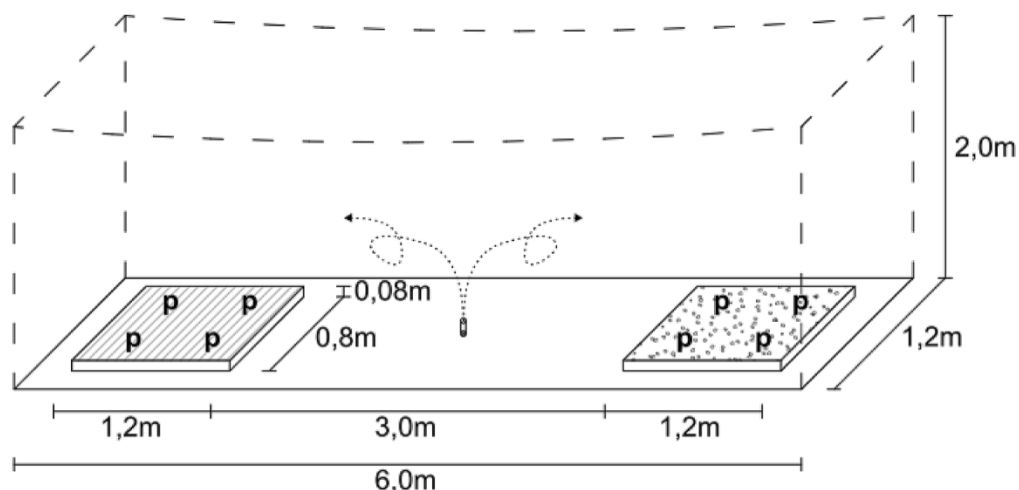
Adult whiteflies were obtained from separate rearing stocks. *Aleyrodes proletella* was reared on broccoli (same cultivar as in experiments), *T. vaporariorum* on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). Acceptance of used lettuce cultivar and reproduction by *T. vaporariorum* was confirmed before starting the main experiments. Both cultures were held at 21 °C and 16 h light exposure (Son-t Agro 400 W) in gauze-covered wooden cages with clear plastic tops (acrylic glass, 3 mm). For experiments, approx. 100 whiteflies were gently removed from rearing stocks with an aspirator and transferred into a glass tube (height: 10 cm, diameter: 2.9 cm) approx. 20 min. before the experiment started and kept in the experimental greenhouse to adapt to light conditions. Vitality was checked visually before use. During the experiments, it turned out that it was impossible to catch exactly 100 individual whiteflies for each experiment due to the high density in the insect rearing. Therefore, the numbers of whiteflies released differ slightly between the single experimental runs.

Location and experimental setup

Experiments were carried out in a greenhouse environment at 21 ± 2 °C in the Institute of Horticultural Production Systems, Herrenhäuserstr.2, 30,419 Hannover, Germany. The size of the greenhouse cabinet was 10 m × 10 m. Choice experiments were performed in two flight cages (size: 1.2 m × 6.0 m × 2.0 m—see Fig. 1) made of white mesh, arranged in the middle of the greenhouse, in N–S direction in a shaded greenhouse. Cages were placed in a distance of 2 m to each other on the long side and more than 2 m in each direction to the heating system. Flight cages were used to enable removing of unsettled whiteflies from the experimental arena for sequential repetitions of the experiment. Additional light (Son-t Agro 400 W) was applied during experiments.

The flight cages were divided into three compartments (Fig. 1): the whiteflies release area in the middle and one settlement plot on each side of the cage. These plots (0.8 m × 1.2 m) consisted of plants (p), placed in a square (32 cm × 32 cm planting distance) in an 8-cm high layer of planting substrate (Einheitserde P). One of the plots contained coloured test foil fixed on a wooden frame resulting in the same height (8 cm) as the planting substrate. Plants were placed in holes in the foil with the same planting distance. PVC foil (POLYMAR®, 650 g/m², Art.nr.8210 5240) was used to create the coloured optic background. The foils were ventilated for 6 months before use to avoid interference from possible odour.

Fig. 1 Experimental setup: Flight cage (dashed line), two plots with four plants (p) each. Background of plots (dotted or striped) is foil or soil and depends on orientation (North–South or South–North) of the experiment. Starting point for the insects in the middle of the cage (with indicated whiteflies)



Experiments

The experiments had two different approaches:

1. Use of green foil to minimise the contrast between soil and plant. Hypothesis: Dispersing whiteflies from the central release area will be focused (landing trigger) at the edge of the foil. The start of descending flight (cf. “Beginn des Befallsflug” in Moehricke 1955), and therefore, following settling on host plants will be disturbed by minimised contrast.

We used two different foils with standardised green hues, medium-green [RAL 6001 (RAL gemeinnützige GmbH, Bonn, Germany)] and a yellow-green (RAL 6018), for the experiments to consider the different colours of the plant species. Those were chosen visually at first. Additionally, we measured the spectral reflectance (%) of all foil and plant-leaf surfaces (Fig. 2). The two different green foils showed relatively similar spectral reflectance (%) as both plant species (see Fig. 2) and were selected for the experiments to minimise contrast between plant species and ground. The yellow-green foil visually looks more like those of the lettuce (in contrast to the medium-green foil) but differs in the spectral reflectance (%). Due to this inconsistency, a preliminary test was done to investigate which mulch colour was more suitable to minimise contrast between lettuce plants and ground. Selection was done after preliminary tests with same conditions as described for the experiments shown here. *Trialeurodes vaporariorum* was tested in choice experiments to determine if soil vs. medium-green foil results in the same reduction of whiteflies on the plants as soil vs. yellow-green foil does. Since the effect of the yellow-green foil was much stronger in decreasing settlement rate of *T. vaporariorum* on lettuce than medium-green foil, we decided to use yellow-green foil for the experiments with *T. vaporariorum*, and medium-green foil for those with *A. proletella*, even if the statistical equivalence of the two “green” variants is affected. The selected variants for the main experiment are

shown below (see also Figs. 3 and 4). The duration time for the experiments was tested in preliminary test, giving rates of recaptured whiteflies bigger than 90% after 23 h, which also occurred in the main experiment.

2. Use of reflective white foil (RAL 9010). Hypothesis: Whiteflies will be repelled by the high reflection (50% up to 80%) in the spectral range of 400–490 nm (see Fig. 2). This will result in induced upward flight behaviour and leaving of the target area. One white hue was used for both whitefly species and plant (lettuce and broccoli) species in the experiments.

The following four variants were selected for the main experiment:

- V1 *A. proletella*—broccoli—medium-green foil versus soil.
- V2 *T. vaporariorum*—lettuce—yellow-green foil versus soil.
- V3 *A. proletella*—broccoli—white foil versus soil.
- V4 *T. vaporariorum*—lettuce—white foil versus soil.

Experiments always started at 10 a.m. with release of approx. 100 whiteflies in the centre of the flight cages. Whiteflies settled on plants were counted the next day at 9:45 a.m. Plants and whiteflies were removed. Afterwards, the cage was cleaned with a vacuum cleaner such that the next repetition could be started with new plants and insects at 10:00 a.m.

Every experiment was repeated 10–12 times consecutively with the foil plot directed towards the south and 10–12 times with the foil plot directed towards the north. The allocation of the whitefly species to the cages (east and west) was randomised to avoid possible effects of the ambient light entering the experimental compartment. On every experimental day, there was one trial with greenhouse whitefly and one with cabbage whitefly with white or green foil.

Data for radiation sum and sunshine duration were provided by the Institute of Meteorology and Climatology, (Leibniz Universität Hannover). Measurement was made immediately adjacent to the greenhouse used for the experiments.

Statistics

The observations were counts out of two possible categories (number of whiteflies on plants treated with foil and number of whiteflies located on untreated plants), and hence, a binominal process was assumed. Consequently, the statistical analysis was based on proportions (counted whiteflies on treated plants divided by the total number of counted whiteflies), rather than on the original counts. It was assumed that, without any treatment, the individual whiteflies would be spread randomly in the flight cages giving a 50:50% distribution. Consequently, a treatment effect was assumed if the estimated mean proportion of whiteflies located on the treated plants was significantly different from 0.5. For each of the four different trials, separate generalised linear models running on the logit link were fitted to the observed proportions (McCullagh and Nelder 1989) such that the proportions depended on the north–south direction of the flight cage, the hours of sunshine per day and the radiation sum per day. We modelled extra-binomial variation (overdispersion) using the quasi-likelihood approach (sometimes called quasi-binomial assumption) that is described in McCullagh and Nelder (1989) or Demétrio et al. (2014). Finally, mean proportions and their confidence intervals as well as tests for the hypothesis that the estimated mean proportion differs significantly from 0.5 ($\alpha=0.05$) were calculated based

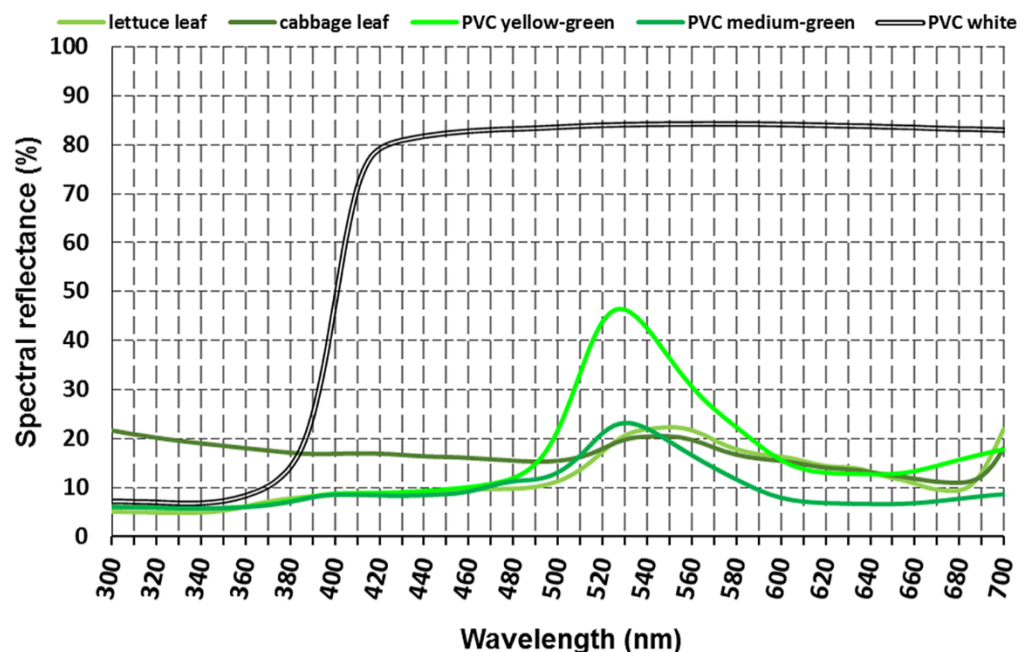
on the fitted model (Lenth 2019). The statistical analysis was performed using R (version 3.5.3 for Windows 7). The models were fitted by the glm function and the average proportions, and their confidence intervals and the tests were calculated using the function emmeans from the emmeans package (Lenth 2019). The figures concerning spectral reflectance were made using Microsoft Excel (MS Office 2016). All other figures concerning results were made using the software RStudio (version 1.1.442) and the ggplot2 package (Wickham 2016).

Results

Reflection measurement

The spectral reflectance of the coloured foils and the different plant species are shown in Fig. 2. The lettuce plants and broccoli plants showed nearly the same peak in the green region (≈ 550 nm, 20% reflection), but the broccoli leaf exhibited a higher spectral reflectance ($\sim 17\%$) in the UV-blue-region (300 nm to 500 nm) than all other materials (8%), except the white foil (see below). The comparison of lettuce leaf versus yellow–green foil showed the same reflection from 300 to 470 nm ($\leq 10\%$). Peaks of reflection of both foils were about 530 nm, but the reflection intensity of the yellow-green foil in the green and yellow range (500 nm to 600 nm) was more than twice as high (46%) as that of the lettuce (20%), the broccoli leaves (22%) and the medium-green foil (23%). The white foil reflected less than 10% in the range 300–370 nm, but towards the longer

Fig. 2 Reflectance (%) between 300 and 700 nm of the different coloured foils and leaves of plant species used in experiments



wavelength the reflection curve rose exponentially, flattening out at 440 nm and 80% reflection.

Choice experiments

Figure 3a shows the proportion of recaptured *A. proletella* in the choice experiment on plants mulched with medium-green foil vs. bare soil. The estimated mean proportion was 0.41 which significantly ($p < 0.0001$) differs from the hypothetical 0.5 although fluctuations in repetitions over time were relatively high. On average, a reduction in infestation of 18% from the assumed 0.5 of the foil treated plants was

achieved. The mean proportion of insects located on the treated plants varied between 0.5 on the 05 January 2018 and 01 February 2018 and 0.24 on the 09 January 2018.

Figure 3b shows the proportion of *T. vaporariorum* on plants mulched with yellow-green foil vs. bare soil. The proportion of insects settled on treated plants varied between 0.43 on the 4 December 2017 and 0.22 on the 30 January 2018. The mean proportion estimated from the model was 0.3 which was also significantly different ($p < 0.0001$) from the assumed 0.5. On average, a reduction of 40% from the assumed 0.5 was achieved in infestation of foil treated plants.

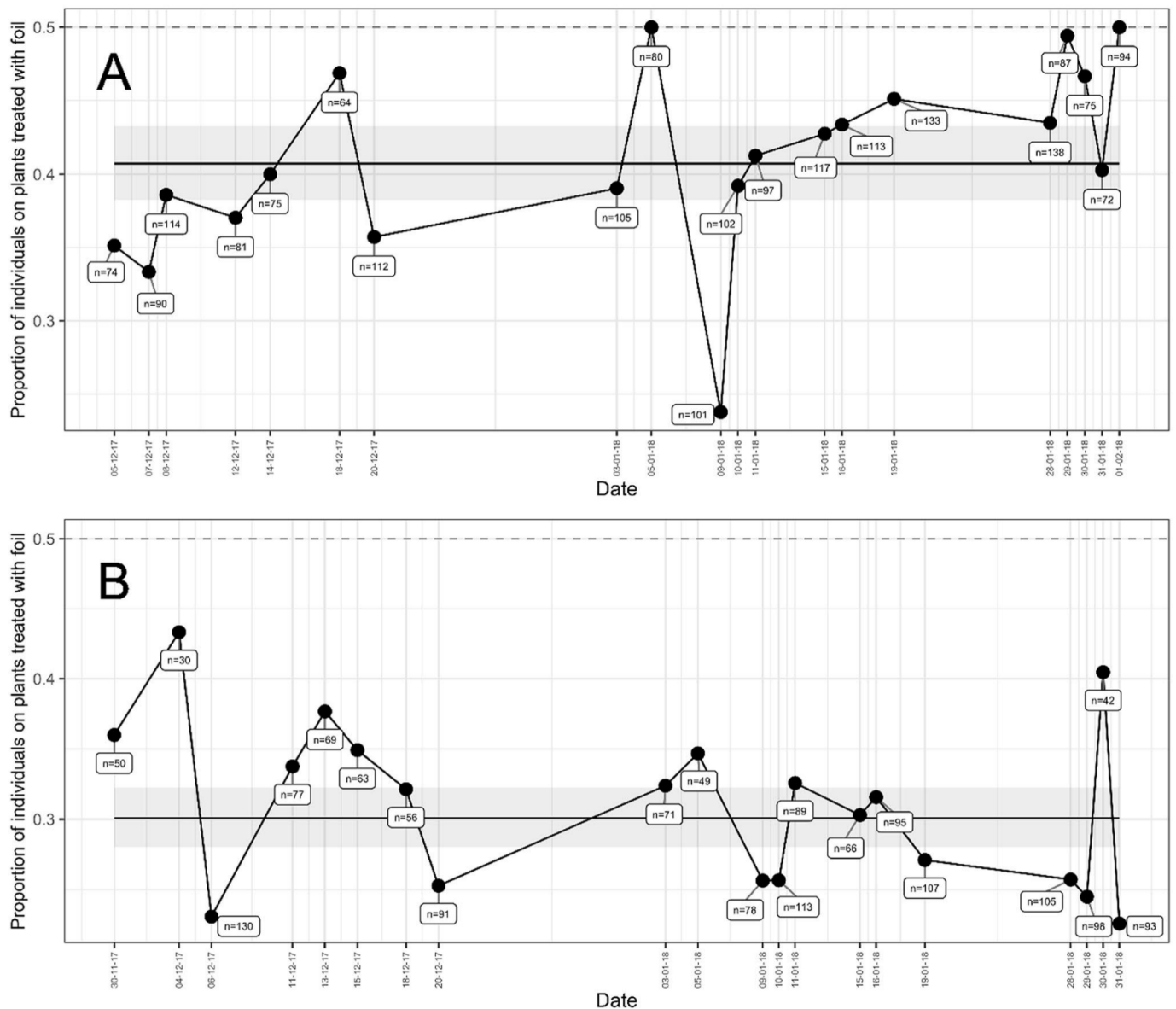


Fig. 3 Proportions of recaptured individuals of *Aleyrodes proletella* on plants mulched with medium-green foil versus bare soil (a) and proportions of counted individuals of *Trialeurodes vaporariorum* on plants mulched with yellow-green foil versus bare soil (b). The model-based average proportion across all observations is represented

by the black horizontal line with its corresponding 95% confidence interval (grey area around the average proportion). The mean proportion of whiteflies on plants with foil differs significantly ($p < 0.0001$) from 0.5 (dashed line)

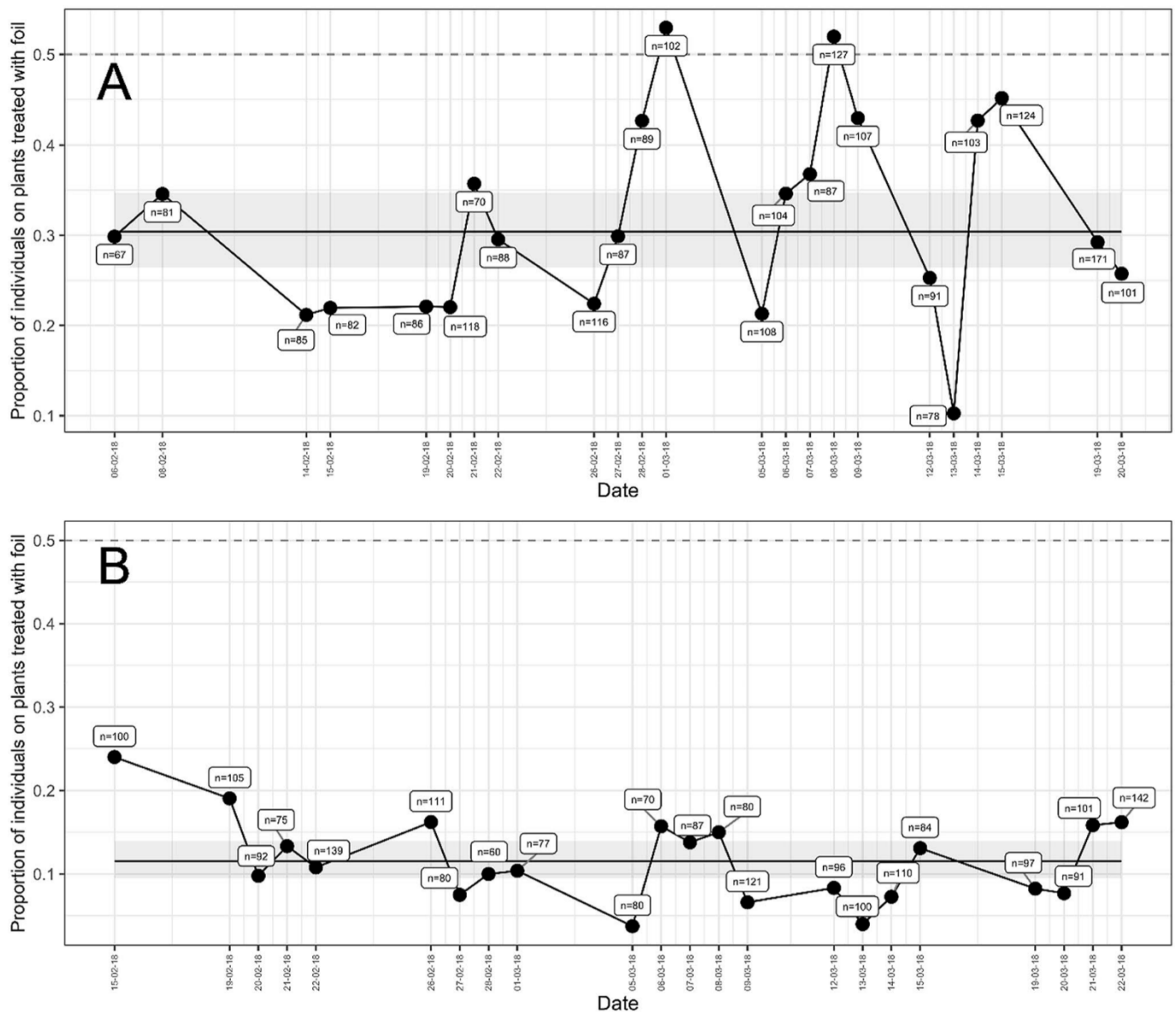


Fig. 4 Proportions of counted individuals of *Aleyrodes proletella* (a) and *Trialeurodes vaporariorum* on plants mulched with white foil versus bare soil (b). The model-based average proportion across all observations is represented by the black horizontal line with its corre-

sponding 95% confidence interval (grey area around the average proportion). The mean proportion of whiteflies on plants with foil differs significantly ($p < 0.0001$) from 0.5 (dashed line)

The proportions of *A. proletella* recaptured on plants mulched with white foil vs. bare soil are shown in Fig. 4a. The observed proportions varied between 0.53 on the 1 March 2018 and 0.1 on 13 March 2018. The model-based mean proportion was 0.3, which was significantly ($p < 0.0001$) different from the assumed 0.5. An average reduction in infestation of foil treated plants of 39% was achieved, based on the assumed 0.5.

The proportion *T. vaporariorum* recaptured after 23:45 h in the choice experiment on the plants mulched with white foil vs. bare soil is shown in Fig. 4b. The proportions vary between 0.24 on the 15 February 2018 and 0.03 (05 March 2018 and 13 March 2018). The estimated mean proportion

is 0.11. An average reduction in infestation of foil treated plants of 78% was achieved, assuming the 0.5 proportion.

Discussion

Contrast variants: yellow–green foil and medium–green foil

The preliminary test revealed that the medium–green foil did not sufficiently reduce the contrast between plants and background to disturb controlled settling by *T. vaporariorum* on lettuce. The reflection measurement also showed that the

maximum reflection values (%) of the medium-green foil and the lettuce plants were almost the same, but not at the same wavelength which supports this conclusion. Thus, it appears that the lettuce plants could still be visually selected by the whiteflies in contrast to the ground. The result shows that the foil colour needs to be carefully adapted to the relevant reflection properties of the crop which should be protected. These findings correspond to those of Finch and Collier (2000) and Shimoda (2018) who showed alternate behaviour to minimised contrast by several different genera and species. For aphids, it was shown in field experiments that infestation rates can be decreased by selection of the spectral reflectance by the foil material (Döring and Röhrig 2016). The yellow-green foil, on the other hand, seems to have “out-shined” the lettuce plants since the percentage reflection is considerably higher than that of the lettuce. This finding fits to those of Coombe (1981) and Stukenberg (2018) who showed intensity depended behaviour of *T. vaporariorum* for same wavelength. The percentage reflectance in the yellow range of the spectra (570–600 nm) by the yellow-green foil was just slightly above the reflectance (%) by the lettuce. Even if this elicits a positive landing trigger for itself, it could be compensated by the relative high reflectance (%) in the blue range between 470 and 490 nm. For *T. vaporariorum* Stukenberg and Poehling (2019) showed clearly that the increasing amount of blue light inhibits the attracting effect by the yellow amount of the light. UV-light can also play a role in general, but for the yellow-green foil, which produces a similar spectral reflectance as lettuce between 250 and 460 nm, this effect could not be observed.

Contrast effect-settling

This is the first study dealing with green foil to minimise contrast for whitefly control in greenhouses. Due to the lack of comparable studies with whiteflies, we discuss our findings mostly in relation to studies with aphids.

The yellow–green and the medium-green foil reduced the number of recaptured whiteflies both significantly (*A. prole-tella*, 0.41 and *T. vaporariorum*, 0.3, regarding the assumed proportion of 0.5). This is not surprising due to the underlying mechanisms we hypothesised: The plants are not well visible to insects due to the minimised contrast between them and the ground.

The decreasing attractiveness of potential landing targets for herbivorous insects due to reduced contrast was early demonstrated with pan-trap experiments for aphids by Moericke (1955), De Barro (1991) and Döring et al. (2004). However, aphids show normally a distinct distribution flight behaviour above the crop canopy favouring the optical differentiation of target and background from above. The comparable behaviour of whiteflies is not well studied. In field experiments, however, with different whitefly species,

dispersing adults were caught in higher number in traps just above the ground in contrast to those traps installed higher (Ohnesorge and Rapp 1986 (*B. tabaci*); Isaacs and Byrne (*B. tabaci*) 1998; Collins 2016 (*A. prole-tella*) and a more short distance flight behaviour within the crop canopy was deduced. If individuals in our experiment behaved the same, this could result in a reduced effect of the contrast minimising foils compared to aphids. Moreover, this effect could be influenced by the different plant structures and be stronger in the broccoli (due to its height) than the flat-growing lettuce, which would correspond to the obtained results. Nebreda et al. (2005), however, showed in choice experiments with *A. prole-tella* and different cabbage cultivars (broccoli, cauliflower and red cabbage) that plant structure plays an important role but more the cultivar in host finding and infestation.

The experimental question, however, was more focused on whether the different species were able to select its individual host with or without foil treatment. First, Jones and Chapman (1968) showed an attractive effect of green films on aphids, but spectra for the used materials were not given. Field trials with lettuce by Hommes et al. (2003) showed the high number of aphids on plants mulched with green foil, but reflectance of the used green foil at 550 nm was slightly lower (~20%) than those of the lettuce (~22%) which indicates that the foil was not able to minimise the contrast of plants and environment. In the experiments shown here, the differences in reflection at 550 nm were much higher (~50% reflection by yellow-green foil, 22% reflection by lettuce leaves). Usually, this should result in clear settling response, if no inhibiting blue or UV light is added. Coombe (1981) showed opposite phototactic responses (positive at 550 nm, negative at 400 nm) by different monochromatic light sources. Studies by Stukenberg (2018) showed that the effect of light is not only dependent on amount of yellow and blue in the mix, but also intensity-dependent. The higher amount of whiteflies recaptured on the soil plots indicates that colour contrast may play a bigger role in landing and settling behaviour than colour itself does. This was also assumed in Hommes et al. (2003) and shown for aphids in field experiments by Döring and Röhrig (2016), where they used highly attractive background colours behind attracting trap colours with decreasing aphid catches, but mechanisms are unclear.

Edge effects

Although in our experiments we could observe a distinct reduction of infestation, the effect could have been limited by a general attracting effect of the green foil leading to more whiteflies immigrating to that plot and finally settling on plants by short distance movements. Within the plots, the green surface under the plants should possibly result in a “trap-like-effect” which may have lowered the effect of

the green foil variants in contrast to those with white foil (see below). However, this effect cannot be validated by our experimental design, and therefore, larger plots with distinct edge properties and more detailed time sequential analysis of landing and settling of whiteflies is necessary.

Reflective variants: white foil

The use of white foil had a strong and significant influence on the number of recaptured *T. vaporariorum* on the plots. Even though it was not possible to completely prevent an infestation, the settling of *T. vaporariorum* on the plants was greatly reduced. The possible repellent effect of white foils has been shown in several studies (Jones and Chapman, 1968; Greer and Dole 2003; Hommes et al. 2003; Döring, 2004, 2014). Concerning the explanation of the mechanism behind effects of reflective foil, one major problem is a clear identification of relevant wavelength. It is not possible to differentiate, for instance, between the reflection effect in UV range (<400 nm) and the near-UV (400–430 nm) and blue range (430–490 nm), which is important if aiming for a fine-tuning of these effects. Studies dealing with “reflective foil” for repelling whitefly species are difficult to compare, as both materials and optical properties vary greatly (Greer and Dole 2003). From the studies of Moericke (1955), showing that aphid flight activity is triggered by UV (in particular the upward flight), it can be assumed that whiteflies show equal behaviour and UV reflecting ground will induce dispersion flight rather than settling (Coombe 1982; Summers and Stapelton 2002; Stukenberg 2018). Furthermore, aphids and whiteflies avoid immigration in areas reduced in ambient UV radiation (Gulidov and Poehling 2013; Mutwiwa et al. 2005; Mutwiwa and Tantau 2005; Shimoda 2018). However, in all these studies a detailed analysis of the short wavelength range is missing. Csizinszky et al. (1997) showed increasing whitefly populations in autumn on white foil in contrast to yellow, orange or aluminium foil in field experiments with *Bemisia argentifolii*, but reflection spectra of the used materials were not reported. Also the dorsal light reaction (Goodman 1965) could be disturbed by the reflected wavelength, which would result in leaving the area, as shown in several studies (Kring 1972; Shimoda and Honda 2013; Shimoda 2018). Since we used a white foil with low reflection in the UV range, we assume that the repellent effect is due to the high reflection intensity (brightness) in the range of 400–490 nm. This finding is analogous to those by Affeld et al. (1983), Webb et al. (1985) and recently by Stukenberg et al. (2019). Even if we can exclude the influence of UV light for the shown experiments, there are a number of possible reasons for the repellence of the other wavelength ranges. Shimoda (2018) suggests that denaturation of proteins and damaging of DNA-molecules could be involved in the toxic effect near-UV light shows in laboratory tests

with insects. With different developmental stages of *Drosophila melanogaster*, Shibuya et al. (2018) showed increase of H₂O₂-species when the illumination wavelength was 400–470 nm. Hori et al. (2014) claimed that near-UV radiation might be more harmful to insects than UV radiation, and Stukenberg and Poehling (2019) showed repellent effects by blue (~470 nm) light on *T. vaporariorum*. Further investigations are necessary to find out whether *T. vaporariorum* has reacted to one or more wavelengths or contrasts between them.

Under field conditions, the variants with contrast reduction have the theoretical advantage that the contrast of foil and plant is not strongly influenced by different weather scenarios, but the here relevant reflection properties of films in lower wavelength depend strongly on ambient light conditions. On the other hand, “contrast minimising” only works for species who primarily use optical contrasts for host finding, whereas the broad disorientation properties of reflective white foil could also be applicable for species who may use olfactory or other cues most of all. One important aim of this study was to achieve basic data for the development of herbivore controlling but also biodegradable mulch films, which should be applied by spraying it directly on the ground. Such films could stay in the field and finally milled under before new planting starts. Consequently, we had to choose foil colours which can be reproduced using natural pigments (food grade). For green and white foil, natural pigments and coloured soils could be used. Reflective surfaces like aluminium, silver or blue were not reproducible with food grade pigments.

Experimental design

A possible point of criticism is the use of spatially limited flight cages in a controlled environment. However, we see more advantages in this approach: on the one hand, the flight cages are changing incoming light from above, but this effect, if present, would be the same for all experimental organisms (plants and insects). On the other hand, despite the problem of cleaning routine in high greenhouses mentioned before, the cage is giving a standardised size for the experimental plots and could be reproduced by anyone else. It also inhibits cross-contamination with other glasshouse cabinets. Especially, small greenhouse cabins for experiments show a higher ratio of frame to window area and a large spatial proximity to the heating system, which we tried to avoid here (see materials and methods). The gauze distributes the incoming light more equally (like the greenhouse shading also did), preventing take-off effect on whiteflies by direct sunlight in individual subareas of the flight cage. In Addition, vegetable cultivation with additional light in shaded greenhouse is common in northern Europe to prevent heat losses, and experiments should have a practical relevance. This setup is comparable to

the lighting regime in spring, autumn and winter cultivation of vegetables in a greenhouse. However, the preference for certain colours and the general host-finding process by insects, even if influenced by different biotic (e.g. predators) and abiotic (e.g. Weather) factors should be similar in the field. To prove this theory, field trials with the same model plants were performed the following seasons (publication in progress).

Another point is the different numbers of recaptured whiteflies, exceeding the number of 100 several times. We tried to calibrate the system of exhausting the whiteflies from the rearing by sucking 100 (visually counted) individuals into a vial, freeze them and count them again. This calibration showed normally a high accuracy of the counting; however, with a high density of individuals in the stock rearing, it was difficult to select exactly 100 individuals for each sample. For further studies, it would be also appropriate to change the point of release and introduce a platform of certain height above the plants, which would be more realistic scenario for the whitefly infestation procedure.

Intraspecific aspects

The experimental results indicate a strong correlation between host plant spectrum and wavelength-specific reactions for the tested whitefly species. In addition, host specificity, which decreases the possibility of finding hosts by chance, also increases the probability of a specific search mechanism for host finding and selection (see also Döring 2014). This may, for example, be an additional orientation aid by olfactory stimuli, which helps to overcome the optically repellent mechanism, as shown by Butler (1938) for *A. proletella*. This can explain the much lower and inconsistent reaction to the reflective white foil in the choice tests with this species. This effect is maybe triggered by the experimental plot size (to small) and low air movement in the greenhouse. Differences in learning capacity could also be involved in this process (Bernays and Funk 1999; Tapia et al. 2015). Controlled studies about spectral sensitivity of generalists and specialist from the same species could show if the unequal reaction is caused by visual stimuli, or if additional senses (e.g. olfactory stimuli) are involved. For aphids, it was shown that different species also show different responses to colours (Moericke 1969; Döring and Chittka 2007; Straw et al. 2011; Döring and Röhrig 2016) but experiments were not designed to evaluate intraspecific behaviour, so generalists and specialists were not tested against each other.

Conclusion

The results shown here demonstrate a high potential for the use of reflective and contrast minimising foils to reduce the infestation with phytophagous insect pests, especially if

embedded in an integrated pest management (IPM) system. We have to consider that the “treatment” with the coloured foil does not show effects like chemicals do, but we do not consider this method as “standalone”, it has to be included in an integrated pest management (IPM) system. But if cultivation of plants will be done with mulch foil anyway, and the additional cost of production for coloured foil would be nearly zero, also the observed relatively small effects could be a substantial improvement of the control system. Further investigations are needed to show how stable this effect is in the field and/or under more practical conditions. For this purpose, large field trials were planned. More basic and applied research on visual perception by phytophagous insects and their resulting behaviour is necessary to use generated knowledge for plant protection practice and for ecological questions.

Acknowledgements This work was funded by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Germany, under the Grant No. 22008214/14NR082. We would like to acknowledge the constant whitefly rearing provided by Mr. Timo Michel. We would also like to acknowledge Mr. Matthias Bierschenk for providing the “experimental setup” graphic and Dr. Julia Müller for helpful advises in language and style. The authors take full responsibility for the content of this publication.

Author contributions JUN and HMP conceived and designed research. JUN conducted experiments. MM and JUN analysed data. JUN wrote the first manuscript and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the manuscript.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article’s Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article’s Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Adlerz WC, Everett PH (1968) Aluminum foil and white polyethylene mulches to repel aphids and control watermelon mosaic. *J Econ Entomol* 61(5):1276–1279

- Affeldt HA, Thimijan RW, Smith FF, Webb RE (1983) Response of the greenhouse whitefly (*Hemiptera: Aleyrodidae*) and the vegetable leafminer (*Diptera: Agromyzidae*) to photospectra. *J Econ Entomol* 76:1405–1409
- Antignus Y, Ben-Yakir D (2004) Ultraviolet-absorbing barriers, an efficient integrated pest management tool to protect greenhouses from insects and virus diseases. In: Horowitz AR, Ishaaya I (eds) *Insect pest management*. Springer, Berlin
- Antignus Y (2000) Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. *Virus Res* 71(1–2):213–220
- Antignus Y, Nestel D, Cohen S, Lapidot M (2001) Ultraviolet deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight behavior. *Environ Entomol* 30:394–399
- Bernays EA, Funk DJ (1999) Specialists make faster decisions than generalists: experiments with aphids. *Proc R Soc B Biol Sci* 266(1415):151–156
- Butler CG (1938) On the ecology of *Aleurodes brassicae* Walker (Hemiptera). *Trans R Entomol Soc Lond* 87(13):291–311
- Byrne DN, Bellows TS, Parrella MP (1990) Whiteflies in agricultural systems. In: Gerling D (ed) *Whiteflies: Their Bionomics Pest Status and Management*. Intercept Andover, UK, pp 227–261
- Castle SJ (2006) Concentration and management of *Bemisia tabaci* in cantaloupe as a trap crop for cotton. *Crop Prot* 25(6):574–584
- Chen C-H, Dubey A, Ko C-C (2007) Comparative morphological studies on two species of *Aleyrodes* (*Hemiptera: Aleyrodidae*). *Pan Pac Entomol* 83:244–254
- Collins S (2016) The biology and ecology of *aleyrodes proletella*, the cabbage whitefly; a pest of brassica crops. Ph.D. thesis, University of Warwick
- Coombe PE (1981) Wavelength specific behaviour of the whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *J Comp Physiol* 144:83–90
- Coombe PE (1982) Visual behaviour of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*. *Physiol Entomol* 7(3):243–251
- Csizinszky AA, Schuster DJ, Kring JB (1997) Evaluation of color mulches and oil sprays for yield and for the control of silverleaf whitefly, *Bemisia argentifolii* (Bellows and Perring) on tomatoes. *Crop Prot* 16(5):475–481
- Darshanee HLC, Ren H, Ahmed N, Zhang ZF, Liu YH, Liu TX (2017) Volatile-mediated attraction of greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* to tomato and eggplant. *Front Plant Sci* 8:1285
- De Barro PJ (1991) Attractiveness of four colours of traps to cereal aphids (*Hemiptera: Aphididae*) in South Australia. *Aust J Entomol* 30(4):263–264
- DeBarro PJ, Carver M (1997) Cabbage whitefly, *Aleyrodes proletella* (L.) (*Hemiptera: Aleyrodidae*), newly discovered in Australia. *Aust J Entomol* 36(3):255–256
- Demétrio CGB, Hinde J, Moral RA (2014) Models for overdispersed data in entomology. In: Ferreira CP, Godoy WAC (eds) *Ecological modelling applied to entomology*. Springer International Publishing, Switzerland, pp 219–259
- Döring TF, Kirchner SM, Kühne S, Saucke H (2004) Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. *Entomol Exp Appl* 113:53–62
- Döring TF (2014) How aphids find their host plants, and how they don't. *Ann Appl Biol* 165:3–26
- Döring TF, Chittka L (2007) Visual ecology of aphids—a critical review on the role of colours in host finding. *Arthropod Plant Interact* 1:3–16
- Döring TF, Röhrig K (2016) Behavioural response of winged aphids to visual contrasts in the field. *Ann Appl Biol* 168:421–434
- Döring TF, Kirchner SM, Skorupski P, Hardie J (2011) Spectral sensitivity of the green photoreceptor of winged pea aphids. *Physiol Entomol* 36:392–396
- Evans GA (2007) The whiteflies (*Hemiptera: Aleyrodidae*) of the world: and their host plants and natural enemies. https://keys.lucidcentral.org/keys/v3/whitefly/PDF_PwP%20ETC/world-whitefly-catalog-Evans.pdf. Accessed 05 Dec 2019
- Feller C, Bleiholder H, Buhr L, Hack H, Hess M, Klose R, Meier U, Stauss R, Van Den Boom T, Weber E (1995) Phänologische entwicklungsstadien von gemüsepflanzen: I. zwiebel-, wurzelknollen- und blattgemüse. *Nachrichtenbl Deut Pflanzenschutz* 47:193–206
- Fereres A, Peñaflo MFGV, Favara CF, Azevedo KEX, Landi CH, Maluta NKP, Bento JMS, Lopes JRS (2016) Tomato infection by whitefly-transmitted circulative and non-circulative viruses induce contrasting changes in plant volatiles and vector behaviour. *Viruses* 8:225
- Finch S, Collier RH (2000) Host-plant selection by insects—a theory based on “appropriate/inappropriate landings” by pest insects of cruciferous plants. *Entomol Exp Appl* 96(2):91–102
- Goodman LJ (1965) The role of certain optomotor reactions in regulating stability in the rolling plane during flight in the desert locust, *Schistocerca gregaria*. *J Exp Biol* 42:385–408
- Gorman K, Devine G, Bennison J, Coussons P, Punchedard N, Denholm I (2007) Report of resistance to the neonicotinoid insecticide imidacloprid in *Trialeurodes vaporariorum* (*Hemiptera: Aleyrodidae*). *Pest Manag Sci* 63:555–558
- Gorman K, Hewitt F, Denholm I, Devine GJ (2001) New developments in insecticide resistance in the glasshouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) and the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) in the UK. *Pest Manag Sci* 58:123–130
- Greer L, Dole JM (2003) Aluminum, aluminium foil, aluminium-painted, plastic, and degradable mulches increase yields and decrease insect-vectored viral diseases of vegetables. *Hort Technology* 13:276–284
- Gulidov S, Poehling H-M (2013) Control of aphids and whiteflies on Brussels sprouts by means of UV-absorbing plastic films. *J Plant Dis Protect* 120:122–130
- Hardie J (1989) Spectral sensitivity for targeted flight in the black bean aphid, *Aphis fabae*. *J Insect Physiol* 35:619–626
- Hommes M, Siekmann G, Piepenbrock O, Baur U, Fricke A, Thieme T (2003) Reduzierung des Blattlausbefalls an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn, Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau. <https://orgprints.org/16630/>. Accessed 04 Sep 2019
- Hooks CRR, Fereres A (2006) Protecting crops from non-persistently aphid-transmitted viruses: a review on the use of barrier plants as a management tool. *Virus Res* 120(1–2):1–16
- Hori M, Shibuya K, Sato M, Saito Y (2014) Lethal effects of short-wavelength visible light on insects. *Sci Rep* 4:7383. <https://doi.org/10.1038/srep07383>
- Horowitz AR, Ishaaya I (1996) Chemical control of *Bemisia*: management and application. In: Gerling D, Mayer RT (eds) *Bemisia: taxonomy, biology, damage, control and management*. Intercept Andover, Hants, pp 537–556
- Isaacs R, Byrne D (1998) Aerial distribution, flight behaviour and egg-load: their inter-relationship during dispersal by the sweetpotato whitefly. *J Anim Ecol* 67:741–750
- Johnston N, Martini X (2020) the influence of visual and olfactory cues in host selection for bemisia tabaci biotype b in the presence or absence of tomato yellow leaf curl virus. *Insects* 11(2):115
- Jones FR, Chapman RK (1968) Aluminum foil and other reflective surfaces to manipulate the movement of aphid vectors of plant viruses. *Proc N C Branch Entomol Soc Am* 23:146–148
- Kennedy JS, Booth CO, Kershaw WJS (1961) Host finding by aphids in the field III visual attraction. *Ann Appl Biol* 49:1–21
- Kring JB (1972) Flight behaviour of aphids. *Annu Rev Entomol* 17:461–492

- Legarra S, Weintraub PG, Plaza M, Viñuela E, Fereres A (2011) Dispersal of aphids, whiteflies and their natural enemies under photosensitive nets. *Biocontrol* 57(4):523–532
- Lenth R (2019) emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means R package version 14. <https://cran.r-project.org/package=emmeans>. Accessed 15 Oct 2020
- Luo C, Jones CM, Devine G, Zhang F, Denholm I, Gorman K (2010) Insecticide resistance in *Bemisia tabaci* biotype Q (*Hemiptera: Aleyrodidae*) from China. *Crop Prot* 29:429–434
- Martin JH (1999) The whitefly fauna of Australia (*Sternorrhyncha: Aleyrodidae*): a taxonomic account and identification guide. Tech Paper CSIRO Entomol 38:197
- McCullagh P, Nelder JA (1989) Generalized linear models, 2nd edn. Chapman & Hall New York, USA
- Mellor HE, Anderson M (1995a) Antennal sensilla of whiteflies: *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), the glasshouse whitefly, *Aleyrodes proletella* (Linnaeus), the cabbage whitefly, and *Bemisia tabaci* (Gennadius), the tobacco whitefly (*Homoptera: Aleyrodidae*) part 1: external morphology. *Int J Insect Morphol Embryol* 24(2):133–143
- Mellor HE, Anderson M (1995b) Antennal sensilla of whiteflies: *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), the glasshouse whitefly, and *Aleyrodes proletella* (Linnaeus), the cabbage whitefly, (*Homoptera: Aleyrodidae*) part 2: ultrastructure international. *J Insect Morphol Embryol* 24(2):145–160
- Mellor HE, Bellingham J, Anderson M (1997) Spectral efficiency of the glasshouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* and *Encarsia formosa* its hymenopteran parasitoid. *Entomol Exp Appl* 83(1):11–20
- Moericke V (1969) Hostplant specific colour behaviour by *Hyalopterus pruni* (Aphididae). *Entomol Exp Appl* 12:524–534
- Moericke V (1955) Über die lebensgewohnheiten der geflügelten blattläuse (Aphidina) unter besonderer berücksichtigung des verhaltens beim landen. *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 37:29–91
- Mound LA, Halsey SH (1978) Whitefly of the World British Museum (Natural History), Benham Press, pp 1–340. <https://archive.org/details/whiteflyofworlds00moun>. Accessed 5 Dec 2019
- Mound LA (1962) Studies on the olfaction and colour sensitivity of *Bemisia tabaci* (Genn) (*Homoptera; Aleyrodidae*). *Entomol Exp Appl* 42:33–40
- Mutwiwa UN, Borgemeister C, von Elsner B, Tantau HJ (2005) Effects of UV-absorbing plastic films on the greenhouse Whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (westwood). *J Econ Entomol* 98(4):1221–1228
- Mutwiwa UN, Tantau HJ (2005) Suitability of a uv lamp for trapping the greenhouse whitefly *trialeurodes vaporariorum* westwood (*Hom: Aleyrodidae*). *CIGR E-journal, Manuscript BC 05 004 vol 7* September
- Nebreda M, Nombela G, Muñiz M (2005) Comparative host suitability of some brassica cultivars for the whitefly, *Aleyrodes proletella* (*Homoptera: Aleyrodidae*). *Environ Entomol* 34:205–209
- Noldus LPJJ, van Lenteren JC (1991) Whitefly-Plant Relationships: Behavioural and Ecological Aspects. Reader P Whiteflies Their Bionomics Pest Status Manag Agric Ecosyst Environ 37(4):321–323
- Nottingham SF, Hardie J, Tatchell GM (1991) Flight behaviour of the bird cherry aphid, *Rhopalosiphum padi*. *Physiol Entomol* 16(2):223–229
- Ohnesorge B, Rapp G (1986) Monitoring *Bemisia tabaci*: a review. *Agr Ecosyst Environ* 17(1–2):21–27
- Prokopy RJ, Owens ED (1983) Visual detection of plants by herbivorous insects. *Annu Rev Entomol* 28(1):337–364
- Schlaeger S, Pickett JA, Birkett MA (2018) Prospects for management of whitefly using plant semiochemicals, compared with related pests. *Pest Manag Sci* 74(11):2405–2411. <https://doi.org/10.1002/ps.5058>
- Shibuya K, Onodera S, Hori M (2018) Toxic wavelength of blue light changes as insects grow. *PLoS ONE* 13(6):e0199266
- Shimoda M (2018) Recent advances in the optical control of insect pests using light and color. In: Proceedings of the 2018 international symposium on proactive technologies for enhancement of integrated pest management of key crops, pp 87–102
- Shimoda M, Honda K (2013) Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl Entomol Zool* 48:413–421
- Smith HA, McSorley R (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. *Fla Entomol* 83(2):145
- Springate S, Colvin J (2012) Pyrethroid insecticide resistance in British populations of the cabbage whitefly *Aleyrodes proletella*. *Pest Manag Sci* 68(2):260–267
- Straw NA, Williams DT, Green G (2011) Influence of sticky trap color and height above ground on capture of alate *Elatobium abietinum* (*Hemiptera: Aphididae*) in sitka spruce plantations. *Environ Entomol* 40:120–125
- Stukenberg N (2018) LED based trapping of whiteflies and fungus gnats: from visual ecology to application. Ph.D. thesis, Leibniz Universität Hannover
- Stukenberg N, Poehling H-M (2019) Blue–green opponency and trichromatic vision in the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) explored using light emitting diodes. *Ann Appl Biol* 88:439
- Stukenberg N, Gebauer K, Poehling H-M (2015) Light emitting diode (LED)-based trapping of the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). *J Appl Entomol* 139(4):268–279
- Summers CG, Stapleton JJ (2002) Use of UV reflective mulch to delay the colonization and reduced the severity of *Bemisia argentifolii* (*Homoptera: Aleyrodidae*) infestations in cucurbits. *Crop Prot* 21:921–928
- Tapia DH, Silva AX, Ballesteros GI, Figueroa CC, Niemeyer HM, Ramírez CC (2015) Differences in learning and memory of host plant features between specialist and generalist phytophagous insects. *Anim Behav* 106:1–10
- Tsueda H, Tsuduki T, Tsuchida K (2014) Factors that affect the selection of tomato leaflets by two whiteflies, *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* (*Homoptera: Aleyrodidae*). *Appl Entomol Zool* 49(4):561–570
- Vaishampayan SM, Kogan M, Waldbauer GP, Woolley JT (1975) Spectral specific responses in the visual behaviour of the greenhouse white-fly, *Trialeurodes vaporariorum* (*Homoptera: Aleyrodidae*). *Entomol Exp Appl* 18:344–356
- Vaishampayan SM, Waldbauer GP, Kogan M (1975) Visual and olfactory responses in orientation of plants by greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (*Homoptera: Aleyrodidae*). *Entomol Exp Appl* 18(4):412–422
- Webb RE, Smith FF, Affeldt H, Thimijan RW, Dudley RF, Webb HF (1985) Trapping greenhouse whitefly with coloured surfaces: variables affecting efficacy. *Crop Prot* 4:381–393
- Wickham H (2016) ggplot2: Elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag, New York

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

- 3. Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2022): Reducing initial aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films**

Jan-Uwe Niemann^{1,2}, Max Messen³, 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.

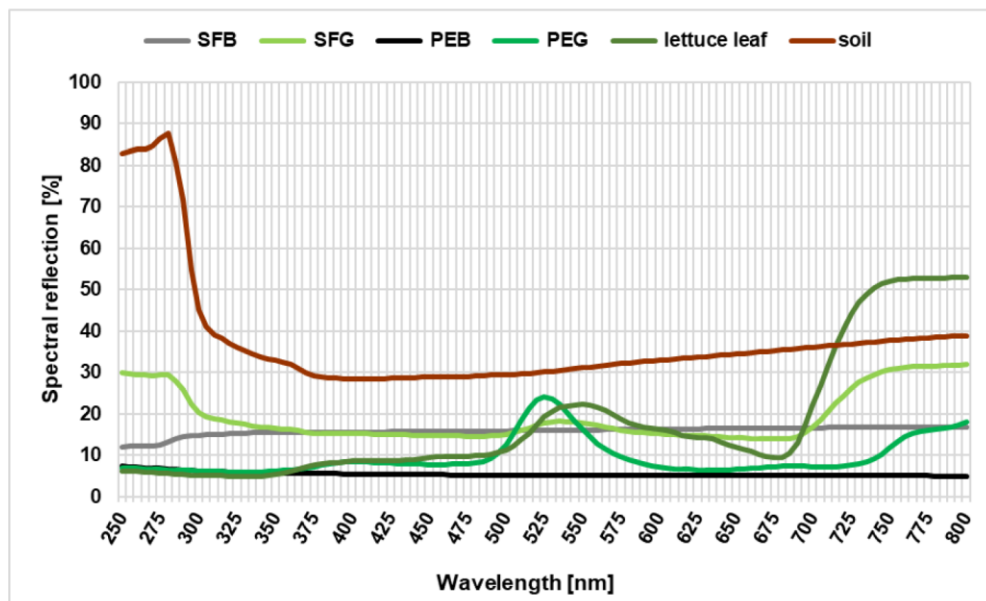


Fig. 1. Reflection spectra of the soil (NF), mulch-materials and the experimental plant *Lactuca sativa*, var. *crispata*. For abbreviations see Table 1.

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

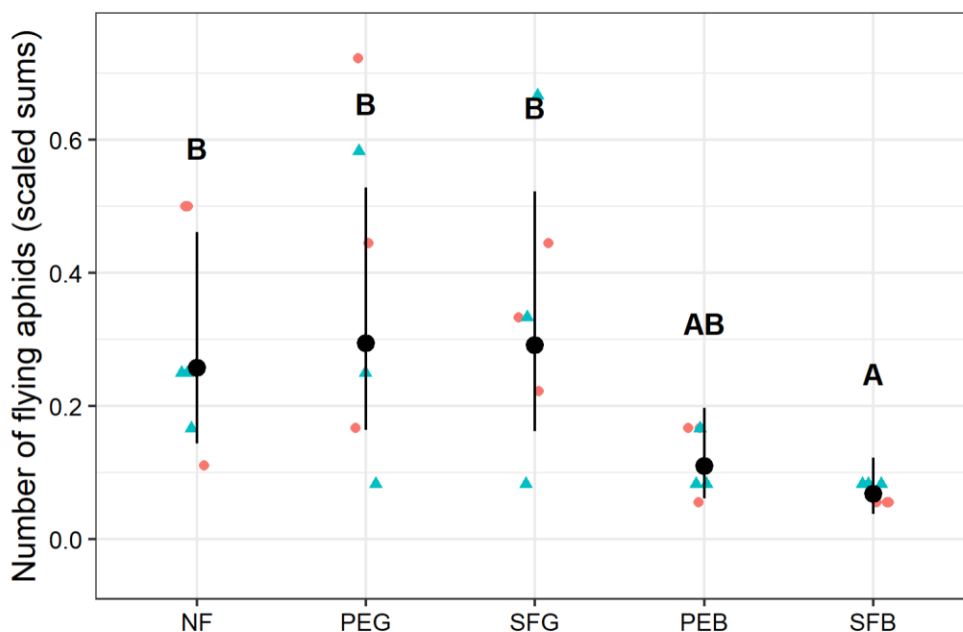


Fig. 2. Scaled sums of the total number of alate aphids per location in each plot (May 16, 2018). The sums were scaled to be $(y + 1)/n$. Dots indicate sums from the border plants, triangles indicate sums from the centre of a plot. The black dots are model-based least square means of the scaled sums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

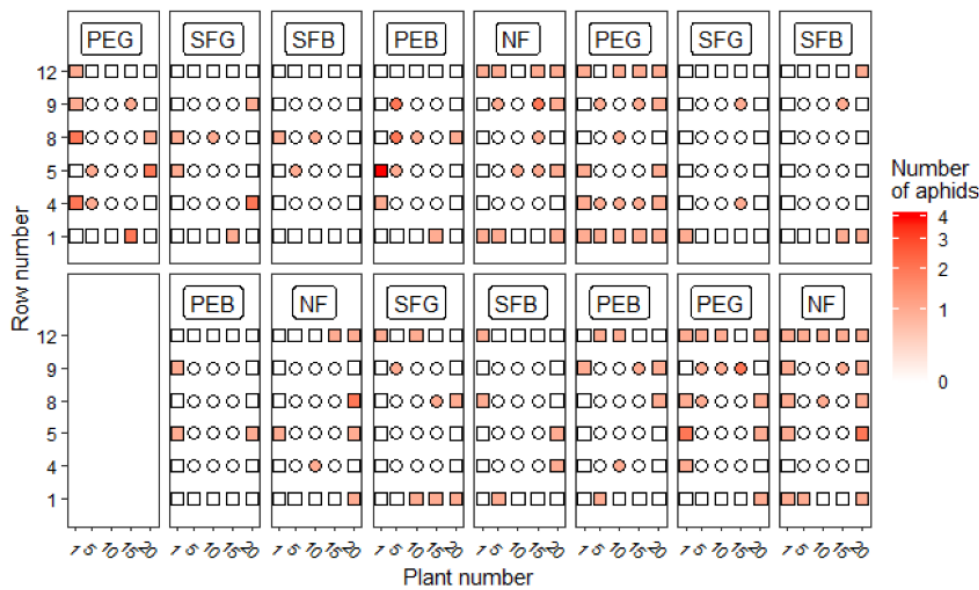


Fig. 3. Heatmap for the total number of aphids (June 22, 2018) with overview over all evaluated lettuce plants ($n=450$). Five treatments with three replications each on 15 randomized plots ($n=30$ per plot). Total number of aphids (alate and apterous) found in the 2nd evaluation is represented by increasing 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.
- Diaz, 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/HORTECH.13.2.0276.
- Holman, J., 2009:** Host Plant Catalog of Aphids: Palaearctic Region. Dordrecht, Springer Netherlands, DOI: 10.1007/978-1-4020-8286-3.
- Hommel, 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.

4. Niemann, J-U; Poehling, H-M (2022): Effect of narrow-banded blue LED device on host plant settlement by greenhouse whitefly and currant-lettuce aphid



Effect of narrow-banded blue LED device on host plant settlement by greenhouse whitefly and currant-lettuce aphid

Jan-Uwe Niemann^{1,2} · Hans-Michael Poehling²

Received: 11 January 2022 / Accepted: 6 May 2022
© The Author(s) 2022

Abstract

Manipulating phytophagous insects with light-based repelling techniques has shown its potential to be a useful tool in integrated pest management systems in the future. Underlying optical mechanisms can be applied in field and in protected cultivation, with reflecting materials or emitting light sources, such as LEDs. Many pest insects are characterised by their cryptic lifestyle to avoid intervening pest protection measurements. In addition, there is a high degree of resistance mechanisms against insecticides in certain species. The idea of most light-repelling techniques is to reduce the immigration and the settlement of pest species on hostplants before population growth even starts. We conducted experiments with narrow-banded blue LEDs arranged around the plants and emitting radiation towards the sky. For compact rosette *Lactuca sativa* and upright-branched *Euphorbia pulcherrima*, we tested the suitability of the measure on settlement of *Trialeurodes vaporariorum* in 2 choice experiments. In further choice experiments with reduced number of untreated plants, *T. vaporariorum* and *Nasonovia ribisnigri* were evaluated for the effect on hostplant settlement of the light barrier on lettuce plants under more practical conditions. The light barrier shows high repellent impact on hostplant settlement by greenhouse whitefly, independent of different plant architectures. The modified choice experiment showed strong decrease in hostplant settlement for greenhouse whitefly. For currant-lettuce aphid, tendencies are shown, but no statistical effect could be demonstrated. Possible applications and differences between the insect species used for the experiments are discussed.

Keywords Integrated pest management · Host finding · Host settlement · Light barrier · Blue–green opponency · *T. vaporariorum* · *N. ribisnigri*

Introduction

Preventing the infestation of plants by phytophagous insects by physical measures is one of the key factors in minimising chemical use in integrated pest management (IPM) systems (IOBC-WPRS, IBMA, PAN-Europe 2019). The now existing availability of light-emitting diodes (LEDs) with narrow-banded wavelengths and high intensities (HP-LEDs) gives the possibility to adapt specifically tailored light barriers for concepts of integrated plant protection.

Whiteflies are important pests in vegetables and ornamental plants (Byrne and Bellows 1991). *Trialeurodes vaporariorum* Westwood, the greenhouse whitefly (Hemiptera: Aleyrodidae), is highly polyphagous and infests more than 82 plant families including about 800 species (Mound and Halsey 1978). *Trialeurodes vaporariorum* is a serious pest in protected cultivation systems in Europe but also in field crops in warmer climates. Due to the hidden and protected lifestyle on the underside of host leaves, chemical control is often only effective using systemic insecticides or special application techniques. However, reports of insecticide resistances are numerous (Gorman et al. 2002, 2007; Luo et al. 2010).

Aphids are one of the economically most important pest of cultivated plants. The currant-lettuce aphid *Nasonovia ribisnigri* Mosley (Hemiptera: Aphididae) is known to infest more than 160 plant species from 15 different families (Holman 2009), but it is most important as a pest in lettuce (*Lactuca sativa* var. (Linnaeus)) cultivation

✉ Jan-Uwe Niemann
jan-uwe.niemann@julius-kuehn.de
niemann@ipp.uni-hannover.de;

¹ Institut Für Anwendungstechnik Im Pflanzenschutz, Julius-Kühn Institut, Messeweg 11/12, 38104 Brunswick, Germany

² Institute of Horticultural Production Systems, Section Phytomedicine, Leibniz-Universität Hannover, Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover, Germany

(Hommes et al. 2003; Reinink and Dieleman 1993). It is difficult to control with chemicals as well as biological methods, especially due to its preferred accumulation on inner leaves of lettuce heads. Therefore, when growing lettuces, pest control at an advanced stage of lettuce development can only be carried out destructively, since combating the aphids on the heartleaves is very difficult (Diaz et al. 2007). Moreover, many populations already developed high resistance to various insecticides (Kift et al. 2004; Rufingier et al. 1997).

For both pest groups whiteflies and aphids, the control of initial infestation is essential to avoid the establishment of destructive populations. Due to the exponential and fast population growth, these pests quickly develop from single immigrated individuals to large populations.

Colours and colour contrasts have a strong influence on the landing and take-off behaviour of aphids and whiteflies as well. Green and yellow colour reflections often trigger a landing reflex (Moericke 1955, 1969; Shimoda and Honda 2013; Vaishampayan et al. 1975b; Zhang et al. 2020), additionally also controlled by light intensity (brightness), whereas UV components of radiation are most important for controlling above crop flight activity (Döring and Chittka 2007; Stukenberg and Poehling 2019). However, exceptions prove the rule here and are probably host plant dependent (Döring and Chittka 2007; Farnier et al. 2014; Straw et al. 2011).

Regarding visual reception in general, trichromacy was proposed for the green peach aphid *M. persicae* by Kirchner et al. (2005) after ERG (electroretinogram) measurement of alate female summer migrants. Measurements of the spectral sensitivity of aphids and whiteflies showed the same sensitivity peaks at 550 nm for behavioural sensitivities (Döring et al. 2011; Hardie 1989; Mellor et al. 1997; Nottingham et al. 1991) and around 520–530 nm for physiological sensitivities (Döring et al. 2011; Mellor et al. 1997). The visual behaviour of the greenhouse whitefly was studied more in detail by Stukenberg and Poehling (2019), Stukenberg (2018) and Stukenberg et al. (2015). They showed recently that the preference for yellow colours is based on a colour opponent mechanism of green and blue, and that target attractiveness can be much enhanced if green without inhibiting influence of blue is offered, vice versa additional blue showed a repellent effect. Stukenberg and Poehling (2019) also confirmed Coombe (1981) who showed that *T. vaporariorum* responds differently depending on the light intensity as well as on its wavelength. Like Legarrea et al. (2012a), we assume that comparable reactions in the host finding and alighting process in whiteflies and aphids occur, as the similarities in colour vision are quite evident (Hardie 1989; Prokopy and Owens 1983).

UV-light is relevant for aphid and whitefly orientation, especially in space. They use the dorsal-light reaction

(Goodman 1965) for orientation between ground and sky. A shift in the ratio of ambient UV-light above crop stands by UV-blocking film tunnels, or greenhouse cover glasses can strongly reduce immigration. Manipulation of UV reflection from the ground by reflecting mulches on the other hand leads to increased take-off behaviour (Antignus et al. 2001; Doukas and Payne 2007), host-seeking (Antignus 2000; Legarrea et al. 2012a), dispersal (Dáder et al. 2017; Mutwiwa et al. 2005) and prevention of virus-spread (Antignus et al. 2001; Antignus and Ben-Yakir 2004; Kumar and Poehling 2006; Legarrea et al. 2012b; Stukenberg and Poehling) by aphids, whiteflies and other light sensitive pest species (Díaz et al. 2006; Johansen et al. 2011a). Moreover, the behavioural reaction of insects to light is not only depending on the light source, but as well on the physiological status of the insect and abiotic factors (Döring and Chittka 2007; Kim et al. 2019; Moericke 1962; Shimoda 2018). For *T. vaporariorum*, Stukenberg and Poehling (2019) showed that UV-light has a migratory effect.

In a previous greenhouse study, it was described that *T. vaporariorum* showed reduced infestation of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. var. capitata) when they are grown on white foil with high reflection in the blue range between 400 and 490 nm. (Niemann et al. 2021). That leads to the hypothesis that a shift in the ratio of blue light from the sky and/or the reflecting ground could show the same avoiding effect as shown for UV-deficient ambient. Studies using artificial light sources to shift the UV-ratio are rare. Mutwiwa and Tantau (2005) showed reduced number of *T. vaporariorum* in UV deficient ambient compartments, in choice tests using UV-emitting fluorescent lamps (340–380 nm) to create UV rich ambient. Stukenberg et al. (2015), and Stukenberg and Poehling (2019) used UV-A and near-UV narrow-banded LEDs (light-emitting diode) for their research on *T. vaporariorum*. However, we could not find any publication (except the patent publication) where the UV-ratio is shifted by emitting light sources from the ground to repel insect pest species. Usually, UV-light is used as an additional trigger which is added to other wavelength of the spectra to enhance trap attractiveness (Johansen et al. 2011b; Zhang et al. 2020) or as an attractant on its own (Park and Lee 2017).

To confirm the blue–green opponency described above for *T. vaporariorum* and to examine it for *N. ribisnigri*, as it was shown for aphids in general (Döring and Chittka 2007; Hardie 1989), investigations were carried out with a patented prototype (Rakoski and Stukenberg 2018) which was kindly provided by the patent owners. Aim was to test the suitability of the patented system for practical plant protection.

Materials and methods

Experimental plants and insects

Lettuce plants (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*, Rijk Zwaan, cultivar Diamantinas) were used as experimental host plant for both experiments. Plants were grown in 12 cm PET pots (Teku®). Growing conditions were 21 ± 1 °C during the day (6 a.m. to 10 p.m.) and 17 ± 1 °C at night (10 p.m. to 6:00 a.m.) in a climate chamber. Lettuce plants in the phenological BBCH (Biologische Bundesanstalt (now Julius-Kühn Institut), Bundessortenamt, Chemische Industrie)-scale stage 16 to 18, representing seedlings with 6–8 fully developed leaves (Feller et al. 1995), were used for the experiments. Height was 9 ± 1 cm.

Poinsettia plants (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex Klotzsch) served as secondary experimental host plant for the first experiment. They were potted as cuttings and grown under the same conditions as the lettuce plants. Plants were used at phenological BBCH stage 18–20 for the experiments. Poinsettia plants had about the same leaf area as the lettuce seedlings and a height of 24 ± 2 cm.

Adult *T. vaporariorum* and alate *N. ribisnigri* were obtained from separate rearing stocks. *Trialeurodes vaporariorum* was reared on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.), *N. ribisnigri* on ice-lettuce (same cultivar as for experiments). Acceptance and suitability for reproduction of used lettuce cultivar by *T. vaporariorum* were confirmed before starting the experiments. Since no eggs were found in the aphid rearing, we concluded that the alate aphids used in the experiments were summer migrants. Both cultures were held at 21 °C and 16 h light exposure (Son-t Agro 400 W) in gauze-covered wooden cages with clear plastic tops (acrylic glass, 3 mm). For experiments, insects were gently removed from rearing stocks with an aspirator (aphids with a fine brush) and transferred into a glass tube (height: 10 cm, diameter: 2.9 cm) approx. 20 min. before the experiment started and kept in the experimental

greenhouse to adapt on light situation. Vitality was checked visually before use.

Location and experimental setup

Experiments were carried out in a shaded greenhouse environment at 21 ± 2 °C in the Institute of Horticultural Production Systems, Herrenhäuserstr. 2, 30419 Hannover, Germany. Size of the greenhouse cabinet was 10 m × 10 m. Choice experiments were performed in flight cages (size: 1.2 m × 6.0 m × 2.0 m—see Fig. 1) made of white mesh, arranged in the middle of the greenhouse. Cages were placed in a distance of 2 m to each other on the long side and more than 2 m in each direction to the heating system. Flight cages were used to enable removing of unsettled insects from the experimental arena for sequential repetitions of the experiment. Additional light (Son-t Agro 400 W) was applied during experiments from 6 am to 10 pm.

Flight cages were divided into three compartments (Fig. 1): the whiteflies release area in the middle and one settlement plot on each side of the cage. These plots consisted of plants, placed in a square (32 cm × 32 cm planting distance). One of the treatment plots contained a modified light-based insect repellent device based on a patented concept (Rakoski and Stukenberg 2018) around the plants. The device consisted of LED Panels, made from 2 mm steel sheets (450 mm × 50 mm × 120 mm). Each panel had three high power (HP) LEDs (blue, 470 nm peak, 2.5 W, 3.5 V, 700 mA, constant current, Art.nr. 77800045, World trading Net GmbH, Bleicherode, Germany) fixed with thermal conductive double-sided adhesive tape (Ak-tt12-80, Akasa Ltd., Greenford, UK) one in the middle of the panel, the other two also centrally in 20 cm distance to the first. Constant current was realised with LED drivers (DC Mini Jolly 123400, TCI, Saronno Italy). The control cage remained without a device (blue bars in Figs. 1 and 2).

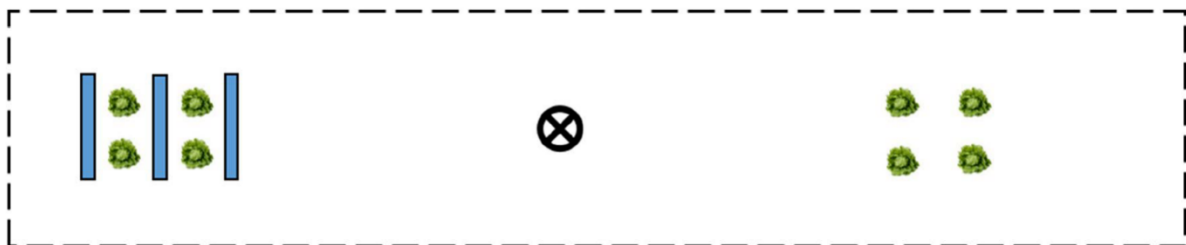


Fig. 1 Experiment setup phase I/II schematic. Flight trials in gauze tents (6 m × 1.2 m × 2 m) shown as scattered line, = ⊗ take-off point. Three LED panels (blue bars, control treatment without). Plant ratio

4:4, plant spacing 32 cm × 32 cm. Experimental plants: *Lactuca sativa* L. (iceberg lettuce), BBCH 16–18; *Euphorbia pulcherrima* (poinsettia), cuttings (8–10 leaves) in a pot (Ø 12 cm; H = 12 cm)



Fig. 2 Experiment setup phase II/II schematic. Flight trials in gauze tents (6 m × 1.2 m × 2 m) shown as scattered line, = ⊗ take-off point. Six LED panels (blue bars, control treatment without). Plant ratio

10:2, plant spacing 32 cm × 32 cm. Experimental plants: *Lactuca sativa* L. (iceberg lettuce), BBCH 16–18

Experimental design

Phase I/II: Test on suitability of the light emitting device with different plant architectures We conducted two different types of choice experiments to gain different kinds of information. The first experiment was a 2-choice experiment. Aim of the experiment was to “calibrate” the device (Is it working as described in the patent publication?) and to check if plant height had an influence on the effectiveness of the device, or if the height of the repelling device had to be adjusted to plant height. On each side of the flight cages, four plants were arranged in a square as described before. Three LED panels were placed between the “rows”. First experiment was done with *T. vaporariorum* only, but with two different plant species (Poinsettia and Lettuce) and types of plant architecture (upright branched and compact rosette) blockwise in two chronologically separated trials. To exclude possible influence of odours by the plants, experiments with *E. pulcherrima* were separated from those with *L. sativa*. Each trial (experiments per day) consisted of a control and two experimental variants. The control showed no LED panels regardless the side of the flight cage. The two variants only differ in the direction, where the panels were placed. One cage with LEDs was in direction north south, the other with LEDs south north. Three trials per day were conducted in three equal flight cages as described before, which were changed in position randomly (*L. sativa* n = 27, *E. pulcherrima* n = 12). In every trial and repetition, 25 insects were released. 24 h later settled insects on plants were counted.

Phase II/II: Testing the stability of the preliminary results with a changed plant ratio Since no effect was shown by orientation or plant architecture on the performance of the device, the second type of experiment was designed to test the effect of the light-based device under more practical conditions. The number of plants on one side of the flight cage, surrounded by LEDs, was set up to 10; the number of panels was six. On the other side of the cage, 2 trap plants were placed. *Nasonovia ribisnigri* and *T. vaporari-*

orum were used in the experiments. To exclude influences of the insect species on each other, trials with *N. ribisnigri* were block wise chronologically separated from those with *T. vaporariorum*. For all trials (and repetitions) in the second experiment, *L. sativa* was used as experimental plant (*T. vaporariorum* n = 16, *N. ribisnigri* n = 12). In every trial, one cage contained LEDs and a control cage remained with no LED panels (blue bars in Fig. 2). Orientation of cages was changed daily.

Statistics

Statistic was done using the software R (R Core Team 2017). Since the observations were based on the proportions of recaptured insects on plants with LED illumination or without, we use this proportion as response variable for model building and graphical representation. Generalised linear models with quasibinomial distribution were fitted. Explanatory factors were the treatment (LED, No LED) and the date of the consecutive trials (block factor). Based on this model, ANOVA was run and pairwise mean comparisons of the effects of the LED treatments were done using the emmeans package (Lenth 2018). All tests were run with $\alpha = 0.05$. Graphics were made using R Studio (RStudio Team 2015) and the ggplot2 (Wickham 2016) package.

Results

The proportion of recaptured *T. vaporariorum* (insects on LED plants/insects on LED and No LED plants) 24 h after release on treated (LED) and untreated (No LED) *Lactuca sativa* plants is shown in Fig. 3a. The proportion of *T. vaporariorum* settled on treated plants LED was 0.44 at maximum; minimum was 0.0 (six times) with a mean value of 0.12. The control plants (No LED) showed a mean proportion of 0.53 with a maximal value of 0.7 and a minimum of 0.4. The corresponding graph for the proportion of recaptured *T. vaporariorum* 24 h after release on treated (LED) and untreated (No LED) *Euphorbia pulcherrima* plants is

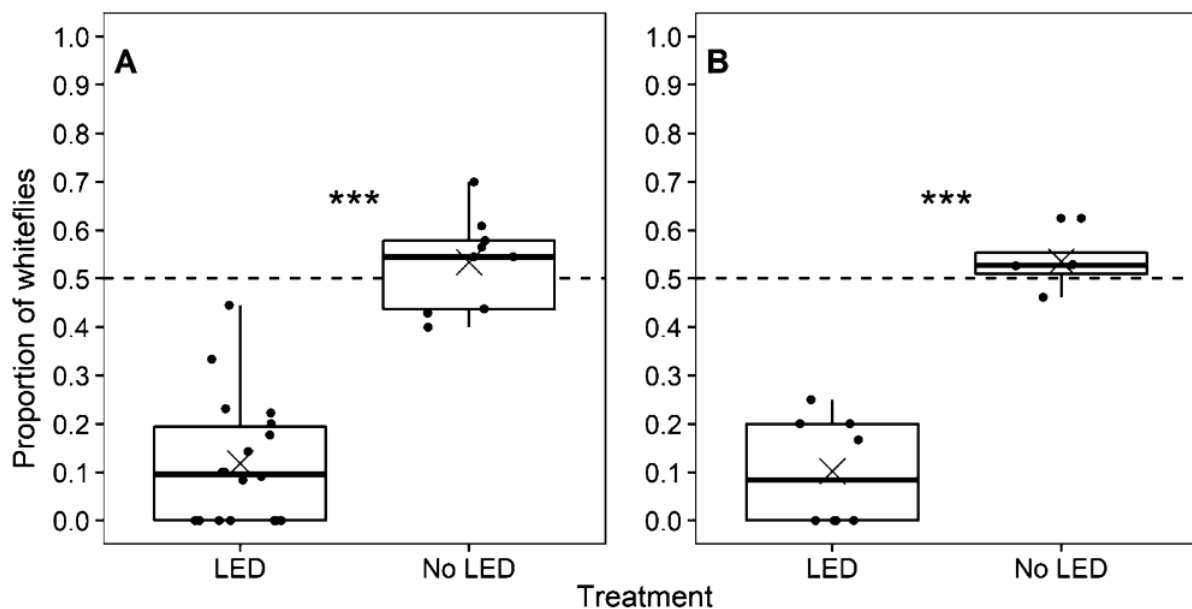


Fig. 3 Proportion of *Trialeurodes vaporariorum* on *Lactuca sativa* (a) or *Euphorbia pulcherrima* (b) plants with (LED) or without (No LED) LED-repelling device ($n=27$ (a), $n=12$ (b), Plant ratio 4:4).

Mean values are marked with crosses, 0.5 proportion is indicated by dashed line. Pairwise mean comparisons significance codes: *** $\rho < 0.001$, ** $\rho < 0.01$, * $\rho < 0.05$

shown in Fig. 3b. The treated plants (LED) showed a mean proportion of 0.10 with a maximal value of 0.25 and a minimum of 0.0 (four times). The proportion of *T. vaporariorum* on untreated plants was 0.63 at maximum; minimum was 0.46 with a mean value of 0.54. The treatment with the narrow-banded blue 470 nm LEDs showed significant reduction in the number of whiteflies settling on both plant species during the experiment, compared to the non-treated plants.

Figure 4a shows the proportion of recaptured *N. ribisnigri* (insects on LED plants/insects on LED and No LED plants) 24 h after release on treated (LED) and untreated (No LED) *Lactuca sativa* plants. The treated plants showed a mean proportion of 0.35 with a maximal value of 0.63 and a minimum of 0.14. The proportion of *N. ribisnigri* on untreated plants was 0.6 at maximum; minimum was 0.38 with a mean value of 0.47. It is obvious from the graph

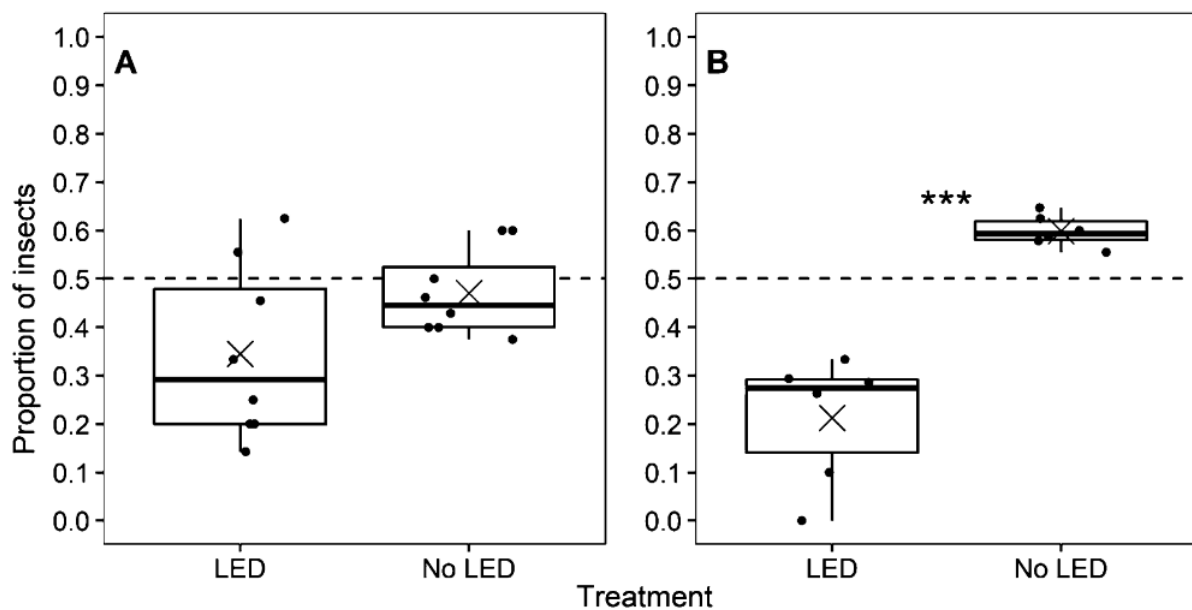


Fig. 4 Proportion of *Nasonovia ribisnigri* (a) or *Trialeurodes vaporariorum* (b) on *Lactuca sativa* plants with (LED) or without (No LED) LED-repelling device ($n=16$ (a), $n=12$ (b), Plant ratio 10:2). Pairwise mean comparisons significance codes: *** $\rho < 0.001$, ** $\rho < 0.01$, * $\rho < 0.05$

that only a slight but not significant reduction in settling aphids could be determined.

A corresponding graph for *T. vaporariorum* is given in Fig. 4b. The proportion of recaptured *T. vaporariorum* on treated plants (LED) was 0.33 at maximum; mean was 0.21 with a minimum of 0.0. For untreated plants (No LED), the proportion was 0.65 at maximum; mean was 0.60 with a minimum of 0.55. The proportion of recaptured *T. vaporariorum* was higher than in the first experiment (Fig. 3) but still significantly reduced, compared to the non-treated plants.

Discussion

The results showed that the light repelling device is especially suitable for reducing the alighting and settlement of *T. vaporariorum*. As we used LEDs with 470 nm (blue), the experiment is a proof for the proposed blue–green opponency (Stukenberg and Poehling 2019) of this species.

For *N. ribisnigri*, there seems to be only a slight repellent effect, not statistically significant. The recapture rate for *N. ribisnigri* was lower than of *T. vaporariorum*, which was probably caused by the strong motivation for long distance dispersal of the summer migrants only available for the studies (Kennedy et al. 1961; Moericke 1955). For various species, it has been shown that winged aphids (Johnson 1958; Kennedy and Booth 1963) and other insects (Graham 1959) are attracted to light before their maiden flight and that this dispersal impulse is suppressed by flight, or even long walking distances. Since aphids are not able to settle and reproduce on a host when in the dark (Johnson 1958, 1959) flight seems to be a positive trigger for alighting, settlement and larviposition in addition to, but not because of its effect on light responses (Kennedy and Booth 1963).

Another reason for the different reaction of both species may be the morphology of the visual system. *Trialeurodes vaporariorum* eyes are divided in a dorsal region with 54 to 55 ommatidia and a ventral region with 29 to 31 ommatidia per eye (Mellor et al. 1997). For *N. ribisnigri*, there are no available data about number of ommatidia, but a study by Döring and Spaethe (2009) showed a median number of 165 ommatidia for 14 aphid species. Since the lowest number of ommatidia in the mentioned study was 127 (*Rhopalosiphum padi* L.) per eye, we assume a better visual acuity and resolution for *N. ribisnigri* eyes than for those of *T. vaporariorum* based on the different number of ommatidia. This could enable *N. ribisnigri* to distinguish the lettuce from the background despite the disturbing blue illumination from below. However, influences of divided eyes (whiteflies) and spherical eyes (aphids) on field of vision and resolution are unknown.

Other materials, besides the repellent LEDs, showed the spectral peak at 470 nm mentioned before (blue foils, white

foils, silver/reflective foils) but do not consistently show the expected repellent effect (Greer and Dole 2003). This indicates that the triggering or prevention of the alighting approach is not only determined by the individual wavelength, but that the mechanism is subject to a complex interaction of various light parameters. According to Antignus (2000; Vaishampayan et al. 1975a), to be able to distinguish a potential host from its surroundings, these parameters are primarily the dominant emitted hue or the **maximum wavelength** (1), the **colour saturation** (2) and the **brightness** (light intensity) compared to the surroundings (3). In the present study, with the orientation of the LEDs from the ground upwards, the radiated hue was enriched with a dominant wavelength of 470 nm. This added blue hue (470 nm) was narrow-banded and therefore very pure in hue. The results showed that the blue–green opponency for *T. vaporariorum* described by Stukenberg and Poehling (2019) is also valid for illumination from the ground in a practical application with LEDs.

The results in the present study showed a strong effect of blue LED illumination from the ground on the settlement of *T. vaporariorum* initiated by the narrow-band blue light emission at 470 nm. Since the number of alighting whiteflies could not be reduced to zero, for practical use a combination of the light repelling device with secondary measures will be necessary, depending on respective threshold value of the cultivated plant. Especially in fast growing crops with low thresholds for insect damage (e.g. lettuce, seeding nurseries), a combination of optical manipulation and strict monitoring could reduce the number of necessary insecticide applications or other intervening measures. This method could be applied in organic growing as in conventional practice.

Practical application could be promising for greenhouse cultures with high output (e.g. nurseries, fast growing herbs) or high plant values (e.g. medicinal plants). For outdoor use in field cultures, the device would have to be adapted, but LED systems for field use are not implementable economically. To use the repellent effect of the light in the blue range under field conditions, an optical system could be involving reflecting mulch foils with high intensive but narrow-banded reflection, or foil tunnels with high transmission, in the blue range (420–500 nm). However, it is not possible to estimate how stable this effect would be in the field with appropriate foil materials under changed light conditions (compared to the greenhouse), as films also showing reflection effects (e.g. light polarisation, soil effect). Such materials are not commercially available now.

Since only a few model insects can be used for comparisons, further investigation of these optical mechanisms would be desirable. Further studies, both on contrast behaviour and on colour orientation by insects, are necessary to understand the mechanisms in more detail. The use of optical manipulation for plant protection is offering many tools

for application, most of them are compatible with other integrated measures in organic farming.

It has always to be kept in mind that the plant production has to stay in focus, and possible side-effects on growth and quality of the product have to be avoided (Paul et al. 2005, 2012). In addition, for use in practice a light-based repellent device has to be tested with natural occurring and/or introduced natural enemies of the targeted pest species, to exclude negative effects on their performance. They have to be adjusted according to plant species, production system and other integrated pest management measurements. The results in this first study about optical manipulation of sucking insects by light-emitting devices from the ground are a very promising basis for further studies under more practical conditions.

Acknowledgements This work was funded by the Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Germany, under the Grant No. 22008214/14NR082. We like to acknowledge Dr. Niklas Stukenberg and M.Sc. Mirko Rakoski for the possibility to use the patented “Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten” (DE 10 2018 208 424 B3) as a model for our experimental setup.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

References

- Antignus Y (2000) Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. *Virus Res* 71:213–220. [https://doi.org/10.1016/S0168-1702\(00\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1702(00)00199-4)
- Antignus Y, Ben-Yakir D (2004) Ultraviolet-absorbing barriers, an efficient integrated pest management tool to protect greenhouses from insects and virus diseases. In: Horowitz AR, Ishaaya I (eds) *Insect pest management: field and protected crops*. Springer, Berlin, pp 319–335
- Antignus Y, Nestel D, Cohen S, Lapidot M (2001) Ultraviolet-deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior. *Environ Entomol* 30:394–399. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-30.2.394>
- Byrne DN, Bellows TS (1991) Whitefly biology. *Annu Rev Entomol* 36:431–457. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.36.010191.002243>

- Coombe PE (1981) Wavelength specific behaviour of the whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *J Comp Physiol* 144:83–90. <https://doi.org/10.1007/BF00612801>
- Dáder B, Moreno A, Gwynn-Jones D, Winters A, Fereres A (2017) Aphid orientation and performance in glasshouses under different UV-A/UV-B radiation regimes. *Entomol Exp Appl* 163:344–353. <https://doi.org/10.1111/eea.12583>
- Díaz BM, Biurrún R, Moreno A, Nebreda M, Fereres A (2006) Impact of ultraviolet-blocking plastic films on insect vectors of virus diseases infesting crisp lettuce. *HortScience* 41:711–716. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.3.711>
- Díaz BM, Muñoz M, Barrios L, Fereres A (2007) Temperature thresholds and thermal requirements for development of *Nasonovia ribisnigri* (Hemiptera: Aphididae). *Environ Entomol* 36:681–688. [https://doi.org/10.1603/0046-225X\(2007\)36\[681:ttatrf\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1603/0046-225X(2007)36[681:ttatrf]2.0.co;2)
- Döring TF, Chittka L (2007) Visual ecology of aphids—a critical review on the role of colours in host finding. *Arthropod Plant Interact* 1:3–16. <https://doi.org/10.1007/s11829-006-9000-1>
- Döring TF, Spaethe J (2009) Messungen der Augengröße und Sehschärfe bei Blattläusen (Hemiptera: Aphididae). *Entomologia* 32:77–84. <https://doi.org/10.1127/entom.gen/32/2009/77>
- Döring TF, Kirchner SM, Skorupsky P, Hardie J (2011) Spectral sensitivity of the green photoreceptor of winged pea aphids. *Physiol Entomol* 36:392–396. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2011.00805.x>
- Doukas D, Payne CC (2007) Greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) dispersal under different UV-light environments. *J Econ Entomol* 100:389–397. <https://doi.org/10.1093/jee/100.2.389>
- Farnier K, Dyer AG, Steinbauer MJ (2014) Related but not alike: not all Hemiptera are attracted to yellow. *Front Ecol Evol* 2:263. <https://doi.org/10.3389/fevo.2014.00067>
- Goodman LJ (1965) The role of certain optomotor reactions in regulating stability in the rolling plane during flight in the desert locust, *Schistocerca Gregaria*. *J Exp Biol* 42:385–407
- Gorman K, Hewitt F, Denholm I, Devine GJ (2002) New developments in insecticide resistance in the glasshouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) and the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) in the UK. *Pest Manag Sci* 58:123–130. <https://doi.org/10.1002/ps.427>
- Gorman K, Devine G, Bennison J, Coussons P, Punched N, Denholm I (2007) Report of resistance to the neonicotinoid insecticide imidacloprid in *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Pest Manag Sci* 63:555–558. <https://doi.org/10.1002/ps.1364>
- Graham K (1959) Release by flight exercise of a chemotropic response from photopositive domination in a Scolytid Beetle. *Nature* 184:283–284. <https://doi.org/10.1038/184283b0>
- Greer L, Dole JM (2003) Aluminum foil, aluminium-painted, plastic, and degradable mulches increase yields and decrease insect-vectored viral diseases of vegetables. *HortTechnology* 13:276–284. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.13.2.0276>
- Hardie J (1989) Spectral specificity for targeted flight in the black bean aphid, *Aphis fabae*. *J Insect Physiol* 35:619–626. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(89\)90124-8](https://doi.org/10.1016/0022-1910(89)90124-8)
- Holman J (2009) Host plant catalog of aphids: Palaearctic Region. Springer, Dordrecht, p 468
- IOBC-WPRS, IBMA, PAN-Europe (2019) Integrated pest management: working with nature. https://www.iobc-wprs.org/index_news_Resouces_on_IPM.html. Accessed 11 Feb 2020
- Johansen NS, Vänninen I, Pinto DM, Nissinen AI, Shipp L (2011a) In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest management in greenhouse crops. *Ann Appl Biol* 159:1–27. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x>
- Johansen NS, Eriksen AS, Mortensen L (2011b) Light quality influences trap catches of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) and

- Trialeurodes vaporariorum* (Westwood). IOBC/WPRS Bull 68:89–92
- Johnson B (1958) Factors affecting the locomotor and settling responses of alate aphids. *Anim Behav* 6:9–26. [https://doi.org/10.1016/0003-3472\(58\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0003-3472(58)90004-6)
- Johnson B (1959) Studies on the degeneration of the flight muscles of alate aphids—II. Histology and control of muscle breakdown. *J Insect Physiol* 3:367–377. [https://doi.org/10.1016/0022-1910\(59\)90039-3](https://doi.org/10.1016/0022-1910(59)90039-3)
- Kennedy JS, Booth CO (1963) Free flight of aphids in the laboratory. *J Exp Biol* 40:67–85. <https://doi.org/10.1242/jeb.40.1.67>
- Kennedy JS, Booth CO, Kershaw WJ (1961) Host finding by aphids in the field. *Ann Appl Biol* 49:1–21. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1961.tb03587.x>
- Kift NB, Mead A, Reynolds K, Sime S, Barber MD, Denholm I, Tatchell GM (2004) The impact of insecticide resistance in the currant-lettuce aphid, *Nasonovia ribisnigri*, on pest management in lettuce. *Agric Entomol* 6:295–309. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9555.2004.00226.x>
- Kim K-N, Huang Q-Y, Lei C-L (2019) Advances in insect phototaxis and application to pest management: a review. *Pest Manag Sci* 75:3135–3143. <https://doi.org/10.1002/ps.5536>
- Kirchner SM, Döring TF, Saucke H (2005) Evidence for trichromacy in the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae). *J Insect Physiol* 51:1255–1260. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2005.07.002>
- Kumar P, Poehling H-M (2006) UV-blocking plastic films and nets influence vectors and virus transmission on greenhouse tomatoes in the humid tropics. *Environ Entomol* 35:1069–1082. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-35.4.1069>
- Legarra S, Weintraub PG, Plaza M, Viñuela E, Fereres A (2012a) Dispersal of aphids, whiteflies and their natural enemies under photosensitive nets. *Biocontrol* 57:523–532. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9430-2>
- Legarra S, Betancourt M, Plaza M, Fraile A, García-Arenal F, Fereres A (2012b) Dynamics of nonpersistent aphid-borne viruses in lettuce crops covered with UV-absorbing nets. *Virus Res* 165:1–8. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2011.12.012>
- Lenth R (2018) Emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.2.3. <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>. Accessed 14 July 2020
- Luo C, Jones CM, Devine G, Zhang F, Denholm I, Gorman K (2010) Insecticide resistance in *Bemisia tabaci* biotype Q (Hemiptera: Aleyrodidae) from China. *Crop Prot* 29:429–434. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2009.10.001>
- Mellor HE, Bellingham J, Anderson M (1997) Spectral efficiency of the glasshouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* and *Encarsia formosa* its hymenopteran parasitoid. *Entomol Exp Appl* 83:11–20. <https://doi.org/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 I. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie* 37:29–91. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1955.tb00775.x>
- Moericke V (1962) Über die optische Orientierung von Blattläusen. *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie* 50:70–74. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1962.tb04410.x>
- Moericke V (1969) Hostplant specific colour behaviour by *Hyalopterus pruni* (Aphididae). *Entomol Exp Appl* 12:524–534. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1969.tb02550.x>
- Mound LA, Halsey SH (1978) Whitefly of the world: a systematic catalogue of the Aleyrodidae (Homoptera) with host plant and natural enemy data. British Museum (Natural History) and Wiley, London
- Mutwiwa UN, Borgemeister C, Bv E, Tantau H-J (2005) Effects of UV-absorbing plastic films on greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). *J Econ Entomol* 98:1221–1228. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-98.4.1221>
- Mutwiwa UN, Tantau HJ (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) E-Journal 2005
- Niemann J-U, Menssen M, Poehling H-M (2021) Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils. *J Plant Dis Prot* 128:97–108. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00394-y>
- Nottingham SF, Hardie J, Tatchell GM (1991) Flight behaviour of the bird cherry aphid, *Rhopalosiphum padi*. *Physiol Entomol* 16:223–229. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1991.tb00559.x>
- Park J-H, Lee H-S (2017) Phototactic behavioral response of agricultural insects and stored-product insects to light-emitting diodes (LEDs). *Appl Biol Chem* 60:137–144. <https://doi.org/10.1007/s13765-017-0263-2>
- Paul ND, Jacobson RJ, Taylor A, Wargent JJ, Moore JP (2005) The use of wavelength-selective plastic cladding materials in horticulture: understanding of crop and fungal responses through the assessment of biological spectral weighting functions. *Photochem Photobiol* 81:1052–1060. <https://doi.org/10.1562/2004-12-06-RA-392>
- Paul ND, Moore JP, McPherson M, Lambourne C, Croft P, Heaton JC, Wargent JJ (2012) Ecological responses to UV radiation: interactions between the biological effects of UV on plants and on associated organisms. *Physiol Plant* 145:565–581. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01553.x>
- Prokopy RJ, Owens ED (1983) Visual detection of plants by herbivorous insects. *Annu Rev Entomol* 28:337–364. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.28.010183.002005>
- R Core Team (2017) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rakoski M, Stukenberg N (2018) “Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten“ DE 10 2018 208 424 B3; Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten (DE 10 2018 208 424 B3)
- Hommel M, Siekmann G, Piepenbrock O, Baur U, Fricke A, Thieme T (2003) Reduzierung des Blattlausbefalls an ausgewählten Gemüsekulturen durch Mulchen mit verschiedenen Materialien und Farben. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn, Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau. <https://orgprints.org/16630/>. Accessed 5 Feb 2020
- Reinink K, Dieleman FL (1993) Survey of aphid species on lettuce. *Bull OILB/SROP* 16:56–68
- RStudio Team (2015) RStudio: Integrated Development for R. RStudio Inc., Boston, MA. <http://www.rstudio.com/>
- Rufingier C, Schoen L, Martin C, Pasteur N (1997) Resistance of *Nasonovia ribisnigri* (Homoptera: Aphididae) to five insecticides. *J Econ Entomol* 90:1445–1449. <https://doi.org/10.1093/jee/90.6.1445>
- Shimoda M, Honda K (2013) Insect reactions to light and its applications to pest management. *Appl Entomol Zool* 48:413–421. <https://doi.org/10.1007/s13355-013-0219-x>
- Shimoda M (2018) Recent advances in the optical control of insect pests using light and color. In: Proceedings of the 2018 international symposium on proactive technologies for enhancement of integrated pest management of key crops, pp 87–102. <http://210.69.150.18:8080/handle/345210000/9855>. Accessed 12 Feb 2020
- Straw NA, Williams DT, Green G (2011) Influence of sticky trap color and height above ground on capture of alate *Elatobium abietinum* (Hemiptera: Aphididae) in Sitka spruce plantations. *Environ Entomol* 40:120–125. <https://doi.org/10.1603/EN09344>
- Stukenberg N, Poehling H-M (2019) Blue-green opponency and trichromatic vision in the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) explored using light emitting diodes. *Ann Appl Biol* 175:146–163. <https://doi.org/10.1111/aab.12524>

- Stukenberg N, Gebauer K, Poehling H-M (2015) Light emitting diode(LED)-based trapping of the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). J Appl Entomol 139:268–279. <https://doi.org/10.1111/jen.12172>
- Stukenberg N (2018) LED based trapping of whiteflies and fungus gnats: from visual ecology to application. PhD thesis
- Vaishampayan SM, Waldbauer GP, Kogan M (1975a) Visual and olfactory responses in orientation to plants by the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera : Aleyrodidae). Entomol Exp Appl 18:412–422. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1975.tb00418.x>
- Vaishampayan SM, Kogan M, Waldbauer GP, Wooley JT (1975b) Spectral specific responses in the visual behavior of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). Entomol Exp Appl 18:344–356. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.1975.tb00407.x>
- Wickham H (2016) Ggplot2: elegant graphics for data analysis. Use R! Springer, Cham
- Zhang J, Li H, Liu M, Zhang H, Sun H, Wang H, Miao L, Li M, Shu R, Qin Q (2020) A greenhouse test to explore and evaluate light-emitting diode (LED) insect traps in the monitoring and control of *Trialeurodes vaporariorum*. Insects. <https://doi.org/10.3390/insects11020094>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

5. Diskussion und Ausblick

Pflanzenschutzmittel und deren Einsatz werden in Gesellschaft und Politik seit Jahren kritisch hinterfragt, primär aus ökologischen Gründen. Die zunehmende Einschränkung der Verfügbarkeit von Wirkstoffen mit unterschiedlichen Wirkungsmechanismen erhöhen das Risiko von Resistenzbildungen bei vielen Schadinsekten, was insgesamt eine große Herausforderung an den Integrierten Pflanzenschutz darstellt. Physikalische Methoden können zusammen mit Kulturmaßnahmen zur Pflanzung/Aussaart eine erste Barriere bilden, um insbesondere die Zuwanderung migrierender Schadinsekten in Pflanzenbestände einzudämmen und sind damit, selbst wenn sie schon prophylaktisch etabliert werden müssen, ein Grundstein für nachhaltige Strategien im Integrierten Pflanzenschutz.

5.1. Der Effekt der „optische Barriere“ im Versuch

In allen drei hier präsentierten Versuchsansätzen zu der physikalischen Maßnahme „optische Barriere“ konnte eine, verglichen mit „unbehandelten“ Kontrollen, signifikante Reduktion des Zufluges der betrachteten Schadinsekten erreicht werden. Dies zeigt das hohe Potenzial, dass in derartigen optischen Methoden des Integrierten Pflanzenschutzes steckt.

Die Ergebnisse aus den Versuchen mit *A. proletella* und *T. vaporariorum* (siehe 2.) zeigen, dass die Reaktionsstärke auf optische Reize stark mit der Fähigkeit, alternative Reize für die Wirtsfindung nutzen zu können, verknüpft ist. Da *A. proletella* auch zur olfaktorischen Orientierung in Richtung Wirtspflanze fähig ist (Butler 1938), kann hierdurch die eingeschränkte optische Fähigkeit zumindest teilweise kompensiert werden. Die weißen Folien mit einem breiten Reflektionsspektrum zeigten den größten Einfluss auf den Befall mit *T. vaporariorum*. Für Gewächshauskulturen könnte also, je nach Anbausystem (auf dem Boden, auf Tischen) die Fläche, auf der die Pflanzen stehen, geweißt werden, um den Befall zu senken. Da die Tiere im Gewächshaus aber wenig Möglichkeiten nach der optischen Irritation haben, über einen ausgeprägten Distanzflug den Pflanzenbestand zu verlassen und damit einzelne Individuen immer wieder in Pflanzennähe und damit den Einfluss der olfaktorischen Attraktion geraten, sind weitere Maßnahmen wie z.B. Fallen in ein System zum Integrierten

Pflanzenschutz mit einzuplanen. Im Freiland sollte der Effekt ausgeprägter sein, eine Stabilität über die Kulturzeit muss aber noch kritisch analysiert werden, da insbesondere Verschmutzungen, je nach Standort, einen über die Kulturzeit ansteigenden negativen Einfluss auf das reflektierte Spektrum und vor allem dessen Intensität haben können. Betrachtet man die möglichen optischen Mechanismen, die den beobachteten repellenten Effekten zugrunde liegen können, muss berücksichtigt werden, dass die Versuche in einem Glasgewächshaus stattfanden und die verwendete Folie unter 380 nm nur minimal reflektierte (Absorption kurzwelliger Strahlung durch das Glas). Damit war der Faktor UV ausgeschlossen in diesem Versuch. Daraus folgt, dass der stark repellente Effekt der Folie wahrscheinlich auf die Reflektion im blauen Bereich um 470 nm zurückzuführen ist, die in den Arbeiten von Stukenberg et al. (2018a; 2019; 2018) als inhibitorischer Faktor im sog. Blau-Grün-Antagonismus herausgearbeitet wurden. Dies muss für die vorliegende Forschungsarbeit sicher als größte Erkenntnis aus diesem Versuch gewertet werden. Da für die letzte Feldsaison keine Anpassung der Sprühfolienfarbe mehr möglich war, wurden, um den Effekt von blauem Licht zu untersuchen alternativ Versuche unter kontrollierten Bedingungen mit engbandigen LEDs (Diskussion siehe 4.) ausgearbeitet, um dieser Frage weiter nachgehen zu können. Bezüglich der grünen Folien, die ebenfalls einen Effekt zeigten, wurden in den Freilandversuchen (Diskussion siehe 3.) weitere Untersuchungen durchgeführt, auch im Hinblick darauf, ob die kleinen Versuchsplots die Maskierung der Pflanzen im Gewächshausversuch mit den Weiße Fliegen Arten den Bekämpfungserfolg limitiert hatten. Die Versuche zeigten einen Einfluss der grünen Folien auf, jedoch nicht statistisch signifikant, oder für eine Bekämpfungsstrategie ausreichend. Dies liegt vermutlich daran, dass die Insekten nicht aktiv vertrieben werden, sondern das genaue Ziel nur maskiert wird. Das bedeutet, dass die Zahl der landenden Individuen, die den Wirt direkt, oder nach dem Landen durch weitere Suche finden, in einem deutlich größeren Maße vom Zufall abhängt. Anders ist dies bei Maßnahmen, die durch repellente (blau) oder verwirrendes Licht (UV) schon die Landerate der Insekten senken. Hier wäre ein veränderter Ansatz, dass man die grüne Folie durch eine lebende Untersaat ersetzt, die zusätzlich zu dem maskierenden Farbeffekt eine Art Reservoir für Nützlinge darstellen kann, um den Gesamteffekt der Maßnahme zu steigern.

5.2.Effekt des Hintergrundes und der Oberflächenstruktur

Interessant waren die Ergebnisse zu schwarzen Folien, gewonnen aus den Versuchen mit Sprühfolien. Da die Sprühfolie in den Freilandversuchen (3.) im Gegensatz zum Boden nicht nur eine andere Reflektion, sondern auch eine andere Oberflächenstruktur zeigt, konnte nicht abschließend geklärt werden, ob in diesem System das reflektierte Lichtspektrum oder aber auch die Oberflächenbeschaffenheit ausschlaggebend für den verringerten Zuflug bei den schwarzen Folien war. Gerade hier liegt aber auch die größte entomologische Erkenntnis dieses Versuches, denn wenn die beiden schwarzen Varianten repellent wirken, aber keine spezifischen Peaks im reflektierten Spektrum aufweisen, muss ein weiterer nicht definierter Faktor vorhanden sein, über den ohne weitere Grundlagenforschung nur spekuliert werden kann. Schon Moericke (1955) beschrieb den sogenannten „Erdfaktor“; Hiermit ist kurz gesagt gemeint, dass schwarzer Mulch als Hintergrund für Pflanzen trotz höherem Kontrast zur Pflanze, der eigentlich die gezielte punktuelle Pflanzenbesiedlung steuern sollte, weniger Zuflug von Blattläusen zeigt, als Pflanzen auf offenem Boden (siehe 1.3; Johnson et al. 1967; Jones und Chapman 1968; Smith 1976; Brust 2000; Finch und Collier 2000). Für die Interpretation dieses „Erdfaktors“ müssten aber vergleichende Analysen des Reflektionsverhaltens der unterschiedlichen Substrate vorliegen, was bisher nicht der Fall ist. Neben den Reflektionseigenschaften von Erden oder schwarzen Folien im Bestand als Einflussfaktor auf den Zuflug ist auch mögliches Verhalten (Weiterfliegen) nach dem Landen einzubeziehen, auch angemerkt durch verschiedene Autoren (Finch und Collier 2000; Döring 2014). Vorliegende Untersuchungen unterscheiden nicht zwischen zufliegenden Tieren, die im Pflanzenbestand verbleiben und denen, die landen und weiterfliegen.

5.3.Kritische Versuchsstruktur Freilandversuch

Obwohl die Freilandversuche in insgesamt fünf Sätzen wiederholt wurden, gab es nur bei einem Versuch Blattlausbefall, der im Produkt, also dem handelsüblich geputzten Salatkopf, nachweisbar war. Dies zeigt, dass gerade im Bereich des Monitorings noch große Potenziale für eine Reduktion von chemischen Pflanzenschutzmitteln und anderen interventiven Maßnahmen vorhanden sind. Das Versuchsdesign sollte für zukünftige Versuche mindestens zu einem 4x4 lateinischen Quadrat verändert werden. Die streifenweise Zuordnung der Versuchsflächen ließ dies zum damaligen Zeitpunkt noch nicht zu. Die mehrfache Bonitur derselben Pflanzen im Versuchsfeld

(statt einer randomisierten Rotation der Boniturpflanzen) ist statistisch betrachtet nicht optimal. Dadurch, dass die Bonituren bis zum Initialbefall jedoch berührungslos durchgeführt wurden, wird ein möglicher Einfluss hier als gering eingestuft. Zudem war es nur durch die festgelegten Raster, in denen die Boniturpflanzen standen möglich den Befall vom Rand des Feldes her zu untersuchen. Angepasst werden sollte die Zahl von Rand- und Innenpflanzen um die statistische Auswertung zu erleichtern.

5.4. Anwendung und Probleme der entwickelten Sprühfolie

Die im Projekt entwickelte Sprühfolie zeigte bei der Anwendung im Freiland das Problem auf, dass die Lösung beim Aushärten auf dem Erdboden Komplexe eingeht, die nicht mehr als „einfach biologisch abbaubar“ gelten können. Die Labortests mit Bodenproben aus dem Freiland zeigten dementsprechend schlechte Abbauwerte, woraufhin dieser Ansatz verworfen wurde. Um die Umsetzbarkeit in die Praxis zu ermöglichen und den Anteil von 100 % abbaubaren Materialien deutlich zu erhöhen, wurde die Idee entwickelt ein Vlies aus Zellulose nur minimal zu beschichten, um einen pflanzenbaulich, als auch phytomedizinisch gleichen Effekt wie klassische Folien zu erreichen. Daneben wird somit auch das Komplexbildungsproblem bei der Sprühapplikation umgangen und das beschichtete Vlies soll mit derselben Technik verlegt werden können wie konventionelle Mulchfolien. Die Projektidee wurde beim FNR als Skizze und Antrag eingereicht und das Projekt „VliesFilm“ startet am 01.10.2023.

5.5. Die offene Zucht als ergänzende Maßnahme für ein IPM System

Gerade eine Maßnahme im Freiland müsste jedoch in einem kompletten System zum Integrierten Pflanzenschutz getestet werden. Die im Projekt erprobte offene Zucht hat sich in ersten Versuchen als sehr erfolversprechend gezeigt und konnte in Kleinparzellen den Befall signifikant senken (Poehling und Niemann 2019), und dass mit nur einmaliger Ausbringung von Nützlingen um das System zu starten. Hier wäre also ein erster möglicher Ansatzpunkt für eine Kombination der optischen Methode mit weiteren integrierten Maßnahmen im Freiland vorhanden. Die offene Zucht müsste aber für eine Nutzung im Salat noch optimiert werden, was Wuchshöhe und Beschattungsvermögen der Pflanzen angeht. Zudem wäre es vermutlich sinnvoll, die offene Zucht zum Teil als Untersaat einzubringen, damit der Platzbedarf verringert wird, da die Netzstruktur in den Versuchen relativ flächenintensiv war.

5.6. LEDs als optische Systeme für Schutz vor Schadinsekten und deren potentielle praktische Nutzung

Die LEDs, die im dritten Versuch (4.) genutzt wurden, zeigten einen sehr hohen Einfluss auf den Befall mit *T. vaporariorum*, bei *N. ribisnigri* zeigte sich auch eine Tendenz, aber keine statistische Signifikanz. Die Gründe könnten darin liegen, dass *N. ribisnigri* eine bessere optische Auflösung besitzt, als *T. vaporariorum*, und die Pflanzen trotz der repellenten Wellenlänge von 470 nm wahrnimmt. Die erhöhte Anzahl an Ommatidien bei Blattläusen, verglichen mit Weißen Fliegen, lässt auf eine bessere optische Wahrnehmung schließen (Mellor und Anderson 1995a, 1995b; Döring und Spaethe 2009). Eine andere Möglichkeit wäre, dass der erwähnte Blau-Grün-Antagonismus der bei den Blattläusen allgemein vorhanden ist, nicht bei 470 nm seine volle Intensität aufweist und LEDs mit einem anderen Wellenlängenbereich des blauen Spektrums genutzt werden müssten. Da für *N. ribisnigri*, wie schon erwähnt, Daten zu morphologischen Grundlagen und Sensitivitätsspektren fehlen, kann das ohne weitere Untersuchungen mit weiteren Wellenlängen nicht weiter nachvollzogen werden. Die Haupteckenerkenntnis aus diesem Versuch ist, dass der Blau-Grün-Antagonismus auch in einer praktischen Umgebung im Gewächshaus funktioniert. Bezogen auf *T. vaporariorum* wäre der nächste Schritt, die in den Versuchen genutzte Vorrichtung in einem größeren praktischen Umfeld zu untersuchen, z.B. einem kompletten Produktionsgewächshaus über mehrere Kulturperioden bzw. Sätze. Als besonders interessant ist hier sicher die Produktion von Pflanzen ohne Einsatz von chemischen Pestiziden zu sehen, z.B. Bio-Produktion von Jungpflanzen oder Arzneimittelpflanzen. Auch Versuche mit weiteren Schädlingen wären interessant, sind bisher aber nicht durchgeführt worden.

Im Gesamtkontext muss bei der Nutzung einer strombetriebenen Anlage für den Pflanzenschutz natürlich beachtet werden, dass die konventionelle Stromproduktion aus endlichen Ressourcen mit deren Verbrauch und Umweltverschmutzung einhergeht, die ja reduziert werden sollen. Die Herkunft des Stroms ist damit, neben dem Preis, von entscheidender Bedeutung für die Nachhaltigkeit einer solchen Anlage und sollte bei Nutzung in pflanzlichen Produktionssystemen eingeplant werden.

5.7. Gesamtfazit

In dieser Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, dass eine Manipulation von herbivoren Schadinsekten mit optischen Methoden hohe Wirkungsgrade erreichen kann. In allen drei Versuchen konnte der Befall gegenüber der Kontrolle signifikant verringert werden. Weitere Forschung in dieser Richtung kann einen Beitrag leisten den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel zu minimieren. Eine Integration der einzelnen Methoden im Freiland mit weiteren Maßnahmen zum Integrierten Pflanzenschutz ist im kommenden Projekt anzustreben.

Neben dem großen Potenzial muss zum Schluss jedoch auch auf den großen Forschungsbedarf im Bereich der optischen Methoden für den Pflanzenschutz hingewiesen werden. Das Grundlagenwissen über optische Wahrnehmung von Herbivoren ist leider noch sehr gering und auf wenige Organismen beschränkt.

6. Referenzen

Referenzen aus den veröffentlichten Peer-Reviewed Artikeln (siehe **1.3**, **2.**, **3.**, **4.**) sind dort zu finden.

6.1. Literaturverzeichnis

Adlerz, W. C.; Everett, P. H. (1968): Aluminum Foil and White Polyethylene Mulches to Repel Aphids and Control Watermelon Mosaic¹. In: *Journal of Economic Entomology* 61 (5), S. 1276–1279. DOI: 10.1093/jee/61.5.1276.

Antignus, Y. (2000): Manipulation of wavelength-dependent behaviour of insects: an IPM tool to impede insects and restrict epidemics of insect-borne viruses. In: *Virus research* 71 (1-2), S. 213–220. DOI: 10.1016/S0168-1702(00)00199-4.

Antignus, Y.; Ben-Yakir, D. (2004): Ultraviolet-Absorbing Barriers, an Efficient Integrated Pest Management Tool to Protect Greenhouses from Insects and Virus Diseases. In: A. Rami Horowitz und I. Ishaaya (Hg.): *Insect pest management. Field and protected crops*. Berlin, London: Springer, S. 319–335.

Antignus, Y.; Nestel, D.; Cohen, S.; Lapidot, M. (2001): Ultraviolet-Deficient Greenhouse Environment Affects Whitefly Attraction and Flight-Behavior. In: *en* 30 (2), S. 394–399. DOI: 10.1603/0046-225X-30.2.394.

Barber, M. D.; Moores, G. D.; Tatchell, G. M.; Vice, W. E.; Denholm, I. (1999): Insecticide resistance in the currant-lettuce aphid, *Nasonovia ribisnigri* (Hemiptera: Aphididae) in the UK. In: *B. Entomol. Res.* 89 (1), S. 17–23. DOI: 10.1017/S0007485399000036.

Barrière, V.; Lecompte, F.; Nicot, P. C.; Maisonneuve, B.; Tchamitchian, M.; Lescourret, F. (2014): Lettuce cropping with less pesticides. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 34 (1), S. 175–198. DOI: 10.1007/s13593-013-0158-5.

Bhaskar, V.; Westbrook, A. S.; Bellinder, R. R.; DiTommaso, A. (2021): Integrated management of living mulches for weed control: A review. In: *Weed Technol* 35 (5), S. 856–868. DOI: 10.1017/wet.2021.52.

Blackman, R. L.; Eastop, V. F. (2000): *Aphids on the world's crops. An identification and information guide*. 2. ed. New York: Wiley.

BMEL (2017): Nationaler Aktionsplan Pflanzenschutz. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/NAP-NationalerAktionsplanPflanzenschutz2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 14.04.2023.

BMEL (2022): Nationaler Aktionsplan Pflanzenschutz - Integrierter Pflanzenschutz. Grundlagen und Leitlinien. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/pflanzenschutz/aktionsplan-anwendung-pflanzenschutzmittel.html>, zuletzt geprüft am 14.04.2023.

BMEL (2023a): Integrierter Pflanzenschutz - Maßnahmen. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz/pflanzenschutzmassnahmen>, zuletzt geprüft am 14.04.2023.

- BMEL (2023b): Integrierter Pflanzenschutz - Physikalische Maßnahmen. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.nap-pflanzenschutz.de/integrierter-pflanzenschutz/pflanzenschutzmassnahmen/physikalische-massnahmen>, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Briscoe, A. D.; Chittka, L. (2001): The evolution of color vision in insects. In: *Annu. Rev. Entomol.* 46, S. 471–510. DOI: 10.1146/annurev.ento.46.1.471.
- Bromley, A.K; Anderson, M. (1982): An Electrophysiological study of olfaction in the aphid *Nasonovia ribis-nigri*. In: *Entomol. Exp. Appl.* 32 (2), S. 101–110. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1982.tb03188.x.
- Brust, G. E. (2000): Reflective and black mulch increase yield in pumpkins under virus disease pressure. In: *J. Econ. Entomol.* 93 (3), S. 828–833. DOI: 10.1603/0022-0493-93.3.828.
- Bundesministerium der Justiz (2012): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz - PflSchG). Hg. v. Bundesamt der Justiz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/pflschg_2012/BJNR014810012.html, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Butler, C. G. (1938): On the ecology of *Aleurodes brassicae* Walk. (Hemiptera). In: *Transactions of the Royal Entomological Society of London* 87 (13), S. 291–311. DOI: 10.1111/j.1365-2311.1938.tb00090.x.
- CABI (2022): *Trialeurodes vaporariorum* (whitefly, greenhouse). In: *CABI Compendium* CABI Compendium, Artikel 54660. DOI: 10.1079/cabicompendium.54660.
- Castresana, J. E.; Puhl, L. E. (2016): Eficacia de diferentes diodos emisores de luz (LEDs) unidos a trampas adhesivas amarillas para la captura de la mosca blanca *Trialeurodes vaporariorum*. In: *rcia* 32 (2), S. 88. DOI: 10.22267/rcia.153202.16.
- Chyzik, R.; Dobrinin, S.; Antignus, Y. (2003): Effect of a UV-deficient environment on the biology and flight activity of *Myzus persicae* and its hymenopterous parasite *Aphidius matricariae*. In: *Phytoparasitica* 31 (5), S. 467–477. DOI: 10.1007/BF02979740.
- Coombe, P. E. (1981): Wavelength specific behaviour of the whitefly *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). In: *J. Comp. Physiol.* 144 (1), S. 83–90. DOI: 10.1007/BF00612801.
- Coombe, P. E. (1982): Visual behaviour of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum*. In: *Physiol Entomol* 7 (3), S. 243–251. DOI: 10.1111/j.1365-3032.1982.tb00297.x.
- Csizinszky, A. A.; Schuster, D. J.; Kring, J. B. (1995): Color Mulches Influence Yield and Insect Pest Populations in Tomatoes. In: *jashs* 120 (5), S. 778–784. DOI: 10.21273/JASHS.120.5.778.
- Díaz, B. M.; Muñoz, M.; Barrios, L.; Ferreres, A. (2007): Temperature Thresholds and Thermal Requirements for Development of *Nasonovia ribisnigri* (Hemiptera: Aphididae). In: *en* 36 (4), S. 681–688. DOI: 10.1603/0046-225x(2007)36[681:ttatrf]2.0.co;2.
- Díaz, B. M.; Biurrún, R.; Moreno, A.; Nebreda, M.; Ferreres, A. (2006): Impact of Ultraviolet-blocking Plastic Films on Insect Vectors of Virus Diseases Infesting Crisp Lettuce. In: *HortSci* 41 (3), S. 711–716. DOI: 10.21273/HORTSCI.41.3.711.
- Döring, T. F. (2014): How aphids find their host plants, and how they don't. In: *Ann Appl Biol* 165 (1), S. 3–26. DOI: 10.1111/aab.12142.
- Döring, T. F.; Chittka, L. (2007): Visual ecology of aphids—a critical review on the role of colours in host finding. In: *Arthropod-Plant Interactions* 1 (1), S. 3–16. DOI: 10.1007/s11829-006-9000-1.

- Döring, T. F.; Kirchner, S. M. (2007): Preliminary Characterisation of the Spectral Sensitivity in the Cabbage Aphid with Electroretinogram Recordings (Hemiptera: Aphididae). In: *entomologia* 30 (3), S. 233–234. DOI: 10.1127/entom.gen/30/2007/233.
- Döring, T. F.; Kirchner, S. M.; Kuhne, S.; Saucke, H. (2004): Response of alate aphids to green targets on coloured backgrounds. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 113 (1), S. 53–61. DOI: 10.1111/j.0013-8703.2004.00208.x.
- Döring, T. F.; Kirchner, S. M.; Skorupsky, P.; Hardie, J. (2011): Spectral sensitivity of the green photoreceptor of winged pea aphids. In: *Physiol Entomol* 36 (4), S. 392–396. DOI: 10.1111/j.1365-3032.2011.00805.x.
- Döring, T. F.; Röhrig, K. (2016): Behavioural response of winged aphids to visual contrasts in the field. In: *Ann Appl Biol* 168 (3), S. 421–434. DOI: 10.1111/aab.12273.
- Döring, T. F.; Spaethe, J. (2009): Messungen der Augengröße und Sehschärfe bei Blattläusen (Hemiptera: Aphididae). In: *entomologia* 32 (2), S. 77–84. DOI: 10.1127/entom.gen/32/2009/77.
- Doukas, D.; Payne, C. C. (2007): Greenhouse Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) Dispersal Under Different UV-Light Environments. In: *Journal of Economic Entomology* 100 (2), S. 389–397. DOI: 10.1093/jee/100.2.389.
- Finch, S.; Collier, R. H. (2000): Host-plant selection by insects - a theory based on 'appropriate/inappropriate landings' by pest insects of cruciferous plants. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 96 (2), S. 91–102. DOI: 10.1046/j.1570-7458.2000.00684.x.
- Gorman, K.; Devine, G.; Bennison, J.; Coussons, P.; Punchard, N.; Denholm, I. (2007): Report of resistance to the neonicotinoid insecticide imidacloprid in *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae). In: *Pest management science* 63 (6), S. 555–558. DOI: 10.1002/ps.1364.
- Gorman, K.; Hewitt, F.; Denholm, I.; Devine, G. J. (2002): New developments in insecticide resistance in the glasshouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) and the two-spotted spider mite (*Tetranychus urticae*) in the UK. In: *Pest management science* 58 (2), S. 123–130. DOI: 10.1002/ps.427.
- Greer, L.; Dole, J. M. (2003): Aluminum Foil, Aluminium-painted, Plastic, and Degradable Mulches Increase Yields and Decrease Insectvectored Viral Diseases of Vegetables. In: *horttech* 13 (2), S. 276–284. DOI: 10.21273/HORTTECH.13.2.0276.
- Gulidov, S.; Poehling, H.-M. (2013): Control of aphids and whiteflies on Brussels sprouts by means of UV-absorbing plastic films. In: *J Plant Dis Prot* 120 (3), S. 122–130. DOI: 10.1007/BF03356463.
- Hardie, J. (1989): Spectral specificity for targeted flight in the black bean aphid, *Aphis fabae*. In: *Journal of insect physiology* 35 (8), S. 619–626. DOI: 10.1016/0022-1910(89)90124-8.
- Holman, J. (2009): Host Plant Catalog of Aphids. Palaearctic Region. Dordrecht: Springer Netherlands. p.468.
- Hommel, M.; Siekmann, G.; Piepenbrock, O.; Baur, U.; Fricke, A.; Thieme, T. (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**. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/16630/1/16630-02OE097-ble-jki-2003-blattlausbefall.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2003, zuletzt geprüft am 14.07.2020.
- IRAC (2023): Current lettuce aphid. Online verfügbar unter <https://irac-online.org/pests/nasonovia-ribisnigri/>, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Johansen, N. S.; Vänninen, I.; Pinto, D. M.; Nissinen, A. I.; Shipp, L. (2011): In the light of new greenhouse technologies: 2. Direct effects of artificial lighting on arthropods and integrated pest

- management in greenhouse crops. In: *Ann Appl Biol* 159 (1), S. 1–27. DOI: 10.1111/j.1744-7348.2011.00483.x.
- Johnson, G. V.; Bing, A.; Smith, F. F. (1967): Reflective Surfaces Used to Repel Dispersing Aphids and Reduce Spread of Aphid-Borne Cucumber Mosaic Virus in Gladiolus Plantings. In: *Journal of Economic Entomology* 60 (1), S. 16–18. DOI: 10.1093/jee/60.1.16.
- Jones, F. R.; Chapman, R. K. (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), S. 146–148.
- Kapantaidaki, D. E.; Sadikoglou, E.; Tsakireli, D.; Kampanis, V.; Stavrakaki, M.; Schorn, C. et al. (2018): Insecticide resistance in *Trialeurodes vaporariorum* populations and novel diagnostics for kdr mutations. In: *Pest management science* 74 (1), S. 59–69. DOI: 10.1002/ps.4674.
- Kelber, A.; Osorio, D. (2010): From spectral information to animal colour vision: experiments and concepts. In: *Proc. R. Soc. B* 277 (1688), S. 1617–1625. DOI: 10.1098/rspb.2009.2118.
- Kelber, A.; Vorobyev, M.; Osorio, D. (2003): Animal colour vision – behavioural tests and physiological concepts. In: *Biol. Rev.* 78 (1), S. 81–118. DOI: 10.1017/S1464793102005985.
- Kift, N. B.; Mead, A.; Reynolds, K.; Sime, S.; Barber, M. D.; Denholm, I.; Tatchell, G. M. (2004): The impact of insecticide resistance in the currant-lettuce aphid, *Nasonovia ribisnigri*, on pest management in lettuce. In: *Agric Forest Ent* 6 (4), S. 295–309. DOI: 10.1111/j.1461-9555.2004.00226.x.
- Kigathi, R.; Poehling, H.-M. (2012): UV-absorbing films and nets affect the dispersal of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae). In: *J. Appl. Entomol.* 136 (10), S. 761–771. DOI: 10.1111/j.1439-0418.2012.01707.x.
- Kirchner, S. M.; Döring, T. F.; Saucke, H. (2005): Evidence for trichromacy in the green peach aphid, *Myzus persicae* (Sulz.) (Hemiptera: Aphididae). In: *Journal of insect physiology* 51 (11), S. 1255–1260. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2005.07.002.
- Kumar, P.; Poehling, H.-M. (2006): Uv-blocking Plastic Films and Nets Influence Vectors and Virus Transmission on Greenhouse Tomatoes in the Humid Tropics. In: *en* 35 (4), S. 1069–1082. DOI: 10.1603/0046-225X-35.4.1069.
- Land, M. F. (1997): Visual acuity in insects. In: *Annu. Rev. Entomol.* 42, S. 147–177. DOI: 10.1146/annurev.ento.42.1.147.
- Legarrea, S.; Betancourt, M.; Plaza, M.; Fraile, A.; García-Arenal, F.; Fereres, A. (2012a): Dynamics of nonpersistent aphid-borne viruses in lettuce crops covered with UV-absorbing nets. In: *Virus research* 165 (1), S. 1–8. DOI: 10.1016/j.virusres.2011.12.012.
- Legarrea, S.; Diaz, B. M.; Plaza, M.; Barrios, L.; Morales, I.; Viñuela, E.; Fereres, A. (2012b): Diminished UV radiation reduces the spread and population density of *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas) [Hemiptera: Aphididae] in lettuce crops. In: *Hort. Sci. (Prague)* 39 (No. 2), S. 74–80. DOI: 10.17221/79/2011-HORTSCI.
- Legarrea, S.; Weintraub, P. G.; Plaza, M.; Viñuela, E.; Fereres, A. (2012c): Dispersal of aphids, whiteflies and their natural enemies under photoselective nets. In: *BioControl* 57 (4), S. 523–532. DOI: 10.1007/s10526-011-9430-2.
- Lehmhus, J. (2001): Auswirkungen von Untersaaten in Weißkohlkulturen auf die Populationsdynamik der Schadinsekten, die Unkräuter und den Ertrag. Unter Mitarbeit von Technische Informationsbibliothek (TIB).

- Lu, Y.; Bei, Y.; Zhang, J. (2012): Are yellow sticky traps an effective method for control of sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*, in the greenhouse or field? In: *J. Insect Sci.* 12, S. 113. DOI: 10.1673/031.012.11301.
- Macdowall, F. D. H. (1972): Phototactic Action Spectrum For Whitefly And The Question of colour vision. In: *Can Entomol* 104 (3), S. 299–307. DOI: 10.4039/Ent104299-3.
- Mallock, A. (1922): Divided Composite Eyes. In: *Nature* 110 (2771), S. 770–771. DOI: 10.1038/110770a0.
- Mani, M. (2022): Pest Management in Horticultural Crops Under Protected Cultivation. In: Trends in Horticultural Entomology: Springer, Singapore, S. 387–417. Online verfügbar unter https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-0343-4_12.
- Mc Dougal, S.; Creek, A. (2011): Factsheet: Currant lettuce aphid. Primefact 155 Fourth Edition. Online verfügbar unter <https://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/horticulture/vegetables/diseases-pests-disorders/d-p-d/pests/currant-lettuce-aphid/currant-lettuce-aphid>, zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 12.02.2020.
- Mellor, H. E.; Anderson, M. (1995a): Antennal sensilla of whiteflies: *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), the glasshouse whitefly, *Aleyrodes proletella* (Linnaeus), the cabbage whitefly, and *Bemisia tabaci* (Gennadius), the tobacco whitefly (Homoptera : Aleyrodidae). Part 1: External morphology. In: *International Journal of Insect Morphology and Embryology* 24 (2), S. 133–143. DOI: 10.1016/0020-7322(94)00021-H.
- Mellor, H. E.; Anderson, M. (1995b): Antennal sensilla of whiteflies: *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood), the glasshouse whitefly, and *Aleyrodes proletella* (Linnaeus), the cabbage whitefly, (Homoptera : Aleyrodidae). Part 2: Ultrastructure. In: *International Journal of Insect Morphology and Embryology* 24 (2), S. 145–160. DOI: 10.1016/0020-7322(95)93340-I.
- Mellor, H. E.; Bellingham, J.; Anderson, M. (1997): Spectral efficiency of the glasshouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* and *Encarsia formosa* its hymenopteran parasitoid. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 83 (1), S. 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 Landen¹. In: *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 37 (1), S. 29–91. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1955.tb00775.x.
- Mutwiwa, U. N.; Borgemeister, C.; Elsner, B. von; Tantau, H.-J. (2005): Effects of UV-absorbing plastic films on greenhouse whitefly (Homoptera: Aleyrodidae). In: *Journal of Economic Entomology* 98 (4), S. 1221–1228. DOI: 10.1603/0022-0493-98.4.1221.
- Nawrocka, B. Z.; Eckenrode, C. J.; Uyemoto, J. K.; Young, D. H. (1975): Reflective Mulches and Foliar Sprays for Suppression of Aphid-borne Viruses in Lettuce. In: *J. Econ. Entomol.* 68 (5), S. 694–698. DOI: 10.1093/jee/68.5.694.
- Nebreda, M.; Moreno, A.; Pérez, N.; Palacios, I.; Seco-Fernández, V.; Ferreres, A. (2004): Activity of aphids associated with lettuce and broccoli in Spain and their efficiency as vectors of Lettuce mosaic virus. In: *Virus research* 100 (1), S. 83–88. DOI: 10.1016/j.virusres.2003.12.016.
- Otieno, J. A.; Stukenberg, N.; Weller, J.; Poehling, H.-M. (2018): Efficacy of LED-enhanced blue sticky traps combined with the synthetic lure Lurem-TR for trapping of western flower thrips (*Frankliniella occidentalis*). In: *J Pest Sci* 91 (4), S. 1301–1314. DOI: 10.1007/s10340-018-1005-x.

- Pappas, M. L.; Migkou, F.; Broufas, G. D. (2013): Incidence of resistance to neonicotinoid insecticides in greenhouse populations of the whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) from Greece. In: *Appl Entomol Zool* 48 (3), S. 373–378. DOI: 10.1007/s13355-013-0197-z.
- Pinto-Zevallos, D. M.; Vänninen, I. (2013): Yellow sticky traps for decision-making in whitefly management: What has been achieved? In: *Crop Prot.* 47, S. 74–84. DOI: 10.1016/j.cropro.2013.01.009.
- Poehling, H-M; Niemann, J-U (2019): Abschlussbericht Verbundvorhaben: Entwicklung einer biologisch abbaubaren, sprühfähigen Mulchfolie aus NaWaRos zur Steigerung der Nachhaltigkeit beim integrierten Pflanzenschutz von intensiven gartenbaulichen Freilandkulturen; Teilvorhaben 1: Optimierung der optischen Eigenschaften, Parzellenversuche - Akronym: Spruehmulchfolie. Online verfügbar unter <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22008214>, zuletzt geprüft am 14.04.2023.
- Prokopy, R. J.; Owens, E. D. (1983): Visual Detection of Plants by Herbivorous Insects. In: *Annu. Rev. Entomol.* 28 (1), S. 337–364. DOI: 10.1146/annurev.en.28.010183.002005.
- Rakoski, M.; Stukenberg, N. (2019): Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten. Veröffentlichungsnr: 10 2018 208 424. A01M 29/10.
- Reinink K., Dieleman F. L. (1993): Survey of aphid species on lettuce. In: *Bulletin OILB/SROP* 16 (5), S. 56–68. Online verfügbar unter <https://www.cabi.org/ISC/abstract/19931179072>, zuletzt geprüft am 05.02.2020.
- Rufingier, C.; Schoen, L.; Martin, C.; Pasteur, N. (1997): Resistance of *Nasonovia ribisnigri* (Homoptera: Aphididae) to Five Insecticides. In: *Journal of Economic Entomology* 90 (6), S. 1445–1449. DOI: 10.1093/jee/90.6.1445.
- Sauer-Kesper, C.; Noel, L.; Buser, H.; Vogler, U. (2011): Bedeutung und Verbreitung des neuen Biotyps-NR: 1 der Grünen Salatlaus in der Deutschschweiz. Online verfügbar unter https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/2019/12/2011_10_1706.pdf.
- Shimoda, M. (2018): Recent advances in the optical control of insect pests using light and color. Special Publication of TARI No. 215, S. 87–102. Online verfügbar unter <http://ir.tari.gov.tw:8080/handle/345210000/9855>, zuletzt geprüft am 14.07.2020.
- Shimoda, M.; Honda, K.-i. (2013): Insect reactions to light and its applications to pest management. In: *Appl Entomol Zool* 48 (4), S. 413–421. DOI: 10.1007/s13355-013-0219-x.
- Smith, J. G. (1976): Influence of crop background on aphids and other phytophagous insects on Brussels sprouts. In: *Ann Appl Biol* 83 (1), S. 1–13. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1976.tb01689.x.
- Stukenberg, N. (2018a): LED based trapping of whiteflies and fungus gnats : from visual ecology to application. PhD Thesis.
- Stukenberg, N. (2018b): LED based trapping of whiteflies and fungus gnats: From visual ecology to application. PhD Thesis. Leibniz Universität Hannover.
- Stukenberg, N.; Gebauer, K.; Poehling, H.-M. (2015): Light emitting diode(LED)-based trapping of the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). In: *J. Appl. Entomol.* 139 (4), S. 268–279. DOI: 10.1111/jen.12172.
- Stukenberg, N.; Pietruska, M.; Waldherr, A.; Meyhöfer, R. (2020): Wavelength-Specific Behavior of the Western Flower Thrips (*Frankliniella occidentalis*): Evidence for a Blue-Green Chromatic Mechanism. In: *Insects* 11 (7). DOI: 10.3390/insects11070423.

- Stukenberg, N.; Poehling, H.-M. (2019): Blue–green opponency and trichromatic vision in the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) explored using light emitting diodes. In: *Ann Appl Biol* 175 (2), S. 146–163. DOI: 10.1111/aab.12524.
- Stukenberg, N.; Rakoski, M. (2018): “Vorrichtung und Verfahren zum Schutz von grünen Pflanzen vor herbivoren Insekten“ am 28.05.2018. Veröffentlichungsnr: DE 10 2018 208 424 B3.
- Summers, C. G.; Mitchell, J. P.; Stapleton, J. J. (2005): Mulches reduce aphid-borne viruses and whiteflies in cantaloupe. In: *Cal Ag* 59 (2), S. 90–94. DOI: 10.3733/ca.v059n02p90.
- Summers, C. G.; Stapleton, J. J. (2002): Use of UV reflective mulch to delay the colonization and reduce the severity of *Bemisia argentifolii* (Homoptera: Aleyrodidae) infestations in cucurbits. In: *Crop Protection* 21 (10), S. 921–928. DOI: 10.1016/S0261-2194(02)00067-4.
- Vaishampayan, S. M.; Waldbauer, G. P.; Kogan, M. (1975a): Visual and olfactory responses in orientation to plants by the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera : Aleyrodidae). In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 18 (4), S. 412–422. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1975.tb00418.x.
- Vaishapayan, S. M.; Kogan, M.; Waldbauer, G. P.; Wooley, J. T. (1975b): Spectral specific responses in the visual behavior of the greenhouse whitefly, *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 18 (3), S. 344–356. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1975.tb00407.x.
- van der Arend, A.J.M. (2003): The possibility of *Nasonovia ribisnigri* resistance breaking biotype development due to plant host resistance: a literature study. Online verfügbar unter https://projects.cgn.wur.nl/leafyvegetables/download/14_075-081_arend.pdf.
- van Helden, M. (1995): The Resistance of Lettuce to the Aphid *Nasonovia ribisnigri*. Online verfügbar unter <https://search.proquest.com/openview/e8af37878c8395779157c46012e0dc0a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.
- van Lenteren, J. C.; Noldus, L.P.J.J. (1990): Whitefly-plant relationships: behavioural and ecological aspects. In: J. C. van Lenteren und L.P.J.J. Noldus (Hg.): *Whiteflies: their bionomics, pest status and management*, 47-49-49. Online verfügbar unter <https://library.wur.nl/webquery/wurpubs/12132>.
- Wardlow, L. R.; Ludlam, A. B.; Bradley, L. F. (1976): Pesticide resistance in glasshouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum* westwood). In: *Pestic. Sci.* 7 (3), S. 320–324. DOI: 10.1002/ps.2780070318.
- Weintraub, P. G.; Berlinger, M. J. (2004): Physical Control in Greenhouses and Field Crops. In: A. Rami Horowitz und I. Ishaaya (Hg.): *Insect pest management. Field and protected crops*. Berlin, London: Springer, S. 301–318.

8. Publikationen

Mit dieser Dissertationsschrift verbundene Veröffentlichungen sind **Fett** gedruckt

- ❖ **Poehling, H-M; Niemann, J-U (2019): Verbundvorhaben „Entwicklung einer biologisch abbaubaren, sprühfähigen Mulchfolie aus NaWaRos zur Steigerung der Nachhaltigkeit beim integrierten Pflanzenschutz von intensiven gartenbaulichen Freilandkulturen“; Teilvorhaben 1: Optimierung der optischen Eigenschaften, Parzellenversuche. Abschlussbericht (online: <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22008214>) letzter Zugriff 20.04.2023**
- ❖ **Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2021): Manipulation of landing behaviour of two whitefly species by reflective foils. Journal of Plant Diseases and Protection 128:97–108. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00394-y> PeerReviewed**
- ❖ **Langkamp-Wedde, T; Niemann, J-U; Wegener, JK (2021): Ein kurzer Einblick in die Pflanzenschutzapplikationstechnik des Erwerbsgartenbaus. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2020. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2021. S. 1-11. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202012111249-0> PeerReviewed**
- ❖ **Niemann, J-U; Menssen, M; Poehling, H-M (2022): Reducing initial aphid infestation by use of coloured mulch foils and newly developed biodegradable spray-films. Themenheft. 74 (03-04), 49-62. <https://doi.org/10.5073/JfK.2022.03-04.03> PeerReviewed**
- ❖ **Stukenberg, N; Niemann, J-U (2022): Anlocken, Verwirren, Abwehren: Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und Möglichkeiten der optischen Manipulation von Schadinsekten. Themenheft. 74 (03-04), 36-48. <https://doi.org/10.5073/JfK.2022.03-04.02> PeerReviewed**
- ❖ **Niemann, J-U; Poehling, H-M (2022): Effect of narrow-banded blue LED device on host plant settlement by greenhouse whitefly and currant-lettuce aphid. J Plant Dis Prot. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00622-7> PeerReviewed**
- ❖ **Herrmann, D; Dillschneider, E-M; Niemann, J-U; Tomforde, M; Wegener, JK (2022): Innovationen in der Pflanzenschutztechnik. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2021. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2022. S. 1-13. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202202030954-0> PeerReviewed**
- ❖ **Herrmann, D; Niemann, J-U; Kottmann, L; Lehnert, H; Keilwagen, J; von Hörsten, D; Wegener, JK (2022): Aussaat: Gleichstandsamt im Dreiecksverband. Getreide-Magazin. 28 (03), 57-59.**
- ❖ **Langkamp-Wedde, T; Rautmann, D; von Hörsten, D.; Niemann, J-U; Wegener, JK (2023): Possibilities to reduce drift by 75 percent in biocidal applications of insecticides with cannon sprayers. *Environ Sci Eur* **35**, 23 (2023). <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00729-0> PeerReviewed**

- ❖ Niemann, J-U; Tomforde, M; Herrmann, D; Pohl, JP; Wegener, JK (2023): Technische Innovationen zur Reduktion des Einsatzes von chemischen Pflanzenschutzmitteln in Anbausystemen. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2022. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2023. S. 1-11. (Im Druck) **PeerReviewed**
- ❖ Kämpfer, C; Niemann, J-U; von Hörsten, D (2023): Einfluss der Aufreinigung und Saatgutbehandlung auf die Freisetzung von Getreidebeizstaub. [Eingereicht beim Journal für Kulturpflanzen, im Review] **PeerReviewed**

Patentschrift

- ❖ Niemann, J-U (2019): Vorrichtung zum Schutz grüner Pflanzen vor pflanzenschädigenden Insekten. Patent-Nr: DE102019220286A1.

9. Lebenslauf

Schule	Allgemeine Hochschulreife, 22.02.2006 VH Hildesheim
Studium	Ab WS 2006 an der LUH (Leibniz Universität Hannover) immatrikuliert, Studienfach Gartenbauwissenschaften, Bachelorstudiengang
Bachelor	09/2009 Abschluss Bachelor of Science (Note 2,4) Bachelorarbeit: „Modellierung der Effizienz photovoltaischer Anlagen zur Energieversorgung von Gewächshaussystemen“ im Fachbereich Biosystem- und Gartenbautechnik (BGT) des Instituts für Biologische Produktionssysteme
Master	Seit WS 2009, Masterstudiengang Gartenbauwissenschaften 10/2012 Abschluss Master of Science (Note 2,0) Masterarbeit: „Untersuchungen zur Biologie der Grünen Salatlaus, <i>Nasonovia ribisnigri</i> , und deren Bekämpfung mit den Coccinelliden <i>Adalia bipunctata</i> und <i>Coccinella septempunctata</i> unter Gewächshausbedingungen“ am Institut für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (LUH) in Kooperation mit dem Pflanzenschutzamt Hannover. Exmatrikulation 26.10.2012
Promotion	10/2015 bis 06/2020 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Gartenbauliche Produktionssysteme Abt. Phytomedizin. Mitarbeit im Projekt „Entwicklung einer biologisch abbaubaren, sprühfähigen Mulchfolie aus NaWaRos zur Steigerung der Nachhaltigkeit beim integrierten Pflanzenschutz von intensiven gartenbaulichen Freilandkulturen“ und Promotionsstudent. 06/2020 bis 06/2021 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am JKI Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz. 01/2022 bis aktuell: Wissenschaftlicher Mitarbeiter am JKI Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz. Projektmanagement, Publikationen, Projektanträge, Projektbetreuung