

Automatisierte Erfassung von Kohlschädlingen als Basis für Interventionsmaßnahmen

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

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

genehmigte Dissertation
von
Nelli Rempe-Vespermann, M. Sc.

2023

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

Korreferent: apl. Prof. Dr. sc. nat. Rainer Meyhöfer

Tag der Promotion: 02.09.2022

Für die starken Frauen in meiner Familie
und die Männer, die uns unterstützen (insbesondere René)

Kurzfassung

Die Qualität und Quantität von Kohlgemüse kann durch tierische Schädlinge stark dezimiert werden. Schadinsekten werden in der konventionellen Landwirtschaft bevorzugt mittels synthetisch-chemischer Pflanzenschutzmittel bekämpft. Die Applikation von Insektiziden ist jedoch mit Risiken verbunden. Deren Einsatz kann durch Schwellenwerte im Zusammenhang mit Überwachungsmethoden auf ein unbedingt notwendiges Maß beschränkt werden, wie es im integrierten Pflanzenschutz maßgeblich gefordert wird. Die zurzeit verfügbaren Überwachungsmethoden für Schädlinge im Kohlgemüseanbau unter Freilandbedingungen sind zeitaufwändig und die Entscheidungshilfemethoden nicht flächenspezifisch. Aus diesem Grund sind sie in der Praxis wenig implementiert. Daher war das Ziel dieser Arbeit die Weiterentwicklung und Erprobung der sensorbasierten Überwachungsmethoden zur präzisen Vorhersage des Gefährdungspotentials durch Schadinsekten im Kohlgemüse auf Basis einer digitalen Erfassung, die durch automatische Dokumentation und Interpretation von schädlingsspezifischen Daten gekennzeichnet ist.

Im Rahmen der hier vorgestellten Versuche wurden die Eignung von Farb-, Graubild-, zwei 3D- bzw. Bolometerkamarasystemen oder CFBA (Chlorophyllfluoreszenz-Bildanalyse) zur digitalen Erfassung und Erkennung von Schädlingsgruppen (Schmetterlingslarven bzw. der Mehligen Kohlblattlaus (*Brevicoryne brassicae* L.)) auf einer Pflanze sowie der durch diese verursachten Schäden (im Vergleich zu ungeschädigtem Pflanzengewebe) untersucht. Die Graubildkamera wurde im Zusammenhang mit drei unterschiedlichen Fremdlichtquellen (emittierte Wellenlängen von 625 nm, 780 nm bzw. 940 nm) untersucht. Des Weiteren wurde die Eignung von drei digitalen Pheromonlockstoffallensystemen (TrapView, Z-Trap-System, digitales Trichter-Pheromonlockstoffallensystem der Hochschule Osnabrück), TCS (Triangel-Camera-System) und zweier bildgebender Lichtschranken-Sensorsystemen (OEOS und Infrascan 5000) zur digitalen Erfassung von geflügelten Schadinsekten ausgewertet. Die Evaluierung der 12 optoelektronischen Sensorsysteme erfolgte anhand der mit diesen Systemen erzeugten Ergebnisse, der mit konventionellen, gängigen Überwachungsmethoden erhobenen Daten im Feld sowie der ergänzend durchgeführten Versuche unter kontrollierten Bedingungen. Bei den konventionellen gängigen Überwachungsmethoden handelte es sich um Bestandskontrollen, Sexualpheromonlockstofffallen bzw. Eimanschetten.

Die Schädlingspopulationen in Kohlgemüsebeständen variierten je nach Schädlingsart, Jahr und Ort. Die Eignung der spektralen digitalen 2D-Signatur zur Erkennung von Schädlingsgruppen (Schadschmetterlingslarven bzw. Mehliger Kohlblattlaus) auf einer Pflanze bzw. der Insekten-schäden (geschädigtes bzw. ungeschädigtes Pflanzengewebe ohne Quantifizierung) unterschied sich je nach Sensorsystem, Objektart (Insekt bzw. Schaden), Schädlingsgruppe und Schädlings-dichte. Zur Erkennung der Schmetterlingslarven auf der Blattoberseite und der durch diese verursachten Schäden eigneten sich spektrale digitale 2D-Signaturen, die mit Farb- bzw. Graubildkamera mit roter Fremdlichtquelle (emittierte Wellenlänge 625 nm) oder CFBA erzeugt wurden. Große Mehliges Kohlblattlauskolonien (> 200 Individuen) sowie durch diese verursachte Gewebeschäden waren am besten auf den spektralen digitalen 2D-Signaturen der CFBA differenziert. Keine der spektralen digitalen 2D-Signaturen konnte zur Erkennung der kleinen Mehliges Kohlblattlauskolonien (<15 Individuen) sowie durch diese verursachte Gewebeschäden verwendet werden. Geflügelte Schadinsekten konnten mit stationären Sensorsystemen wie TrapView, Z-Trap, TCS bzw. OEOS (Opto Elektronischer Objekt Scanner) digital erfasst werden. TrapView eignete sich gut zur digitalen und automatischen Erfassung der Kohlmottenflugaktivität (*Plutella xylostella* L.). Mit dem Z-Trap-System war es möglich anhand eines Biosensors die Kohlmotte und die Kohleule (*Mamestra brassicae* L.) unter kontrollierten Bedingungen digital und automatisch zu erfassen. Durch TCS konnte die Kleine Kohlflye (*Delia radicum* L.) bei der Eiablage automatisch und digital erfasst werden. Mit Hilfe des OEOS-Systems wurden Kohleule, Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling (*Pieris rapae* L.) und Kleine Kohlflye in der Luft während des Fluges unter kontrollierten Bedingungen digital erfasst.

Somit erwiesen sich bildbasierte digitale Pheromonlockstofffallen wie TrapView zur automatischen Erfassung der Kohlmottenflugaktivität für die Praxis als empfehlenswert. Die digitale Erfassung von geflügelten Schadinsekten mittels Z-Trap- oder OEOS-System sowie TCS oder eine digitale Erfassung der durch Schadinsekten verursachten Pflanzenschäden sind möglich, jedoch bedürfen diese weiterer Forschung und können daher für die Praxis noch nicht empfohlen werden. Die digitale Erfassung von Schadinsekten mit der technisch modifizierten Trichter-Sexualpheromonlockstoffalle der Hochschule Osnabrück, 3D-Kamarasystem nach dem Pulslaufzeitprinzip (O3D 201PMD 3D), Infrascan 5000 und der Bolometerkamera wurden aufgrund der Positionierung der Insekten auf der Pflanze bzw. Insekten- oder Sensorsystemeigenschaften als ungeeignet bewertet.

Schlagerworte: optoelektronische bildbasierte Sensorsysteme, geflügelte und ungeflügelte Kohlgemüseschadinsekten, digitale und konventionelle Überwachungsmethoden

Abstract

Quality and quantity of cabbage crops can be severely decimated by pests. Pest control in conventional agriculture is commonly based on use of synthetic-chemical plant protection products like insecticides. The application of insecticides may, however, be risky because of residues as well as other possible adverse side effects. Therefore, the application of insecticides must be reduced to the absolutely necessary amount as it is required in integrated plant protection. The application of insecticides can be reduced by applying monitoring methods in combination with economic thresholds for pests in vegetable crops. The currently available monitoring methods for pests in cabbage crops under field conditions are time consuming and the decision support systems are not area-specific and for this reason rarely applied in practice. Therefore, the aim of this research was to elaborate monitoring methods to predict the potential risk of cabbage crop pests on the basis of digital detection. Digital detection was characterized by automatic documentation and transmission of pest-specific data.

During the investigations color camera, digital monochrome gray light sensor system, two 3D sensor systems and bolometer camera system as well as CFBA (Chlorophyll fluorescence imaging analysis) were used for the digital detection of unwinged pest groups (Lepidopteran larvae or cabbage aphid (*Brevicoryne brassicae* L.)) directly on cole crops and for the digital detection of plant damages caused by these pests. The gray image camera was examined in connection with three different extraneous light sources, with emitted wavelength of 625 nm, 780 nm or 940 nm. Furthermore, the suitability of three digital sex pheromone lure trap systems (TrapView, Z-Trap-System, a digital funnel sex pheromone lure trap system of the University of Osnabrück), TCS and two imaging light barrier sensor systems (OEOS and Infrascan 5000) for the detection of winged pests were examined. The evaluation of those 12 optoelectronic sensor systems was carried out based on the results generated with these sensor systems, the data collected in the field using common conventional monitoring methods and trials under controlled conditions. The common conventional monitoring methods were crop scouting, sex pheromone lure traps and felt traps.

The pest population varied depending on insect species, year and location. Over 56 % of larvae of lepidopteran pests and over 90 % of cabbage aphids were found in the field on the underside of the leaf (facing away from the camera systems). The digital detection of lepidopteran larvae was possible on the top of cabbage crop leaves with color camera system, digital monochrome camera system with extraneous red light (emitted wavelength 625 nm) illumination or CFBA. Large cabbage aphid colonies (>200 individuals) and tissue damages caused by them were best differentiated by CFBA 2D spectral digital signatures. None of the 2D spectral digital signatures could be used to detect small cabbage aphid colonies (<15 individuals) and tissue damage caused by them. Winged cabbage crop pests could be detected digitally with Z-Trap system, TrapView, TCS (Triangel-Camera-System) or OEOS (opto electronic object scanner) system. Image-based digital system TrapView was suitable for automatic detection of diamondback moths (*Plutella xylostella* L.). The number of diamondback moths in the conventional sex pheromone lure traps corresponded to the number of diamondback moths in the TrapView. Furthermore, the number of larvae on the plants in the field correlated significantly with the number of diamondback moths in the sex pheromone lure traps. Cabbage moths (*Mamestra brassicae* L.) and swede midges (*Contarinia nasturtii* Kieffer) could not be digital recorded by the TrapView system. With biosensor of the Z-Trap system, it was possible to digital detect diamondback moths and cabbage moths under controlled conditions. With TCS it was possible to detect cabbage root flies (*Delia radicum* L.) automatically during the oviposition. On the basis of OEOS system, diamondback moths, cabbage moths, small cabbage white butterflies (*Pieris rapae* L.) and cabbage root flies were detected digitally during the flight under controlled conditions.

Thus, image-based digital sex pheromone lure trap systems like TrapView are recommendable for practice for automatic detection of diamond back moth flight activity. Digital recording of winged insect pests using the Z-Trap system, OEOS system and TCS as well as digital recording of plant damages caused by insect pests are possible, but these require further research and can therefore not yet be recommended for practice. The digital recording of pests with digital funnel sex pheromone lure trap of the University of Osnabrück, 3D camera system based on time-of-flight measurements (O3D 201PMD 3D), Infrascan 5000 and bolometer camera system were unsuitable due to the insect positioning or insect properties or sensor system properties.

Keywords: optoelectronic image-based sensor systems, winged and unwinged cole crop pest, digital and conventional monitoring methods

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	I
ABSTRACT	IV
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
TABELLENVERZEICHNIS	XIV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIX
1. EINLEITUNG	1
1.1 Allgemeines zum Kohlgemüse (<i>Brassica oleracea</i> L.)	2
1.1.1 Schadinsekten	3
1.1.2 Konventionelle Überwachungsmethoden in Kohlgemüse im Freiland	5
1.2 Digitalisierung	7
1.2.1 Optik	8
1.2.2 Optische Sensorsysteme.....	10
1.2.3 Optische Sensorsysteme in der Landwirtschaft im Feld	13
1.3 Zielsetzungen	16
2. MATERIAL UND METHODEN	18
2.1 Versuchspflanzen	19
2.2 Versuchsinsekten und Zuchten	21
2.3 Untersuchungen der optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze sowie der durch diese verursachten Schäden	24
2.3.1 Farbkamera	25
2.3.2 Graubildkamera	27
2.3.3 Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse (CFBA)	29
2.3.4 Bolometerkamera	31
2.3.5 3D-Kamerasysteme	32
2.4 Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die digitale Erfassung von Schaderregern	35
2.4.1 Versuchsflächen	35
2.4.2 Untersuchung zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus auf einer Pflanze im Feld	36
2.4.3 Schadschmetterlinge	38
2.4.3.1 Untersuchungen zur Verteilung der Larven von Schadschmetterlingen auf einer Pflanze	39
2.4.3.2 Untersuchungen zur Erfassung der adulten Schadschmetterlinge mittels konventioneller Sexualpheromonfallen	40
2.4.4 Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye anhand der Eimanschetten in der Anbausaison und im Tagesverlauf	44
2.4.4.1 Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf	46
2.4.5 Erfassung der Kohldrehherzgallmücke mittels konventioneller Sexualpheromonfallen	47
2.5 Untersuchungen zur Erfassung der geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge mit optoelektronischen Sensorsystemen	48
2.5.1 Untersuchungen zu digitalen Pheromonfallensystemen	49

2.5.1.1 TrapView.....	49
2.5.1.2 Z-Trap-System.....	51
2.5.1.3 Digitales Trichter-Sexuallockstoffallensystem der Hochschule Osnabrück	53
2.5.2 Triangel-Camera-System (TCS).....	54
2.5.2.1 Erfassung der Kleinen Kohlflye bei der Eiablage mit TCS	54
2.5.2.2 Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye	58
2.5.3 Bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme	59
2.6 Datenauswertung	61
2.6.1 Bildverarbeitung.....	62
2.6.2 Statistische Auswertungen der erhobenen Daten	62
2.6.2.1 Korrelationsanalyse	63
2.6.2.2 Angewandte statistischen Modelle und Methoden zur Datenanalyse.....	63
3. ERGEBNISSE.....	67
3.1 Überprüfung optoelektronischer Sensorsysteme zur Detektion der mobilen, oberirdischen, ungeflügelten und pflanzenschädigenden Insektenstadien sowie die durch diese verursachten Schäden direkt auf einer Pflanze unter kontrollierten Bedingungen.....	67
3.1.1 Farbkamera	68
3.1.2 Graubildkamera	71
3.1.3 Chlorophyllfluoreszenz-basierte Bildanalyse.....	73
3.1.4 Bolometerkamera	78
3.1.5 3D-Kamerasysteme	80
3.1.6 Vergleich der optoelektronischen Sensorsysteme zur Detektion der mobilen oberirdischen, ungeflügelten und pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze sowie durch diese verursachten Schäden unter kontrollierten Bedingungen.....	81
3.2 Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die digitale Erfassung von Schaderregern im Bestand.....	84
3.2.1 Untersuchungen zur Mehligigen Kohlblattlaus im Bestand.....	84
3.2.1.1 Häufigkeiten und Abundanzen	84
3.2.1.2 Untersuchungen zur vertikalen Verteilung der Schädlingsart auf Weißkohlpflanzen im Bestand.....	85
3.2.1.3 Untersuchungen zur Blattseitenpräferenz des Schädlings auf einer Weißkohlpflanze im Bestand.....	87
3.2.2 Untersuchungen zu Schadschmetterlingen.....	89
3.2.2.1 Häufigkeitsverteilungen und Abundanzen	89
3.2.2.2 Untersuchungen zur vertikalen Verteilung der Schmetterlingslarven auf Weißkohlpflanzen im Bestand.....	92
3.2.2.3 Untersuchungen zur Blattseitenpräferenz der Schmetterlingslarven auf einer Weißkohlpflanze im Bestand	96
3.2.2.4 Untersuchungen zur Erfassung der Schadschmetterlinge mittels konventioneller Pheromonlockstofffallen im Freiland	100
3.2.2.5 Untersuchungen zur Erfassung der Kohleulen mittels konventioneller Pheromonfallen unter kontrollierten Bedingungen.....	103
3.2.3 Erfassung der Eiablage der Kleinen Kohlflye mittels Eimanschetten in der Anbausaison .	104
3.2.3.1 Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye im Tagesablauf	105
3.2.4 Erfassung der Kohldrehherzgallmücke mittels konventioneller Sexualpheromonfallen	107
3.2.5 Betriebswirtschaftliche Betrachtung der konventionellen Überwachungsmethoden	109
3.3 Erprobung von optoelektronischen Sensoren zur Detektion der geflügelten adulten Kohlschädlinge.....	112
3.3.1 Digitale Pheromonfallensysteme.....	112

3.3.1.1 TrapView.....	112
3.3.1.2 Z-Trap	116
3.3.1.3 Digitales Trichter-Fallensystem der Hochschule Osnabrück	119
3.3.2 Triangel-Camera-System (TCS).....	120
3.3.2.1 Bildverarbeitungsprogramm des TCS	120
3.3.2.2 Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye	123
3.3.3 Bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme	124
3.3.4 Vergleich der optoelektronischen Sensorsysteme zur Detektion von geflügelten adulten Kohlschädlingen	126
4. DISKUSSION	128
4.1 Motivation und Rahmenbedingungen der Arbeit	129
4.2 Evaluierung der Systeme zur Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien sowie der durch diese verursachten Schäden	132
4.3 Evaluierung der Systeme zur Erfassung der geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge	145
5. FAZIT UND SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE PRAXIS	157
6. LITERATURVERZEICHNIS	162
7. ANHANG	179
7.1 Bodenuntersuchungen	179
7.2 Statistik	179
7.2.1 Untersuchungen zur Mehligigen Kohlblattlaus.....	179
7.2.2 Untersuchungen zu Schmetterlingslarven.....	181
7.2.3 Untersuchungen zur Kleinen Kohlflye	197
7.2.4 Untersuchungen zu optoelektronischen Sensorsystemen	198
7.2.5 Untersuchungen zu Kohlerdflohen	200
8. DANKSAGUNG	202
9. LEBENSLAUF	203
10. VERÖFFENTLICHUNGEN.....	204

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Pflanzung von Weißkohl- sowie Brokkolipflanzen im Dreiecksverband in einem Beet. Die Beetbreite betrug 1,8 m. Der Abstand zwischen den Pflanzen in der Reihe betrug 60 cm, der Abstand zwischen den Reihen 40 cm 20
- Abbildung 2: Abdomenende einer Kohleulenpuppe von (A) Weibchen und (B) Männchen. Weibchen haben keine klare Genitalnaht im Gegensatz zu Männchen. Die letzten drei Segmenteinschnitte der Analnaht sind nicht klar getrennt bei Weibchen. An = Analnaht; Gn = Genitalnaht 24
- Abbildung 3: Anordnung der Weißkohlpflanzen sowie der drei Schadinsekten (Mehlige Kohlblattlaus, Kohlmotte bzw. Kohleule) im Versuch. Die drei Blöcke des Versuchs sind durch Vierecke hervorgehoben. Der Mehliges Kohlblattlausblock ist orange (Block 1), der Kohlmottenblock ist lila (Block 2) und der Kohleulenblock ist grün (Block 3) hervorgehoben. Durch ein rotes Viereck und einen Pfeil ist das im Versuch verwendete Stativ (S) hervorgehoben. Die Gelbtafeln wurden gegen Trauermücken ausgebracht, diese hatten keinen Einfluss auf die zu beobachtenden Schadinsekten 27
- Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Erprobung der monochromen Matrixkamera HXG20NIR von Baumer (Deutschland). GBK = Graubildkamera, FB = Förderband, SW = Scheinwerfer, PLK = Power-LED-Cluster 29
- Abbildung 5: Versuchsaufbau mit modularem System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) (A) mit einer ganzen Pflanze und (B) mit einem abgetrennten Brokkoliblatt. 1 = LED-Feld, dessen Dioden das orangefarbene Licht emittierten, 2 = Halogenlampensystem für den Lichtsättigungsimpuls, 3 = CCD-Kamera 31
- Abbildung 6: Im Versuch verwendete Bolometerkamera i7 (FLIR systems Inc., USA). Die Maße der Kamera betragen 223 x 79 x 83 mm. (A) Kamera von hinten mit einem aktivierten Bildschirm; (B) Kamera von vorne mit einem Infrarotobjektiv und Trigger-Taste zum Speichern von Bildern; (C) Kamera von der Seite 32
- Abbildung 7: Gocator 2350 (LMI technologies, Canada). (A) Versuchsaufbau: Die Gocator 2350 ist durch ein rotes Viereck und Pfeil hervorgehoben. (B) © Imi3d.com Schematische Darstellung (LMI technologies) der Funktionsweise von Gocator 2350. Durch den schwarzen Pfeil ist die Ausrichtung der Kameralinse sowie durch den roten Pfeil der Laserstrahl hervorgehoben 34
- Abbildung 8: Schematische Darstellung der vertikalen Zonierung von (A) Weißkohlpflanzen mit Herz und (B) Kopf. Herz- bzw. Kopfbereich sind durch ein weißes Viereck hervorgehoben. Die sechs Umblätter sind durch Pfeile und Zahlen hervorgehoben. Die Blätter unter den Umblättern wurden als Außenblätter definiert 37
- Abbildung 9: Schematische Darstellung der Verteilung der 10 Kontrollpunkte an den zwei Versuchsf lächen mit je 5 Stichproben (jede Stichprobe ist durch einen schwarzen Punkt markiert). Die Beetbreite betrug 180 cm, Reihenbreite 40 cm 38
- Abbildung 10: Übersicht der untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung von Schadschmetterlingen 39
- Abbildung 11: In den Untersuchungen verwendete Pheromonfallen (A) Delta-Falle (Andermatt Biocontrol, Schweiz), (B) Trichter-Falle (Andermatt Biocontrol, Schweiz), (C) Trichter-Falle (Csalomon, Ungarn) 41
- Abbildung 12: Schematische Darstellung der Verteilung der Pheromondispenser von Kohlmotte (schwarzes Viereck) bzw. Kohleule (rotes Viereck) in 2014 und 2015 am Beispiel der Versuchsf läche in Braunschweig. Ein Viereck stellt einen Kontrollpunkt mit zwei Pheromondispensern (Pheromonfallen) unabhängig von dem Typ der

Sexualpheromonenlockstoffalle dar. Die schwarz gestrichelte Linie stellt die Entfernung zwischen den Pheromondispensern bzw. Kontrollpunkten dar.....	43
Abbildung 13: Eimanschette (Okado, Schweiz) an einer Brokkolipflanze (A) mit einer Fliege, die einen Platz zur Eiablage sucht und (B) einer Fliege, die zur Eiablage einen Ort gefunden hat ...	45
Abbildung 14: Versuchsdesign zur Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison als Vergleichsparameter sowie zur Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf am Beispiel eines Brokkolisatzes auf einer Versuchsfläche in Braunschweig. Die Pflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison wurden mit schwarzen Punkten, die Pflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf mit roten Punkten dargestellt.....	46
Abbildung 15: (A) Tetra-Falle im Weißkohlbestand sowie (B) 30-fach vergrößerte Kohldrehherz gallmücke auf einem Klebeboden.....	47
Abbildung 16: Übersicht der untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme aus der zweiten Sensorgruppe, mit denen adulte geflügelte Kohlgemüseschadinsekten erfasst wurden.....	48
Abbildung 17: TrapView in einem Weißkohlfeld (A). TrapView bestand aus einem Plastikgehäuse (PG), Solarzelle (SZ) und einer (B) elektronischen Einheit. Die elektronische Einheit befand sich im Plastikgehäuse. K = Kameras, LED = LED, SK = SIM-Karte	50
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus auf einer Fläche (A) im Jahr 2014 und (B) 2015.....	51
Abbildung 19: Bestandteile des Z-Trap-Systems: (A) Elektronische Z-Trap-Einheit (MS = Metallstäbe; PH = Pheromondispenserhalterung; SE = Steuerungseinheit mit einem Bioimpedance-Sensor), (B) Trichter/Delta-Falle mit elektronischer Z-Trap-Einheit, (C) Basisstation-Notebook der Firma HP Inc. (USA), (D) Funkmodul	52
Abbildung 20: Technisch modifizierte Trichterfalle der Hochschule Osnabrück (A) gesamtes System (FT = Fallentrichter; DK = Dispenserkorb), (B) das Innere der Falle (FB = klebendes Förderband) und (C) die Kamera, die bei dem System verwendet wurde.....	54
Abbildung 21: TCS (A) aus dem Jahr 2013 im Brokkolibestand in Braunschweig (WC = Webcams; UH = USB-HUB in einer wetterfeste Kunststoffhülle) sowie (B) dreieckförmiger Metall-Rahmen des Systems	56
Abbildung 22: TCS aus dem Jahr 2014 (RP = Raspberry Pi; KH = Raspberry Pi wetterfeste Kunststoffhülle; MM = Minimonitor; UH = USB-HUB in einer wetterfesten Kunststoffhülle; WC = Webcam; MR = Metall-Rahmen aus dem Jahr 2013).....	57
Abbildung 23: Übersicht über den Versuchsaufbau zum Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye A) in 2014 in Braunschweig sowie in 2015 in Braunschweig und Hötzum und B) in 2014 in Hötzum. Schwarze Kreise stellen Brokkolipflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Aktivität der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison dar. Die TCS-Rahmen sind durch Dreiecke gekennzeichnet. Die drei TCS-Rahmenarten sind durch unterschiedlich gefärbte Dreiecke dargestellt.....	59
Abbildung 24: (A) Versuchsaufbau mit NB = Notebook (Samsung, Südkorea); A = RJ45 Adapter (LogiLink, Taiwan); K = Insektenkäfig aus Gaze in Zylinderform (56 cm ø und 51 cm hoch) mit Schadinsekten und OEOS (iotec GmbH, Deutschland). Das (B) OEOS (bestand aus einem E = Empfänger als CCD-Zeilensensor und einem S = Laserzeilensensor, der eine parallele Laserlinie aussendet.....	61
Abbildung 25: Weißkohlpflanze mit Kohlmottenlarve auf der Blattoberseite sowie durch diese verursachte Blattschäden (Fensterfraß und Lochfraß). Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet (FF = Fensterfraß, LF = Lochfraß). Im roten Viereck ist exemplarisch eine	

Stelle zwischen zwei Blättern hervorgehoben, die durch Bildverarbeitung als Larvenfraß ausgewertet wurde	70
Abbildung 26: Weißkohlpflanze, die durch die Mehligke Kohlblattlaus verursachte Pflanzenschäden aufweist. Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet	71
Abbildung 27: Weißkohlpflanze ohne Schadsymptome. Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden ausgerichtet in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet.....	71
Abbildung 28: Bilder, die mittels Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR; Baumer, Deutschland) und Fremdlichtquelle, die (A) den sichtbaren roten Wellenbereich bzw. (B) Halogenlampenbereich emittierte, erstellt wurden. Die Kamera war in einer Höhe von 40 cm senkrecht im 90° Winkel zum Beförderungsband ausgerichtet. Der Bereich mit Larve ist weiß markiert.....	72
Abbildung 29: Farbbildfoto mit Kamera HDR-CX730E (Sony, Japan) aufgenommen (A) sowie ein Graubild von einem Teilabschnitt der selben Pflanze, der mit der Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR; Baumer, Deutschland) und einer Fremdlichtquelle, die den sichtbaren roten Wellenbereich emittiert hat (B). Beide Bilder zeigen eine Pflanze mit Schäden der Mehligke Kohlblattlaus	73
Abbildung 30: Falschfarbenbilder von zwei Brokkolipflanzen (A) ohne Blattlausbefall und (B) mit Blattlausbefall. Die F_v/F_m -Werte von Blättern ohne Blattlausbefall (A) und mit Blattlausbefall (B) auf einer Pflanze wurden nach einer Aufnahme mit FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) und Bildbearbeitung mittels FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) visualisiert. Die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) sind hellgrün und F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) sind gelb dargestellt	74
Abbildung 31: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines abgetrennten Brokkoliblattes (A) mit einer Kohlmottenlarve sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Die Larve wurde auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar	75
Abbildung 32: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines Brokkoliblattes (A) mit einer großen Mehligke Kohlblattlauskolonie mit 200 Individuen sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Die Mehligke Kohlblattlauskolonie wurde auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar	76
Abbildung 33: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines (A) Brokkoliblattes mit den Schäden einer Kohlmotten-Larve sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Einige Fraßschäden wurden auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar ..	77
Abbildung 34: Farbbild eines Brokkoliblattes mit den Schäden, die durch (A) eine große Kolonie der Mehligke Kohlblattlaus mit 200 Individuen verursacht wurden sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen wurde. Die Schäden wurden auf beiden Bildern mit einem	

schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die Fv/Fm-Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die Fv/Fm-Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar	78
Abbildung 35: Thermogramme von Weißkohlpflanzen mit Mehliger Kohlblattlaus, die entweder (A) im Feld oder (B) unter kontrollierten Bedingungen mit i7 (FLIR systems Inc., USA) erfasst wurden	79
Abbildung 36: A) Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) einer Larve des Kleinen Kohlweißlings sowie (B) dazu entsprechendes Thermogramm erfasst mit i7 (FLIR systems Inc., USA)	80
Abbildung 37: Darstellung einer Pflanze mit Kohlmottenlarven und durch diese verursachten Schäden als (A) Intensitätsbild- und (B) Farbhöhenschemabild durch Gocator 2350 (LMI technologies, Canada).....	81
Abbildung 38: Distanzbilder einer Pflanze (A) mit Kohlmottenlarven und durch diese verursachten Schäden sowie einer Pflanze (B) mit Mehliger Kohlblattlaus sowie durch diese verursachten Schäden, aufgenommen mit der O3D 201PMD 3D TOF-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland).....	81
Abbildung 39: Absolute Häufigkeiten der ungeflügelten Mehligen Kohlblattläuse je 50 Pflanzen zu verschiedenen Boniturterminen im Jahr 2014 und 2015 für die Standorte Braunschweig und Hötzum. Die Boniturtermine sind durch Kalenderwochen (KW) und Monat gekennzeichnet	85
Abbildung 40: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an drei vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort (Braunschweig oben und Hötzum unten). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)	86
Abbildung 41: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (1 = BBCH 12-18, 2 = BBCH 19-40, 3 = BBCH 41-46, 4 = BBCH 47-49), Jahr und Ort (oben Braunschweig und unten Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS; x = arithmetisches Mittel) ...	87
Abbildung 42: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an der Blattoberseite bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine, Entwicklungsstadien sowie Pflanzenzonen akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: **** < 0,0001, x = arithmetisches Mittel).....	88
Abbildung 43: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr und Ort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: **** < 0,001; *** < 0,01; * < 0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)	89
Abbildung 44: Absoluter Anteil der Schadschmetterlingsarten (Px=Kohlmotte, Pr=Kleiner Kohlweißling, Mb=Kohleule, Ag=Gammaeule, Pb=Großer Kohlweißling, Ef=Kohlzünzler) am Befall im Jahr 2014 und 2015 an beiden Standorten an insgesamt 17 Boniturterminen (n=850) 90	
Abbildung 45: Absolute Häufigkeiten der sechs Schmetterlingsarten (Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Kohleule, Großer Kohlweißling, Gammaeule, Kohlzünzler) zu verschiedenen Boniturterminen im Jahr 2014 und 2015 für die Standorte Braunschweig und Hötzum.	91
Abbildung 46: Absolute Verteilung der Larven an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort. Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)	93

Abbildung 47: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49), Jahr und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel) ... 94

Abbildung 48: Absolute Verteilung der Larven der Kohlmotten an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel) 95

Abbildung 49: Absolute Verteilung der Larven des Kleinen Kohlweißlings an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel) 96

Abbildung 50: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit der vertikalen Pflanzenzonen, Jahr und Versuchsstandort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine sowie die sechs unterschiedlichen Schmetterlingsarten und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)..... 97

Abbildung 51: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von Schmetterlingsart, Jahr und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Die Daten wurden für die Statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine sowie die vertikalen Pflanzenzonen und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)..... 98

Abbildung 52: Absolute Verteilung der Kohlmottenlarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr, Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49). Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)..... 99

Abbildung 53: Absolute Verteilung der Kleinen Kohlweißlinglarven an Blattoberseite bzw. Blattunterseite einer Weißkohl- pflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr, Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49). Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s.=nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel) 100

Abbildung 54: Falschfarbenbilder der Pheromonfallen mit Kohleulen (KE), welche mit einem Camcorder (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus mit deaktiviertem Infrarot- Sperrfilter erfasst wurden. Auf dem Bild (A) sind Kopf und die Augen und auf dem Bild (B) ein Bein einer Kohleule auf einer Pheromonhalterung am Fallendach (FD) der Trichter- Sexualpheromonlockstofffallen von Csalomon durch weiße viereckige Umrandung hervorgehoben. Auf dem Bild (C) ist eine Kohleule mit schwirrenden und um die eigene Achse drehenden Bewegungen auf einem Z-Trap-Fallensystem (s. 3.3.1.2) neben einem Pheromondispenser (PD) durch weiße viereckige Umrandung hervorgehoben 104

Abbildung 55: Kohlflegeneiablage in Eimanschetten an den Standorten Braunschweig und Hötzum in den Jahren 2013, 2014 und 2015.....	105
Abbildung 56: Einfluss der Uhrzeit auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye an vier Terminen in 2013 und zwei Terminen 2014 auf dem Versuchsfeld in Braunschweig. Die Bonitur der Eimanschetten erfolgte von 6 Uhr morgens bis 20 Uhr abends in zweistündigem Abstand. Zwischen 20 und 6 Uhr wurde nicht bonitiert. Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=20, Imer, MCP, \bar{x} = arithmetisches Mittel).....	107
Abbildung 57: Anzahl der Kohldrehherzgallmücken in den Tetra-Fallen (Andermatt Biocontrol) an den Standorten Braunschweig und Hötzum in den Jahren 2013, 2014 und 2015.....	108
Abbildung 58: Schäden an (A) Weißkohlpflanzen und (B) Brokkolipflanzen, die durch Kohldrehherzgallmücken verursacht wurden	109
Abbildung 59: Vier TrapView Fotos aus 2013, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und manuell korrigiert wurden. Die Kohleulen sind durch grüne Vierecke hervorgehoben	113
Abbildung 60: Vier TrapView Fotos aus 2014, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den 21 markierten Schädlingen wurden zwei Kohlmotten identifiziert (rot hervorgehoben). Eine Kohlmotte wurde von dem System richtig markiert. 20 Markierungen waren falsch.....	114
Abbildung 61: Vier TrapView Fotos aus 2015, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den vier Kohlmotten auf den Bildern wurden drei von dem System markiert. Eine Kohlmotte wurde von dem System nicht erkannt (rot hervorgehoben).....	114
Abbildung 62: Vier TrapView Fotos aus 2014, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den 28 markierten Schädlingen wurden 14 von dem System markiert. 14 Motten wurden von dem System nicht erkannt (grüne Vierecke)	115
Abbildung 63: Anzahl an Kohlmotten, die entweder in den konventionellen Delta-Fallen (Andermatt Biocontrol, Schweiz) oder technisch modifizierten Fallen TrapView (Efos, Slowenien), auf den Klebeböden gefangen wurden. Die Fangzahlen wurden im Jahr 2014 und 2015 an zwei Standorten (Braunschweig und Hötzum) erfasst (n=136, Imer, Ismeans, \bar{x} = arithmetisches Mittel, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' < 0,01; '**' < 0,05; n.s.=nicht signifikant).....	116
Abbildung 64: Falschfarbenbilder von dem Z-Trap-Fallensystem (A) mit Kohleule und (B) Kohlmotte, welche mit Camcorder (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus mit deaktiviertem Infrarot-Sperrfilter erfasst wurden. Auf den Bildern wird die Berührung der Schmetterlinge mit den Metallstäben des Fallensystems dargestellt. Die Schmetterlinge (KE=Kohleule; KM=Kohlmotte) und Pheromondispenser (PD) sind durch eine viereckige weiße Umrandung hervorgehoben	117
Abbildung 65: Ergebnisse der Z-Trap-Versuche unter kontrollierten Bedingungen. Im Zeitraum vom 14.04.2015 bis 20.04.2015 wurde die Falle mit dem Sexualpheromon der Kohleule und im Zeitraum vom 20.04.2015 bis 24.04.2015 die Falle mit dem Sexualpheromon der Kohlmotte getestet	118
Abbildung 66: Ergebnisse der Z-Trap-Versuche im Kohlgemüsefeld. Die Versuche fanden im Zeitraum vom 20.06.2015 bis 18.09.2015 mit dem Sexualpheromon der Kohleule statt	119
Abbildung 67: Ergebnisse des digitalen Trichterfallensystems der Hochschule Osnabrück. 2013 wurde die Falle mit dem Pheromon der Kohleule untersucht. (A) LeanXcam (leanXcam, SCS AG , Schweiz) Originalbild mit dem Beifang Saateule, (B) LeanXcam (leanXcam, SCS AG ,	

Schweiz) Bild mit Saateule nach digitaler Bildverarbeitung, (C) LeanXcam (leanXcam, SCS AG , Schweiz) Bild mit Saateule nach einer weiteren digitalen Bildverarbeitung	120
Abbildung 68: Kleine Kohlflye auf einer Brokkolipflanze, die durch zwei der drei Webcams (Microsoft, USA) des TCSs erfasst wurde. (A) Kleine Kohlflye bei der Eiablage, (B) Kleine Kohlflye beim Erkunden der Fläche (weiße Vierecke)	121
Abbildung 69: Bildschirmfoto der automatischen Objekterkennung der TCS und die damit verbundenen Herausforderungen. Ein (A) Original Bild wurde von dem Bildverarbeitungsprogramm in (B) ein binäres Bild ohne Stängel und Hintergrund umgewandelt (schwarz-weißes Bild). Anschließend wurde mit einem weiteren Algorithmus die Plausibilität des Ergebnisses überprüft und die Bereiche mit Kleiner Kohlflye auf dem Originalbild rot markiert. In (C) der Tabelle wurde die Anzahl erkannter Fliegen bei jeder Kamera-Aktivierung erfasst. Es wurden bis zu sieben Fliegen zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einer Pflanze durch das TCS gezählt. Auf der Pflanze befand sich aber nur eine Kleine Kohlflye (weißer Viereck).....	122
Abbildung 70: Zwei Beispiele (A) und (B) der Artefaktbilder, die bei dem Einsatz der TCS im Jahr 2013 entstanden und die zur fehlerhaften Detektion der Kleine Kohlflye führten	122
Abbildung 71: Anzahl der abgelegten Eier der Kleinen Kohlflye in den Eimanschetten ohne bzw. mit einem TCS-Rahmen. Die TCS-Rahmen waren entweder aus Metall oder Kunststoff. Die Außenfarbe der TCS-Rahmen unterschied sich. Diese war entweder silbern, gelb oder braun. Die Versuche wurden 2014 und 2015 in einem Brokkolibestand in Hötzum und Braunschweig durchgeführt. Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (2014 n=66 (silber), n=108 (gelb bzw. braun), n=390 (ohne Rahmen); 2015: n=270 (silber, gelb bzw. braun), n=1080 (ohne Rahmen), glmmADMB, lsmean, x = arithmetisches Mittel)	124
Abbildung 72: Konvertierte binäre schwarz-weiß Bilder der LLD-Datenblocks des OEOS von vier Schädlingen ((A) Kleine Kohlflye, (B) Kohlmotte, (C) Kleiner Kohlweißling und (D) Kohleule. Jedes Bild hat die gleiche Gesamt-Pixelanzahl von 393 x 723 Pixeln).....	125
Abbildung 73: Anzahl schwarzer Pixel verschiedener Kohlschädlinge. Die Werte wurden mittels OEOS unter kontrollierten Bedingungen erfasst. Die Versuchsdaten sind unbalanciert. Der Stichprobenumfang unterscheidet sich je nach Schädling (Kleine Kohlflye: n=16, Kohlmotte: n=20, Kohleule: n=12, Kleiner Kohlweißling: n=10). Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (glm, lsmean, x= arithmetisches Mittel)	126
Abbildung 74: Absolute Verteilung der Larven der Kohleule an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel) .	186
Abbildung 75: Absolute Verteilung der Larven der Gammaeulen an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)	187
Abbildung 76: Absolute Verteilung der Larven des Großen Kohlweißlings an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben	

unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, \bar{x} = arithmetisches Mittel)	187
Abbildung 77: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblättern einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 2 (\cong BBCH 19-40) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '**' < 0,01; '*' < 0,05; n.s.=nicht signifikant; \bar{x} = arithmetisches Mittel).....	193
Abbildung 78: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblätter einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 3 (\cong BBCH 41-46) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '**' < 0,01; '*' < 0,05; n.s.=nicht signifikant; \bar{x} = arithmetisches Mittel).....	194
Abbildung 79: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblätter einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 4 (\cong BBCH 47-49) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '**' < 0,01; '*' < 0,05; n.s.=nicht signifikant; \bar{x} = arithmetisches Mittel).....	195
Abbildung 80: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen- Eigelegeanzahl (B) in Braunschweig im Jahr 2014 (s. 3.2.2.4)..	196
Abbildung 81: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen- Eigelegeanzahl (B) in Braunschweig im Jahr 2015 (s. 3.2.2.4)..	196
Abbildung 82: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen- Eigelegeanzahl (B) in Hötzum im Jahr 2014 (s. 3.2.2.4)	196
Abbildung 83: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen- Eigelegeanzahl (B) in Hötzum im Jahr 2015 (s. 3.2.2.4)	197
Abbildung 84: Hut-Falle mit einem Aggregationspheromon von <i>Csalomon</i> (Ungern) (A) zur Erfassung von Erdflöhe spp. sowie präparierte Aedoeagus von <i>P. atra</i> (B); <i>P. undulata</i> (C) und <i>P. cruciferae</i> (D)	200

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Merkmale unterschiedlicher Schadinsekten an Kohlgemüse.....	4
Tabelle 2: Kennzeichen der Erdflöhe nach Mohr (2006) und Freude et al. (1966).....	4
Tabelle 3: Kennzeichen der Lepidopteren-Schadinsekten an Kohlgemüse	5
Tabelle 4: Wellenlängen und Frequenzen der entsprechenden Strahlungsspektrumarten nach Hecht (2018).....	9
Tabelle 5: Einteilung der optoelektronischen Sensoren nach Hering und Martin (2017), Kleger (1998) und Breitmeier et al. (1995)	10
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der beschriebenen optoelektronischen Sensorsysteme. Alle Methoden basieren auf berührungsloser und zerstörungsfreier Erfassung der spektralen Information.....	11
Tabelle 7: Übersicht von Zielsetzung, Zeitraum, Versuchsinsekten sowie die Versuchsbedingungen von untersuchten optoelektronischen Methoden sowie Methoden, die als Referenz für optoelektronische Methoden dienten (Kp. Nr. = Kapitel Nummer).....	18
Tabelle 8: Auflistung der in der Arbeit vorkommenden und verwendeten Kohlgemüsevarietäten bzw. Kohlgemüseconvarietäten sowie verwendete Sorten in Abhängigkeit von den Versuchsjahren.....	19
Tabelle 9: Aussaat- und Pflanztermine der Kohlgemüsevarietäten für Freilandversuche	20
Tabelle 10: Bedingungen, nach denen die N-Düngung auf dem Feld erfolgte	21
Tabelle 11: Größe der Kohlgemüsevarietäten, die bei den Versuchen unter kontrollierten Bedingungen verwendet wurden	21
Tabelle 12: Systematik der in der Arbeit untersuchten Kohlschädlinge nach CABI.org (Centre for Agriculture and Bioscience International).....	22
Tabelle 13: Zusammenstellung der Zuchtbedingungen in Abhängigkeit von Insektenstadien und deren biologischen Grundbedürfnissen.....	23
Tabelle 14: Definitionen der verwendeten Perspektiven nach Karn und Frick (2008)	25
Tabelle 15: In den Versuchen verwendete Kameratypensysteme und wichtige Kameraparameter (n.a. = von der Firma nicht angegeben)	26
Tabelle 16: Definition der Blattseiten nach Wagenitz (2003). Der Blattaufbau von Kohlgemüse wird nach Verteilung der Stomata als hypostomatisch bezeichnet.....	27
Tabelle 17: Parameter zu der im Versuch verwendeten Graubildkamera und deren Objektiv	28
Tabelle 18: Grad-Minuten-Sekunden Koordinaten (GMS-Koordinaten) sowie Dezimalkoordinaten von den Flächen, an denen Freilandversuche stattfanden	35
Tabelle 19: Vorkulturen der jeweiligen Schläge, auf denen Weißkohl bzw. Brokkoli für die Feldversuche angepflanzt wurden	36
Tabelle 20: Definitionen der vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze	37
Tabelle 21: Im Versuchszeitraum eingesetzte Fallen, Hersteller der verwendeten Pheromondispenser sowie Versuchszeitraum, in dem die jeweiligen Fallen eingesetzt wurden. In der Tabelle wurde zwischen konventionellen Sexualpheromonfallen wie Delta-Falle oder Trichter-Falle sowie optoelektronischer Falle unterschieden. Die optoelektronischen Sexualpheromonfallen werden in dem Kapitel 2.5 beschrieben	42
Tabelle 22: Standort der Kontrollpunkte zur Erfassung der adulten Kohlmotten und Kohleulen in Abhängigkeit von Jahr und Versuchsfläche	44

Tabelle 23: Übersicht der untersuchten Zeitperioden an den sechs Terminen im Jahr 2013 und 2014 zur Erfassung der Eiablage der Kleinen Kohlfliege in Eimanschetten	46
Tabelle 24: Versuchszeiträume, in denen bestimmte Arten der technisch modifizierten Sexualpheromonlockstofffallen zur Erfassung der Schadinsektenarten geprüft wurden.....	49
Tabelle 25: Zusammenfassung der TCS-Bestandteile in Abhängigkeit von Versuchszeitraum und Versuchsbedingungen.....	55
Tabelle 26: Bedeutung der HSV-Farbraumgrenzwerte sowie der definierte maximale (Max) bzw. minimale (Min) Farbraumbereich und die Pixelzahl eines Objekts bei den Untersuchungen mit der Kleinen Kohlfliege.....	57
Tabelle 27: In dem Versuch eingesetzte dreieckförmige TCS-Rahmenarten in Abhängigkeit von Standort und Jahr zur Untersuchung des Einflusses auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlfliege.....	58
Tabelle 28: Übersicht über die untersuchten Lichtschrankensensor-Systemarten und einige Parameter der Lichtschrankensensor-Systeme nach Kovacheva et al. (2014) sowie der Versuchszeitraum.....	60
Tabelle 29: Übersicht der Bestandteile des optoelektronischen Objekt Scanners (iotec GmbH, Deutschland) in 2014 und 2105.....	61
Tabelle 30: Übersicht zu den verwendeten Variablen, die im Fokus der jeweiligen Korrelationsuntersuchung standen.....	63
Tabelle 31: Übersicht der abhängigen Variablen sowie der unabhängigen Variable, die im Fokus der Untersuchung mit bestimmten statistischen Modellen standen. Je nach Fragestellung wurden die Daten an ein bestimmtes statistisches Modell (lmer = gemischtes Lineares Modellen glm.nb = generalisiertes lineares Modell mit der Annahme der negativen Binomialverteilung; glmmadmb = generalisiertes lineares gemischtes Modell mit AD-Modell Bilder; glm = generalisiertes lineares Modell; lm = einfaches lineares Modell) angepasst. Signifikante Variantenunterschiede wurden mittels einer bestimmten statistischen Methode ausgewertet	64
Tabelle 32: BBCH-Stadien der Weißkohlpflanzen nach Meier (1997) sowie die korrespondierenden Entwicklungsstufen nach Forster et al. (1992)	65
Tabelle 33: Ergebnisse der Untersuchung, wie häufig sich die Mehligke Kohlblattlaus bzw. die Kohlmotten- bzw. Kohleulenlarven auf der Blattoberseite einer Weißkohlpflanze aufhalten. Zudem wurde die Anzahl an Pflanzen, auf denen sich die Insekten auf der Blattoberseite befanden, notiert. Die Anzahl an Mehligken Kohlblattläusen im Pflanzenherz konnte nur destruktiv erfolgen, daher wurden die Daten hierzu nicht erhoben. Es gab zwei Wiederholungen: 1. Wdh. = erste Wiederholung, 2. Wdh. = zweite Wiederholung	69
Tabelle 34: Effekt der Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer, Deutschland) mit einem Objektiv RICOH FL-CC3516-2M (Pentax, Japan)) und eines Fremdlichtquellentyps auf die Bildanalyse zur Erkennung von Insekten bzw. durch Schadinsekten verursachte Schäden. (+ = spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. Schäden benutzt werden konnten; - = spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. Schäden nicht verwendet werden konnten; NIR = Nahinfrarotwellenbereich).....	73
Tabelle 35: Effekt der zwei 3D-Kamerasystemtypen Gocator 2350 (LMI technologies, Canada) und O3D 201PMD 3D TOF-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland) auf die Bildanalyse zur Erkennung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden (+ = Spektrale Informationen, die zur Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden benutzt werden konnten; - = Spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden nicht verwendet werden konnten)	80

Tabelle 36: Getestete optoelektronische Systeme zur Detektion von spektralen Informationen von Schadschmetterlingsraupen und Mehligler Kohlblattläuse sowie durch diese verursachten Schäden (ja = mit dem System und anschließender konventioneller Bildverarbeitung konnte die Erfassung erfolgen; nein = die Methode war nicht erfolgreich; - = es gab keine Untersuchungen dazu; rot = Fremdlichtquelle mit emittiertem sichtbaren roten Wellenbereich 625 nm; Halogen = Fremdlichtquelle mit emittiertem Halogenlampenwellenbereich 780 nm; NIR = Fremdlichtquelle mit emittiertem nahinfraroten Wellenbereich 940 nm).....	83
Tabelle 37: Relative Häufigkeit der Mehligen Kohlblattlaus an verschiedenen Pflanzenzonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (n=50).....	86
Tabelle 38: Relative Häufigkeit der Mehligen Kohlblattlaus an verschiedenen Blattseiten einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (Stichprobenumfang; n=50).	88
Tabelle 39: Zeitpunkt der Befallsmaxima der sechs Schmetterlingsarten innerhalb einer vollständigen Kulturperiode (Pflanzung bis Erntereife) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig; HO=Hötzum) und Jahr.....	92
Tabelle 40: Relative Häufigkeit der Larven an verschiedenen Pflanzenzonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (n=50).....	93
Tabelle 41: Relative Häufigkeit der Schmetterlingslarven an verschiedenen Blattseiten einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (n=50).....	96
Tabelle 42: Errechnete Korrelations-Koeffizienten sowie p-Werte nach Spearman (Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s.=nicht signifikant) zwischen der Larvenanzahl und männlichen Kohlmotten in den Jahren 2014 und 2015 an den Versuchsstandorten Braunschweig und Hötzum	101
Tabelle 43: Errechnete Korrelations-Koeffizienten sowie p-Werte nach Spearman (Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' <0,01; '*' <0,05; n.s.=nicht signifikant) zwischen der Larvenanzahl bzw. Eigelegeanzahl der Kohleule und männlichen Kohleulen in den Jahren 2014 und 2015 an den Versuchsstandorten Braunschweig und Hötzum	102
Tabelle 44: Ergebnisse des Kreuzkorrelationstests (ccf). Die Absolutwerte > 0,433 (Signifikanzwert) für bestimmte Zeitabschnitte wurden als signifikant (+) und < 0,433 als nicht signifikant (-) in Anhängigkeit von Versuchsjahr sowie Versuchsstandort bewertet. Erfasst wurden ausschließlich signifikante Korrelationen sowie die entsprechenden wöchentlichen Verzögerungen. Je höher die Differenz zwischen dem Absolut- und dem Signifikanzwert war, desto stärker war die Korrelation.....	103
Tabelle 45: Ergebnisse des Versuchs zur Fängigkeit der Trichter-Fallen und entsprechenden Pheromonen von dem Anbietern Andermatt Biocontrol (Schweiz) sowie Csalomon (Ungarn) ..	103
Tabelle 46: Maximale mittlere Anzahl abgelegter Eier in einer Saison in Abhängigkeit von Ort und Jahr.....	105
Tabelle 47: Tagesspezifische Merkmale der sechs Boniturtermine, an denen das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye erfasst wurde.....	106
Tabelle 48: Anteil an abgelegten Eiern zu einem bestimmten Datum zu einem bestimmten Zeitpunkt auf dem Versuchsfeld in Braunschweig	106
Tabelle 49: Maximale mittlere Anzahl gefangener Kohldrehherz gallmücken pro Sexualpheromon-Falle einer Saison in Anhängigkeit vom Ort und Jahr	108
Tabelle 50: Anteil an Brokkolipflanzen mit Kohldrehherz gallmückensymptomen in Hötzum in den Jahren 2014 und 2015 an Pflanzen, die zu unterschiedlichen Terminen ausgepflanzt wurden .	109
Tabelle 51: Im Versuchszeitraum eingesetzte Überwachungsmethoden und der damit verbundene Zeitaufwand und Materialkosten (ÜM = Überwachungsmethoden, BSK = Bestandskontrolle, SPF = Sexualpheromonlockstofffallen, EM = Eimanschetten).....	111

Tabelle 52: Maximale, minimale und durchschnittliche Anzahl schwarzer Pixel in Abhängigkeit vom Kohlschadinsekt (Kleine Kohlflye: n=16, Kohlmotte: n=20, Kohleule: n=12, Kleiner Kohlweißling: n=10)..... 126

Tabelle 53: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Detektion der geflügelten adulten Kohlschädlinge mittels optoelektronischer Sensorsysteme 127

Tabelle 54: Bodenuntersuchungsergebnisse von den Parzellen in Braunschweig (B) und Hötzum (H), auf denen Versuche stattfanden. Die Untersuchungen wurden durch die LUFA Nord-West durchgeführt. Gehaltstufen: A = sehr niedrig, B = niedrig, C = optimal bzw. anzustreben, D = hoch, E = sehr hoch..... 179

Tabelle 55: Bodenuntersuchungsergebnisse für Stickstoff von den Parzellen in Braunschweig (B) und Hötzum (H), auf denen Versuche stattfanden. Die Untersuchungen wurden durch die LUFA Nord-West durchgeführt..... 179

Tabelle 56: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Jahr (2014 bzw. 2015) und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 40) 179

Tabelle 57: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 41) 179

Tabelle 58: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Blattseiten (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 42)..... 180

Tabelle 59: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Blattseiten (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzenzonen, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 43)..... 180

Tabelle 60: Im Versuchszeitraum zu bestimmten Terminen vorkommende Pfirsichblattläuse..... 181

Tabelle 61: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 46)..... 181

Tabelle 62: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 47) 181

Tabelle 63: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohlmotten- bzw. Kleinen Kohlweißlinglarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 48; Abbildung 49) 182

Tabelle 64: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohleule, Gammaeule, Großem Kohlweißling bzw. Kohlzünsler in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (NaN=Aufgrund der Daten Struktur konnten die Daten nicht statistisch ausgewertet werden)..... 183

Tabelle 65: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) 188

Tabelle 66: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzenzone, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 50)..... 188

Tabelle 67: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Schmetterlingsart, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 51)..... 188

Tabelle 68: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohlmotten- bzw. Kleinen Kohlweißlinglarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzzone (Tabelle 20), Jahr, Entwicklungsstadium und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 52; Abbildung 53) 188

Tabelle 69: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohleulen-, Gammaeulen-, Großer Kohlweißling- und Kohlzünslerlarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzzone (Tabelle 20), Jahr, Entwicklungsstadium und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO). NaN=Aufgrund der Daten Struktur konnten die Daten nicht statistisch ausgewertet werden 190

Tabelle 70: Statistische Vergleiche zum Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye in Abhängigkeit von bestimmten Zeitperioden (Tabelle 23) und Datum (Abbildung 56) 197

Tabelle 71: Test auf Korrelation zwischen der Anzahl der überlappten Blätter im Vergleich mit Befallsdauer (3.1.1). 198

Tabelle 72: Statistische Vergleiche der Fv/Fm-Werte der CFBA (3.1.3). Untersucht wurde, wie die Fv/Fm-Werte von bestimmten Schadinsekten sich von den befallsfreien Bereichen unterscheiden. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich Fv/Fm-Werte von geschädigten Bereichen durch Schadinsekten sich von den ungeschädigten Bereichen unterscheiden (glm (family=binomial); lsmeans) 198

Tabelle 73: Statistische Vergleiche der Temperaturunterschiede zwischen den Blattflächen mit Insekten (Mehlige Kohlblattlaus oder Schmetterlingslarven) und ohne Insekten bzw. zwischen den unterschiedlichen Gewebearten (geschädigtes bzw. symptomfreies Gewebe). Zwischen den unterschiedlichen Gewebearten bestanden keine statistisch signifikanten Unterschiede ... 199

Tabelle 74: Statistischer Vergleich der Anzahl männliche Kohlmotten im TrapView-System und konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen (Abbildung 63). Zwischen Jahren und unterschiedlichen Orten bestanden keine statistisch signifikanten Unterschiede 199

Tabelle 75: Statistische Vergleiche zum Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye in Abhängigkeit von Jahr und verschiedenen äußeren TCS-Rahmenfärbungen (s=silber; o=ohne Rahmen; b=braun; g=gelb; Abbildung 71) 199

Tabelle 76: Statistische Vergleiche der schwarzen Pixelanzahl der schwarz-weiß Bilder der LLD-Datenblocks des OEOS in Abhängigkeit der Schadinsektenart (Abbildung 73) (Dr= Kleine Kohlflye; Px=Kohlmotte; Pr=Kleiner Kohlweißling; Mb=Kohleule) 199

Tabelle 77: Im Jahr 2014 und 2015 vorkommende Kohlerdfloharten in drei Hut-Fallen (KLP+-Fallen) mit je einem Aggregationspheromon zu einem bestimmten Termin 200

Tabelle 78: Anteil an vorkommenden Kohlerdfloharten 201

Abkürzungsverzeichnis

A	Amper
Ah	Amperstunden
AG	Aktiengesellschaft
AIC	Akaike Information Criterion
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BMEL bzw.	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft Beziehungsweise
ca.	Circa
CABI	Centre for Agriculture and Bioscience International
CCD	Charge-Coupled Device
CFBA	Chlorophyllfluoreszenz-Bildanalyse
cm	Zentimeter
CMOS	Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor
CSV	Comma-separated values
°C	Grad Celsius
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
DIN	Deutschen Instituts für Normung
Dr.	Doktor
DSP	Digitaler Signalprozessor
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	European Union
eV	Elektronenvolt
e.V.	Eingetragener Verein
€	Euro
F_0	Grundfluoreszenz
F_m	maximale Fluoreszenz
F_v	variable Fluoreszenz
F_v/F_m	Maß für die maximale photochemische Effizienz von Photosystem II
GB	Gigabyte
GIMP	GNU Image Manipulation Program
GLM	Generalisiertes lineares Modell
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co. KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
glmmadmb	Lineares gemischtes Modell mit AD-Model Bilder
glm.nb	Generalisiertes lineares Model mit der Annahme der negativen Binomialverteilung
GPS	Global Positioning System
GMS	Grad- Minuten-Sekunden
GSM	Global System for Mobile Communications
h	Stunde
ha	Hektar
HDMI	High-Definition Multimedia Interface
HSV	Hue, Saturation, Lightness (Farbwert, Farbsättigung und

Hz	Hellwert) Hertz
ITC	International Trade Center
ImageJ	Java-based image processing program
JKI	Julius Kühn-Institut
JPEG	Joint Photographic Experts Group
K	Grad Kelvin
kg N ha ⁻¹	Kilogramm Stickstoff pro Hektar
KW	Kalenderwoche
l	Liter
L.	Linnaeus
L3	Drittes Larvenstadium
L4	Vierte Larvenstadium
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-Emitting Diode
LEH	Lebensmitteleinzelhandel
LLC	Limited liability company
LLD	Laser Line Data
l/m ²	Liter pro Quadratmeter
LMER	Gemischtes lineares Modell
LSMEANS	Least-square-mean
LVG	Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau
m	Meter
m ²	Quadratmeter
mA	Milliampere
mAh	Milliamperestunde
max.	Maximal
MB	Megabyte
min.	Minimal
MCP	Multiple Comparison Procedures (Multiple Mittelwertvergleiche)
ml	Milliliter
mm	Millimeter
m/s	Meter pro Sekunde
µm	Mikrometer
µmol Photons m ⁻² s ⁻¹	Mikromol Photons pro Quadratmeter pro Sekunde
n	Stichprobenumfang
NAP	Nationaler Aktionsplan
nm	Nanometer
NPK(Mg)	Stickstoff, Phosphor, Kalium (Magnesium)
OEOS	Opto Elektronischer Objekt Scanner
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
p	p-Wert, Überschreitungswahrscheinlichkeit
PMD	Photonic Mixing Device
Prof.	Professor
PSD	Positionsempfindliche Dioden
PVC	Polyvinylchloride

rF	Relative Luftfeuchtigkeit
RGB	Rot, Grün und Blau
SDHC-Karte	Secure Digital High Capacity-Karte
SIM-Karte	Subscriber Identification Module-Karte
spp.	Species pluralis
SWAT	Simulationsprogramm für Kohlflye, Möhrenflye und Zwiebelflye
t	Tonne (= 1000 kg)
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TCS	Triangel-Camera-System
TOF	Time of flight
USA	United States of America
USB	Universal Serial Bus
V	Volt
vs.	Versus
W	Watt
z. B.	Zum Beispiel
%	Prozent, Parts pro Hundert (0,01)
‰	Promille, Parts pro Tausend (0,001)
∅	Durchmesser
λ	Wellenlänge
C++	C-Plus Programmiersprache
C#	C-Sharp Programmiersprache

1. Einleitung

Der Freilandgemüseanbau (125.243 ha) überwiegt im Vergleich zum Gemüseanbau unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen einschließlich Gewächshäusern (1.263 ha) in Deutschland (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021; Klockgether et al. 2016). In Deutschland wurden im Jahr 2020 auf einer Fläche von 19 046 ha insgesamt 848 000 t Kohlgemüse erzeugt. Dies entspricht einem Anteil an der gesamten Gemüseanbaufläche im Freiland von 15 % und einem Anteil der gesamten Erntemenge von 23 %. Somit ist diese Gemüsegruppe neben Blatt- und Stängelgemüse (47 945 ha und 661 748 t) sowie Wurzel- und Knollengemüse (36 154 ha und 1 717 410 t) eine der bedeutendsten in Deutschland. Die Anbauswerpunkte von Kohlgemüse liegen in Schleswig-Holstein (4 205 ha), Nordrhein-Westfalen (3 739 ha) und Niedersachsen (3 175 ha). Hierbei sind insbesondere Weißkohl (5 946 ha), Blumenkohl (3 045 ha), Brokkoli (2 753 ha), Rotkohl (2 202 ha) und Kohlrabi (1 783 ha) von großer Bedeutung (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021). Der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Kohlgemüseanbaufläche betrug im Jahr 2020 ca. 9 % der Gesamtkohlanbaufläche in Deutschland (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021).

Kohlgemüse wird sowohl als frisches Gemüse wie auch als verarbeitetes Gemüseerzeugnis an den Endverbraucher verkauft. Die Qualitätskriterien für frisches Obst und Gemüse sind in der Verordnung (EU) Nr. 1308/2013 und der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 543/2011 festgelegt. Die Leitsätze für die Gemüseerzeugnisse des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL 2008) beschreiben die geforderte Qualität von Rohware, die für die industrielle Verarbeitung bestimmt ist. Sowohl nach den allgemeinen (EU-) Vermarktungsnormen als auch nach den Leitsätzen sollten pflanzliche Erzeugnisse praktisch frei von Schädlingen und Schäden durch Schädlinge sein. Zudem werden bei Lebensmitteln Pflanzenschutzmittelrückstände überprüft. Die Rückstandshöchstgehalte werden nach der Verordnung (EG) Nr. 396/2005, Rückstands-Höchstmengenverordnung und nach den Vorgaben des Lebensmitteleinzelhandels (LEH) zur maximalen Menge erlaubter Rückstände im Produkt festgelegt. Die von dem LEH spezifizierten Rückstandshöchstgehalte liegen in der Regel 50 % bis 70 % unter den gesetzlich vorgeschriebenen.

Die Erträge sowie die marktgerechte Erntequalität können durch ein breites Spektrum an Schadinsekten bei Kohlgemüse stark dezimiert werden (Crüger et al. 2002). Schadinsekten werden insbesondere in der integrierten Landwirtschaft bevorzugt mittels synthetisch-chemischer Pflanzenschutzmittel bekämpft. Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist auf der nationalen Ebene durch das Pflanzenschutzgesetz, den Nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (BMEL 2017) und der Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates geregelt. Um den gesetzlichen sowie durch den LEH festgelegten Anforderungen für Pflanzenerzeugnisse zu entsprechen, ist eine nachhaltige und auf das notwendige Maß beschränkte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln erforderlich. Des Weiteren ist die Nachfrage an nachhaltig produzierten hoch qualitativen Agrarerzeugnissen in den letzten Jahren gestiegen (International Trade Center, Europäische Kommission (ITC) 2019).

Einer der Ecksteine des integrierten Pflanzenschutzes sind Schwellenwerte (Poehling und Verreet 2013; PflSchG; Riley D. G. 2011; Richtlinie 2009/128/EG). Diese können nach Berücksichtigung der aktuellen Befallssituation im Feld mittels Überwachung zur gezielten Anwendung von Insektiziden führen. Je nach Art des Schadinsekts und Gemüse- bzw. Kohlart werden unterschiedliche Methoden oder Methodenkombinationen zur Schädlingsüberwachung empfohlen (Sauer und Fischer 2013; Smith et al. 2002; Forster et al. 1992; Muirhead-Thomson 1991). Die zurzeit verfügbaren Methoden zur Schätzung des aktuellen Schadinsektenbefalls im Gemüseanbau unter Freilandbedingungen sind entweder sehr zeitaufwändig oder nicht flächenspezifisch und aus diesem Grund in der Praxis wenig implementiert (Rösch et al. 2007). Der Einsatz von Insektiziden kann jedoch durch Überwachung in Kombination mit Schadschwellen im Kohlanbau in einer Größenordnung von 24 % bis zu 100 % reduziert werden (Burkness und Hutchison 2008; Smith et al. 2002; Walker et al. 2001; Forster et al. 1992; Beck und Cameron 1990).

Die Digitalisierung und die Vernetzung sind heute in vielen Lebensbereichen alltäglich und haben in vielen Wirtschaftsbereichen und der Landwirtschaft zu einer höheren Produktivität, Genauigkeit und Effektivität geführt (Brynjolfsson und McAfee 2014). Der allgemeine Fortschritt in der Informationstechnik und der Informatik selber sowie höhere Anforderungen an die Betriebe führten in den letzten Jahren verstärkt zur Entwicklung und Weiterentwicklung von sensorbasierten Systemen zur Datenerfassung (Preti et al. 2021b; Noack 2018; Kubinger et al. 2017; Paulus 2017; Ruckelshausen 2016; Dölger und Gerwers 2014; Gebbers und Adamchuk 2010; Rösch et al. 2007). Obwohl sensorbasierte Technologien in vielen Bereichen des Pflanzenbaus bereits eingesetzt werden (Preti et al. 2021a; Preti et al. 2021b; Stafford 2021; Noack 2018; Kubinger et al. 2017; Ruckelshausen 2016; Dölger und Gerwers 2014; Ganzelmeier 2014; Lilienthal 2014; Gebbers und Adamchuk 2010), gibt es zurzeit keine Methoden, die Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden an Gemüse unter Freilandbedingungen zu erfassen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zahlreiche optoelektronische Sensorsysteme getestet mit dem Ziel, Überwachungsmethoden zu digitalisieren und nach Möglichkeit zu automatisieren, um den Zeitaufwand für die Gemüsebau-Praxis im Freiland zu senken und den Einsatz von Überwachungsmethoden zu fördern.

1.1 Allgemeines zum Kohlgemüse (*Brassica oleracea* L.)

Kohlgemüse, *Brassica oleracea* L., ist in der Regel eine ein- oder zweijährige krautige Pflanze, die der Gattung *Brassica*, der Familie Brassicaceae und der Klasse der Dicotyledoneae zugeordnet wird. Es handelt sich dabei um eine Gattung, welche vom Wildkohl (*Brassica oleracea* var. *oleracea*) abstammt und zahlreiche Zuchtformen umfasst. Die Zuordnung der Zuchtformen erfolgt aufgrund der morphologischen Veränderungen der Pflanze. Diese werden als Varietäten und Convarietäten geführt. Die kopfbildenden Varietäten *capitata* (Weißkohl), sowie *sabauda* (Wirsing) weisen eine gestauchte Sprossachse auf und werden der Convarietät *capitata* zugeordnet. Die Varietäten *italica*

(Brokkoli) und *botrytis* (Blumenkohl), haben einen deformierten Blütenstand und bilden die Convarietät *botrytis*. Die Varietäten ohne Kopfbildung und einer Verdickung der Sprossachse werden in der Convarietät *acephala* (Kohlrabi) zusammengefasst (Krug et al. 2002).

Die Pflanzung der wirtschaftlich bedeutenden Brassicaceae im Freiland in Deutschland (s. 1. Einleitung) kann je nach Kohlgemüse-Zuchtformen und Sorte zwischen der Kalenderwoche 9 (Anfang März) und Kalenderwoche 33 (Mitte August) erfolgen. Die Kulturdauer kann zwischen 28 und 270 Tage betragen und die Ernte je nach Witterung, Zuchtform, Sorte und Preisverlauf von Mai bis Februar erfolgen (Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau (LVG) Erfurt 2017; Krug et al. 2002). Für die optimale Entwicklung der Kulturpflanzen sind nährstoffreiche, mittelschwere bis schwere Böden mit guter Wasserführung und neutraler bis alkalischer Bodenreaktion von Vorteil. Eine ausreichende Nährstoffversorgung ist im Kohlgemüseanbau von großer Bedeutung (Krug et al. 2002). Nach den Düngeempfehlungen der Pflanzenschutzdienste der Länder, insbesondere unter Berücksichtigung der neuen Düngerverordnung, liegt der Stickstoff(N)-Sollwert für Kohlgemüse je nach Zuchtform und Sorte zwischen 220 kg N ha⁻¹ (Brokkoli) und 320 kg N ha⁻¹ (Weißkohl) (Lindemann-Zutz et al. 2021). Der Düngerbedarf an Kalium, Phosphor und Magnesium richtet sich nach Kultur, Bodenart, Witterung und den Bodenuntersuchungsergebnissen (Lindemann-Zutz et al. 2021). Neben dem Düngen sind während der Vegetationsperiode weitere Pflegemaßnahmen wie ausreichende Wasserversorgung und Pflanzenschutzmaßnahmen wie Unkraut-, Krankheits- und Schädlingsbekämpfung wichtig (Krug et al. 2002).

1.1.1 Schadinsekten

Insekten stellen die artenreichste Klasse des Tierreichs dar (Poehling und Verreet 2013). In Deutschland kommen aus dieser Klasse bis zu 33.300 Arten vor (Langer 2021). Zahlreiche Arten können wirtschaftliche Schäden an Nutzpflanzen, Nutzpflanzenbeständen und Erntegütern verursachen und zählen somit zu den Schadinsekten (Poehling und Verreet 2013; Aust et al. 1993). Nach Freier et al. (2015) sowie Roßberg und Hommes (2014) steht die Anwendung von Pflanzenschutzmittel zur Bekämpfung von Schadinsekten im Weißkohl für den Frischmarkt in Deutschland im Vordergrund. Der Behandlungsindex, welcher sich auf die Anzahl an ausgebrachten Pflanzenschutzmitteln bezieht, kann bei Insektiziden im Vergleich zu Herbiziden bzw. Fungiziden im Weißkohl bis zu fünfmal bzw. dreimal höher sein (Roßberg und Hommes 2014). Kohlgemüse weist ein breites Spektrum an beißenden und saugenden Schadinsekten auf (Tabelle 1, Tabelle 2, Tabelle 3). Für die ausgewählten Arten von Kohlgemüse sind bislang insgesamt 29 schädigende Insektenarten beschrieben. (s. 1.1.1, Crüger et al. 2002). Dabei kann sich das Schädlingsspektrum und das Ausmaß der Schädigungen je nach Standort und Jahr ändern.

Als bedeutende tierische Schaderreger, die jährlich zu erheblichen Ertragseinbußen an Kohlgemüse in Mitteleuropa (kühlgemäßigte Klimazone) führen können, werden Kleine Kohlflyge, Mehliges Kohlblattlaus, Kohldrehherz gallmücke, Erdflöhearten und verschiedene

1. Einleitung

Schmetterlingsarten aufgeführt (Sauer und Fischer 2013; Crüger et al. 2002; Forster et al. 1992; Hommes 1987, 1983; Buhl und Schütte 1971). Die Mehligke Kohlblattlaus, die Larven der Kohldrehherz gallmücke, Adulte sowie Larven von Erdflöhen und Schmetterlingslarven verursachen Schäden an oberirdischen Pflanzenorganen. Die Larven der Kleinen Kohlflye, sowie die Larven von einigen Erdflöhen führen unterirdisch zu Wurzelschäden. Die Imagogröße sowie die Anzahl an auftretenden Generationen während einer Vegetationsperiode unterscheidet sich je nach Art des Schadinsekts (Tabelle 1). Die ersten Schädlinge können bereits Ende April bzw. Anfang Mai vorkommen und können bis Ende Oktober zu schwerwiegenden ökonomischen Schäden an den Kulturpflanzen führen (Crüger et al. 2002).

Tabelle 1: Merkmale unterschiedlicher Schadinsekten an Kohlgemüse

Schädlingsart Deutsche Name (Wissenschaftliche Name)	Imago- größe (mm)	Anzahl der Genera- tionen	Larven- größe (mm)	Schad- stadium	Schadsymptome	Aktivitäts- tempera- tur (°C)	Literatur
Kleine Kohlflye (<i>Delia radicum</i> L.)	6 - 7	3 – 4	bis 9	Larve	Frassgänge in der Wurzel (oft), aber auch Schäden am Kopf, Strunk und Röschen möglich (seltener)	> 4	Zohren (1968)
Mehligke Kohlblattlaus (<i>Brevicoryne brassicae</i> L.)	2 - 2,5	5 – 11	ab 0,3	Adulte und Larve	Blattverformungen und Blattverfärbungen	4	Dubnik (1991)
Kohldrehherz gallmücke (<i>Contarinia nasturtii</i> Kieffer)	1,5	3 – 5	0,3 - 3	Larve	Verkrüppelte, gekräuselte Blätter, Vieltriebigkeit, gestörte Kopfbildung, platzen der Kohlrabiknolle, Herzlosigkeit	15	Kikkert und Hoeping (2009)
Weißer Fliege (<i>Aleyrodes proletella</i> L.)	1,5	2 - 6	0,34 - 1,5	Adulte und Larve	Verschmutzungen durch Rußtaupilze, Honigtau und Exuvien	4	Collins (2016)
Schad- schmetterlinge (Lepidoptera)	10 - 50	2 – 5	bis 50	Larve	Blattfrassschäden	8	s. Tabelle 3
Kohlerdföhe (<i>Phyllotreta</i> spp. Chevrolat)	1,5 - 3	1	3 - 7	Adulte und Larve	Fensterfrass an Blättern und Hypokotyl, aber auch Minen in der Wurzel möglich	14	Mohr (2006), Freude et al. (1966)

Von den oben genannten Schädlingen haben die Kohlerdföhe nur eine Generation und stellen eine besondere Bedrohung je nach Witterung im Mai bzw. Juni während des Reifungsfrasses bei jungen Kulturen da (Lehmhus 2001). Als junge Kulturen werden solche bezeichnet, die bis zu sechs Laubblättern aufweisen. In Deutschland können folgende Erdflöhen vorkommen (Tabelle 2). Je nach Art unterscheidet sich die Größe sowie die Farbe der Käfer.

Tabelle 2: Kennzeichen der Erdflöhe nach Mohr (2006) und Freude et al. (1966)

<i>Phyllotreta</i> -Art Deutsche Name (Wissenschaftliche Name)	Imagogröße (mm)	Färbung der Flügeldecken bei Imago
Gewellstreifiger Kohlerdföhe (<i>P. undulata</i> Kutschera)	2,0 - 2,3	Gestreift (schwarz, gelb)
Gelbstreifiger Kohlerdföhe (<i>P. nemorum</i> L.)	2,5 - 3,0	Gestreift (schwarz, gelb)
Blauseidige Kohlerdföhe (<i>P. nigripes</i> Fabricius)	2,0 - 2,6	Dunkelblau oder blaugrün
Grünlänzende Kohlerdföhe (<i>P. cruciferae</i> Goetze)	1,8 - 2,5	Bläulich oder metallisch grün
Schwarze Kohlerdföhe (<i>P. atra</i> Fabricius)	1,9 - 2,5	Schwarz
Getreideerdföhe (<i>P. vittula</i> L. Redtenbacher)	1,5 - 1,8	Gestreift (schwarz, gelb)

Kohleule, Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Großer Kohlweißling, Kohlzünsler und Gammaeule sind nach Forster (1997), Forster et al. (1992) und Hommes (1987) die am häufigsten verbreiteten Schmetterlinge in Deutschland, die Kohlkulturen befallen (Tabelle 3). Des Weiteren kann die Gemüseeule in geringer Anzahl vorkommen. Die Größe der Adulten und der Raupen sowie die Anzahl an Larvenstadien und Generationen im Jahr unterscheidet sich je nach Art (Tabelle 3).

Tabelle 3: Kennzeichen der Lepidopteren-Schadinsekten an Kohlgemüse

Lepidopterenart Deutsche Name (Wissenschaftliche Name)	Spannweite (mm)	Larvenstadien	Generationen	Raupen Länge (mm)	Literatur
Kohleule (<i>Mamestra brassicae</i> L.)	40 – 50	6	2	0,5 - 50	Sannino und Espinosa (1999) Balmelli et al. (2012)
Kohlmotte (<i>Plutella xylostella</i> L.)	10 – 16	4	3 - 5	0,2 - 12	Moriuti (1986) Balmelli et al. (2012)
Kleiner Kohlweißling (<i>Pieris rapae</i> L.)	35 – 50	5	2 - 4	0,5 - 35	Capinera (2000) Forster (1997)
Großer Kohlweißling (<i>Pieris brassicae</i> L.)	40 – 60	5	2 - 3	0,7 - 50	Molet (2011) Forster (1997)
Kohlzünsler (<i>Evergestis forficalis</i> L.)	26	4	2	0,3 - 35	Gaedike (1980) Forster (1997)
Gammaeule (<i>Autographa gamma</i> L.)	35 – 40	5	2 - 3	0,5 - 40	Sullivan und Molet (2014) Forster (1997)
Gemüseeule (<i>Lacanobia oleracea</i> L.)	35 – 45	6	1 - 2	0,3 - 45	Sterry und Mackay (2005) Hausmann et al. (2000) Carter und Hargreaves (1987)

Weitere Schadinsekten, die am Kohlgemüse vorkommen können, sind: Kohlwanzen (*Eurydema oleraceum* L.) und andere Wanzenarten der Gattung *Lygus*, Thripse (insbesondere Zwiebelthrips (*Thrips tabaci* Lindemann)), Rapsglanzkäfer (*Brassicogethes aeneus* Fabricius), Gefleckter Kohltriebrüssler (*Ceutorhynchus pallidactylus* Marsham), Großer Rapsstängelrüssler (*Ceutorhynchus napi* Gyllenhaal), Kohlgallenrüssler (*Ceutorhynchus pleurostigma* Marsham), Kohlschottenrüssler (*Ceutorhynchus assimilis* C. Brisout), Kohlrübenblattwespe (*Athalia rosae* L.), Kohlschotenmücke (*Dasineura brassicae* Winnertz), Große Kohlflyge (*Delia floralis* Fallén) und Minierfliegen (*Scaptomyza flava* Fallén) (Crüger et al. 2002). Im Gegensatz zu den oben genannten Hauptschadinsekten (Tabelle 1) werden sie in wissenschaftlichen Publikationen (peer-reviewed) selten berücksichtigt. Ein Grund hierfür ist, dass diese Schädlinge im Vergleich zu den Hauptschadinsekten nicht in jedem Jahr ein relevantes wirtschaftliches Problem darstellen und somit von geringerer ökonomischer Bedeutung für den Anbau sind.

1.1.2 Konventionelle Überwachungsmethoden in Kohlgemüse im Freiland

Um Erntequalität und Ertrag sichern zu können, ist häufig die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln erforderlich. Die Höhe der Ertragseinbuße kann je nach Schadinsektenart (Tabelle 1), aktueller Befallssituation eines Schädling im Feld sowie Entwicklungsstadium und Art der Kohlgewächse stark variieren. Die Schädlingskontrolle mit Pflanzenschutzmitteln im integrierten Pflanzenschutz sollte gezielt nach Erreichen der Bekämpfungsschwelle bzw. Schwellenwerten erfolgen. Unter Bekämpfungsschwelle versteht

man die Befallsdichte bzw. Befallshäufigkeit eines Schädling zu einem bestimmten Zeitpunkt, bei der durch eine Bekämpfung das Erreichen eines ökonomischen Schadens verhindert wird (Aust et al. 1993). Schwellenwerte stellen den Zusammenhang zwischen dem aktuellen Befall durch einen Schadorganismus und dessen Schadwirkung dar (Freier et al. 1994). Um Schwellenwerte bzw. Bekämpfungsschwellen anwenden zu können, muss der aktuelle Befall eines Schadorganismus im Feld zu einem bestimmten Zeitpunkt durch definierte Monitoringmethoden geschätzt werden (López Gutiérrez 2018; Radcliffe et al. 2009; Southwood und Henderson 2007; Muirhead-Thomson 1991; Freuler und Fischer 1982). Anhand der Überwachungsmethoden (Monitoring) werden in regelmäßigen Zeitabständen Befallshäufigkeit, Befallsdichte oder Flugaktivität und die damit verbundene Populationsdynamik von bestimmten Schadinsekten in einem bestimmten Pflanzenbestand geschätzt. Bei der Befallshäufigkeit wird der Anteil an befallenen Pflanzen in einer Stichprobe erfasst (Aust et al. 1993). Mittels Befallsdichte wird die durchschnittliche Anzahl an Schaderregern pro Pflanze geschätzt (Aust et al. 1993). Die Populationsdynamik gibt die Schwankungen der Populationsdichte und Verteilung einer Art in Abhängigkeit von Umwelt und endogenen Faktoren in Raum und Zeit wieder (Aust et al. 1993). Die gängigen konventionellen Überwachungsmethoden im Kohlgemüse basieren auf Bestandskontrollen, Pheromonfallen bzw. Eiablageerfassung, welche im Folgenden näher erläutert werden.

Für Schadinsekten, die oberirdisch Schäden verursachen (z. B. die Mehligke Kohlblattlaus, Lepidopterenlarven, adulte Kohlerdflöhe bzw. Kohldrehherz gallmücken) werden in der nationalen und internationalen Literatur Bestandskontrollen und Pheromone für eine Schwellenwert-orientierte Bekämpfung genannt. Die Bestandskontrolle ist eine Schätzmethode, bei der an einer bestimmten Anzahl von Pflanzen in einem Kulturbestand visuell die Befallshäufigkeit (Wyenandt et al. 2017; Burkness und Hutchison 2008; Liu et al. 2006; Francis et al. 2005; Walker et al. 2001; Beck und Cameron 1990; Cartwright et al. 1987) bzw. Befallsdichte (Sauer und Fischer 2013; Forster et al. 1992; Theunissen und Ouden 1987) von Schadinsekten in sieben- bzw. 14-tägigem Abstand systematisch kontrolliert wird. Dafür werden üblicherweise an fünf bis zehn gleichmäßig verteilten Kontrollpunkten im gesamten Bestand je fünf Pflanzen bonitiert (Francis et al. 2005; Hamilton und Hepworth 2004; Forster et al. 1992). Der Stichprobenumfang, die Bekämpfungsschwelle sowie der bonitierte Pflanzenbereich unterscheiden sich je nach Anbauland, Entwicklungsstadium einer Pflanze, Schadinsekt und Kohlgemüseart.

Pheromonfallen werden zur Ermittlung der Flugaktivität von Schadinsekten als Überwachungsmethode für eine Schwellenwert-orientierte Bekämpfung verwendet (Hallett und Sears 2013; Sauer und Fischer 2013; Walker et al. 2003; Freuler et al. 1991a; Terytze et al. 1987; Baker et al. 1982; Terytze und Adam 1981). Pheromone sind insektenspezifische Semiochemikalien, die zur Kommunikation zwischen den Individuen einer Art (intraspezifisch) genutzt werden und aus einer Mischung mehrerer Komponenten bestehen. Bei den Botenstoffen, die zur innerartlichen Kommunikation eingesetzt werden, wird zwischen Sexual-, Aggregations- und Alarmpheromonen unterschieden. Sexualpheromone dienen in der Natur der Partnerfindung. Hierbei scheidet meistens das Weibchen einen Lockstoff aus, auf den das Männchen mit einem bestimmten Verhaltensmuster reagiert (Stan 1996; Birch und Haynes 1982). Bei den Pheromonfallen werden Männchen mit einem

Dispenser, der den weiblichen Lockstoff abgibt, angelockt. Je nach Schädlingsart unterscheidet sich das Verhalten bei der Lokalisierung des Weibchens. In Kohlgewächsen kommen Sexualpheromone für die Schätzung der Flugaktivität der Kohldrehherzgallmücke (Sauer und Fähndrich 2010; Allen et al. 2008), Kohlmotte (Nofemela 2010; Walker et al. 2003; Reddy und Guerrero 2001; Baker et al. 1982) und Kohleule (Johansen 1996; Terytze et al. 1987; Terytze und Adam 1981) zum Einsatz. Für die Kohldrehherzgallmücken gibt es anhand der Fänge in Pheromonfallen genau definierte Bekämpfungsschwellen, die zu gezielten Pflanzenschutzmaßnahmen führen (Sauer und Fähndrich 2010; Allen et al. 2008; Baur et al. 2005).

Unterirdische Schäden werden vornehmlich durch Larven der Kleinen Kohlflye im Kohlgemüse verursacht und können zu beträchtlichen Ertragsausfällen von über 50 % führen (Getzin 1978). Für eine rechtzeitige Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln nach Schadschwellen, z. B. während der Eiablage oder zu Beginn des Larvenschlupfes, hat sich die Erfassung der Eiablage bewährt. Hiermit ist es möglich die Populationsdichte zu schätzen. Die Erfassung der Eiablagezahlen kann auf zwei Wegen erfolgen: mittels Aufschwemmen des Bodens (El Titi 1977; Hughes und Salter 1959) oder Eimanschetten (Freuler und Fischer 1982).

Für die Aufschwemmungsmethode werden die Bodenproben im Durchmesser von 10 cm bis zu einer Tiefe von 3-5 cm um den Wurzelhals mit einem Löffel entnommen und anschließend mit Wasser im Labor aufgeschwemmt. Die Fliegeneier schwimmen auf der Wasseroberfläche und können nach einer Filtrierung ohne zusätzliche Vergrößerung ausgezählt werden. Die entnommene Erde an der Pflanze wird durch befallsfreien Boden aus pflanzenfreien Bereichen ersetzt. Die Anzahl an zufällig ausgesuchten Pflanzen sollte bei dieser Methode zwischen 20 und 30 betragen (El Titi 1977; Hughes und Salter 1959).

Die Eimanschetten haben einen Durchmesser von 6 cm und bestehen aus mehreren ineinander befestigten Filzringen, die an einer Seite aufgeschnitten sind. Diese werden um eine Kohlpflanze mit einem Klettverschluss auf Bodenniveau fest angebracht (Freuler und Fischer 1982). Die Fliegeneier auf den Eimanschetten werden direkt im Feld ausgezählt und verworfen. Pro Feld (unabhängig von der Feldgröße) werden zwischen 20 und 50 Eimanschetten empfohlen (Bligaard et al. 1999; Ester 1993). Nach Ouden und Theunissen (1988) sowie Ester (1993) sollten die Eimanschetten an fünf bis acht aufeinanderfolgenden Pflanzen angebracht werden. Die Eieranzahl muss sowohl beim Aufschwemmen als auch bei den Eimanschetten ein- bis zweimal wöchentlich kontrolliert werden.

1.2 Digitalisierung

Die oben beschriebenen konventionellen Überwachungsmethoden wie wöchentliche Bestandskontrollen, Pheromonfallen sowie die Erfassung der Eiablagezahlen (s. 1.1.2.) der Kleinen Kohlflye (Bodenaufschwemmung bzw. Eimanschetten), sind zeitaufwändig und werden in der Praxis von den Produzenten eher selten durchgeführt. Die Prognose der Kleinen Kohlflye ist anhand des Entscheidungshilfeprogramms "SWAT" (Hommes et al. 1993; El Titi 1977) möglich, welches auf dem von Söndgerath (1987) entwickelten

erweiterten Lesliemodell basiert und in der Programmiersprache C++ geschrieben ist. Hierbei wird anhand der Temperatursummen die Populationsdynamik der verschiedenen Entwicklungsstadien von Gemüsefliegen berechnet. Zudem ist es möglich, mit dem Programm die mittlere Altersstruktur der Schädlingpopulation zu modellieren. Die erfasste Eiablagezahl der Kleinen Kohlflyge kann in das Modell integriert und damit verfeinert werden (Söndgerath und Müller-Pietralla 1996; Hommes et al. 1993). Ohne die Erfassung der Eiablagezahlen ist das Programm "SWAT" flächenunspezifisch und spiegelt nicht die tatsächliche Befallssituation auf einer bestimmten Fläche wider.

Die durch die Politik geforderte Reduktion von Pflanzenschutzmitteln setzt verlässliche Systeme zum zielgerechten Einsatz derselben voraus, wodurch die Nachfrage nach effektiven, aber einfach zu handhabenden, automatisierten Überwachungsmethoden, deren Daten in digitalisierter Form verarbeitet werden können, in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Die digitalen Daten können im Gegensatz zu analogen Daten einfacher über Medien der Informationstechnologie gespeichert, transportiert, ausgewertet oder auch präsentiert werden (BMEL 2020). Somit stellt die Digitalisierung die wesentliche Grundlage für die Automatisierung von Prozessabläufen dar. Die Digitalisierung in der Landwirtschaft ist ein wichtiger Bestandteil der "Precision Agriculture", des "Smart Farming" oder auch der sogenannten "Landwirtschaft 4.0". Es ist ein Zusammenspiel von Sensoren, Informationssystemen und weiterentwickelten Gerätschaften zur Erfassung, Auswertung und Vernetzung von Daten, um die Produktion zu optimieren. Dabei werden Sensoren als gerätetechnische Einheiten definiert, die physikalische, chemische, klimatische, geometrische und biologische Größen durch einen geeigneten Messfühler (Sensorelement) erfassen und mittels einer Auswertungs Elektronik in ein elektrisches Signal umwandeln (Hering und Schönfelder 2018). In einem Elementarsensor wird das Ausgangssignal aufgenommen, umgeformt und aufbereitet. In einem Smart Sensor (intelligenter Sensor) bzw. Sensorsystem befindet sich zusätzlich eine Verarbeitungseinheit z. B. ein Mikrorechner, in dem die Daten nach ihrer Aufbereitung direkt verarbeitet werden (Adam et al. 1997).

Mittels Digitalisierung und intelligenter Technik konnte bisher besonders im Bereich der pflanzlichen Produktion (Bewässerung, Düngung, Beikrautregulierung) die Effektivität gesteigert werden (Pohl et al. 2020; Ruckelshausen 2016; Rösch et al. 2007; Griffin et al. 2004; Hufnagel et al. 2004). Hierbei sind vornehmlich optische Sensorsysteme von großer Bedeutung (Pohl et al. 2020; Ruckelshausen 2016; Strothmann 2016; Kicherer 2015; Young und Pierce 2014; Gebbers und Adamchuk 2010). Daher wurden aus der Vielfalt der Sensorsysteme für die Bearbeitung der Zielsetzungen dieser Arbeit primär optische Sensorsysteme gewählt.

1.2.1 Optik

Die Optik ist ein Teilgebiet der Physik, bei dem elektromagnetische Strahlung als Informationsträger fungiert. Elektromagnetische Strahlung weist einen Wellen-Teilchen-Dualismus auf. Demnach besteht die elektromagnetische Strahlung aus einer zahlreichen

Anzahl an Photonen, welche bestimmte Welleneigenschaften haben. Ein Photon ist ein stabiles, ungeladenes und massenloses Elementarteilchen, welches Lichtgeschwindigkeit im Vakuum hat. Obwohl die Photonen keine Ruhemasse haben, da sie ständig in Bewegung sind, können sie Energie in Form von Impulsen vorweisen. Die Energie der Photonen kann in Elektronenvolt (eV) angegeben werden (Tabelle 4) (Hecht 2018). Die Wellennatur der Photonen kann durch Wellenlänge, Frequenz und Amplitude beschrieben werden. Die Wellenlänge ist der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase und wird meistens in Nanometern (nm) gemessen. Die Anzahl der Wellen pro Zeiteinheit wird als Frequenz bezeichnet und wird in der physikalischen Einheit Hertz (Hz) gemessen. Die Amplitude ist die maximale Auslenkung einer Schwingung und die Phase gibt den Schwingungszustand einer Welle an (Hecht 2018). Die für die Optik relevanten Wellenbereiche bewegen sich zwischen 100 nm und 10^6 nm (Tabelle 4), dies umfasst den Spektralbereich der Infrarotstrahlung, sichtbares Licht und Ultraviolettstrahlung (Hecht 2018).

Tabelle 4: Wellenlängen und Frequenzen der entsprechenden Strahlungsspektrumarten nach Hecht (2018)

Art der Strahlung	Wellenlängenbereich (nm)	Frequenzbereich (Hz)	Photonenenergie (eV)
Kosmische Strahlung	$1/\infty - 3e^{-5}$	$> 10^{19}$	
Radioaktive Strahlung	$3e^{-5} - 0,01$	$> 3 \cdot 10^{19}$	$< 10^{20}$
Röntgenstrahlung	0,01 - 10	$2,4 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{19}$	100 - 200000
Ultraviolette Strahlung	10 - 380	$8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	3,2 - 100
Sichtbares Licht (für Menschen sichtbares Spektrum)	380 - 780	$3,84 \cdot 10^{14} - 7,89 \cdot 10^{14}$	2,6 - 1,6
Infrarotstrahlung	780 - 10^6	$3 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{14}$	0,0012 - 0,5
Terahertzstrahlung	30000 - 10^6	$1 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{13}$	$> 400\ 000$
Mikrowellenstrahlung	$10^6 - 1e^{+9}$	$30 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{11}$	0,00012 - 0,0000012
Radiowellen	$1e^{+9} - 10e^{+12}$	10000 - $3 \cdot 10^9$	$> 120 \cdot 10^{-12}$
Niederfrequenz	$10e^{+12} - 100e^{+15}$	3000 - 3	$> 12 \cdot 10^{-15}$

Trifft elektromagnetische Strahlung auf Materie, kann es zu unterschiedlichen Wechselwirkungsprozessen wie Transmission, Reflexion, Brechung, Absorption, Streuung sowie Beugung kommen. Vereinfacht lassen sich die Wechselwirkungen wie folgt beschreiben: Transmission ist eine physikalische Größe, die die Durchlässigkeit eines Mediums für elektromagnetische Wellen angibt. Mit Reflexion werden elektromagnetische Wellen beschrieben, die von einer Grenzfläche in eine bestimmte Richtung zurückgeworfen werden. Wenn die Strahlenwellen beim Übergang von einem Medium in ein anderes die Ausbreitungsrichtung ändern, spricht man von Brechung. Absorption ist ein physikalischer Prozess, bei dem Photonen durch eine Fläche aufgenommen werden können. Wird die Strahlung komplett absorbiert, wird das Material opak (lichtundurchlässig) genannt. Als Streuung wird Strahlung bezeichnet, die nach einem Zusammentreffen mit einer Materie in alle Richtungen abgelenkt wird. Beugung ist die Ablenkung einer Welle an einem Hindernis, die durch im Weg stehende Hindernisse und nicht durch Brechung oder Reflexion hervorgerufen wird. Die Strahlungsausbreitung ist von der Materienart, deren Oberflächenbeschaffenheit sowie der Wellenlänge der Strahlung abhängig (Hecht 2018; Schröder und Treiber 2014; Kühlke 2011).

1.2.2 Optische Sensorsysteme

Mittels optischer Sensorsysteme können Informationen, die aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Strahlung und Materie entstehen (s. 1.2.1.), berührungslos erfasst und in elektrische Signale durch Strahlungsdetektoren (Strahlungsempfänger) umgewandelt werden. Grundsätzlich bestehen optische Sensoren aus einem Sender wie einer Strahlungsquelle (z. B. Licht, Laser) und einem Empfänger wie ein Strahlungsdetektor (z. B. Bildsensoren). Zwischen dem Sender und dem Empfänger ist ein Übertragungsmedium, in den meisten Fällen handelt es sich um Luft (Hering und Schönfelder 2018; Kleger 1998; Adam et al. 1997). Es gibt eine Vielzahl an optoelektronischen Sensoren und somit Sensorsystemen, die auf unterschiedliche Art und Weise eingeteilt werden können (Tabelle 5). Der Fokus der Arbeit lag auf der oberirdischen Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden. Daher waren vor allem optische Sensorgruppen und Sensortypen (Tabelle 5; Tabelle 6) von Bedeutung, die in der Lage waren, die reflektierte elektromagnetische Energie in Form von optischen Informationen von bestimmten Objekten zu erfassen (Paulus und Mahlein 2020; Pflanz et al. 2018; Ruckelshausen 2016; Kicherer 2015; Young und Pierce 2014; Strothmann et al. 2013; Mahlein 2011).

Tabelle 5: Einteilung der optoelektronischen Sensoren nach Hering und Martin (2017), Kleger (1998) und Breitmeier et al. (1995)

Sensorgruppe	Sensortypen	Funktionsweise der Sensorsysteme	Dimension der Erfassung	Art der elektromagnetischen Strahlungsdetektion
Kamerasensoren	CCD-Sensoren CMOS-Sensoren	Erfassung von Photonen, die innerhalb einer Belichtungszeit auf ein Sensorelement treffen	1D oder 2D	Photodetektor
Analyse-Sensoren	Hyperspektral-, Multispektral-, Farb- sowie Graubildkameras IR-Sensoren (Temperatursensoren)	Erfasst wird emittierte bzw. reflektierte elektromagnetische Strahlung eines Objekts	2D bzw. 3D- Hyperspektral- Würfel	Photodetektor
		Erfasst die reflektierte Infrarotstrahlung eines Objekts	2D	Thermodetektor
Lichtschranke	Einweg-Lichtschranke Reflexions-Lichtschranke Lichtvorhang	Erfasst durch ein Objekt unterbrochenen Lichtstrahl	1D	Photodetektor
Abstand-, Weg- und Winkelsensoren	Triangulation Sensor	Erfasst reflektierte Strahlung von einem Objekt	3D	Photodetektor
	Pulslaufzeit Sensor	Erfasst durch ein Objekt reflektierten Strahlungsimpuls	3D	
	Phasenlaufzeit Sensor	Erfasst reflektierte Strahlung von einem Objekt und vergleicht diese mit dem ausgesandten Signal	3D	
Laserscanner	Laserscanner	s. Triangulation, Pulslaufzeit und Phasenlaufzeit Sensor	2D und 3D	Photodetektor

Jede der Sensorarten bzw. Sensortypen hat Vor- und Nachteile (Tabelle 6). Im Folgenden wird die Funktionsweise der in der Landwirtschaft gängigen Sensortypen vereinfacht und kurz dargestellt. Bei den meisten aufgeführten Sensorgruppen wurden zur Detektion der elektromagnetischen Strahlung (z. B. Reflektion von Zielorganismen) Photodetektoren eingesetzt (Tabelle 5). In einem Photodetektor werden durch die Wechselwirkungen von Photonen und Detektormaterie (photoelektrischen Effekte) elektrische Spannungsschwankungen als zentrale Signale generiert. (Hering und Schönfelder 2018; Kleger 1998; Adam et al. 1997).

Tabelle 6: Vor- und Nachteile der beschriebenen optoelektronischen Sensorsysteme. Alle Methoden basieren auf berührungsloser und zerstörungsfreier Erfassung der spektralen Information

Sensortyp	Vorteile	Nachteile	Literatur
Hyperspektral-, Multispektralkamera	<ul style="list-style-type: none"> Erfasst breiten Spektralbereich (380 - 3000 nm) hohe räumliche Auflösung große Menge an Rohdaten Die gesamte spektrale Information eines Bildabschnitts wird erfasst 	<ul style="list-style-type: none"> Bildverarbeitung aufwändig relativ teuer Die spektrale Information des Hintergrunds wird auch erfasst 	Noack (2018)
Farb- sowie Graubildkameras	<ul style="list-style-type: none"> Die Menge an Rohdaten ist geringer im Vergleich zu Hyperspektral-, Multispektralkamera relativ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> Bildverarbeitung aufwändig empfindlich gegen Fremdlicht Die spektrale Information des Hintergrunds wird auch erfasst 	Noack (2018) Breitmeier et al. (1995) Rosemann et al. (2015)
Bolometerkamera	<ul style="list-style-type: none"> relativ kostengünstig Kühlung ist nicht erforderlich universell, kann fast alle Materialien abtasten 	<ul style="list-style-type: none"> Erfasst ausschließlich Oberflächentemperatur Starke Lichteinstrahlungen, Wind bzw. nasse Oberflächen können die Messergebnisse beeinflussen 	Hering und Schönfelder (2018)
Lichtschranke	<ul style="list-style-type: none"> relativ kostengünstig Geringe Menge an Rohdaten, somit eine automatisierte Auswertung der Daten möglich Gezielte Erfassung von einem Objekt möglich 	<ul style="list-style-type: none"> Opake Objekte werden von dem System nicht erfasst relativ geringe Auflösung 	Rosemann et al. (2015) Kovacheva et al. (2014)
Triangulation Sensor	<ul style="list-style-type: none"> universell, kann fast alle Materialien abtasten einfaches Messprinzip 3D-Informationen eines Objekts werden erfasst Tiefengenauigkeit sehr hoch 	<ul style="list-style-type: none"> Messunsicherheit ist abhängig von den Reflexionseigenschaft des Messobjekts 	Paulus (2017) Bartels (2017) Breitmeier et al. (1995)
Pulslaufzeit Sensor	<ul style="list-style-type: none"> universell, kann fast alle Materialien abtasten Relativ unempfindlich gegen Umgebungslicht Eigenbeleuchtung Unterscheidung von Mehrfachzielen bei der Abstandmessung 3D-Informationen eines Objekts werden erfasst relativ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> relativ langsam Genauigkeit im 1 cm Bereich Messunsicherheit ist abhängig von den Reflexionseigenschaft des Messobjekts Tiefengenauigkeit mittel 	Bartels (2017) Breitmeier et al. (1995)
Laserscanner	<ul style="list-style-type: none"> präzise und schnelle Erfassung mit hoher Auflösung Geringe Menge an Rohdaten, somit eine automatisierte Auswertung der Daten möglich Gezielte Erfassung von einem Objekt 	<ul style="list-style-type: none"> Opake Objekte werden von dem System nicht erfasst relativ teuer 	Rosemann et al. (2015) Kovacheva et al. (2014)

Bildsensoren (Kamerasensoren) sind wichtige Bausteine von optisch abbildenden Systemen, mit denen die räumliche Bestrahlung zu einem bestimmten Zeitpunkt erfasst werden kann. Bildsensoren basieren meistens auf Charge-Coupled Device (CCD) und Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) Sensortechnologien und werden in Photodetektoren auch in anderen Sensorgruppen eingesetzt (Hering und Martin 2017; Jähne et al. 1996; Breitmeier et al. 1995). In beiden Sensortechnologien werden Halbleiterphotodetektoren genutzt, die den inneren photoelektrischen Effekt nutzen. Stark vereinfacht bedeutet das, dass durch die Energie eines Photons die Elektronen der Halbleiterphotodetektoren in das energetisch höher gelegene Leitungsband gehoben werden. Es kommt zu einer elektrischen Spannung und es entstehen elektrische Signale, aus denen optische Signale erzeugt werden können. Die Signale werden entweder direkt (CMOS-Sensoren) oder indirekt über einen Digitalwandler (CCD- und CMOS-Sensoren) als digitale Werte ausgegeben (Hering und

Martin 2017; Jähne et al. 1996). Die CCD- sowie CMOS-Sensoren bestehen aus einer Vielzahl von flächig angeordneten Halbleiterelementen, die jeweils einen feldinduzierten Photodetektor und somit ein Pixel (Bildpunkt) darstellen. Pro Pixel werden je nach Bit-Tiefe unterschiedliche Farbabstufungen dargestellt. Je mehr Bit-Tiefe ein Pixel hat, desto mehr Farbabstufungen können damit dargestellt werden (Lipinski 2010). Die CCD- und CMOS-Sensoren sind für den kurzwelligeren UV-Bereich (350-380 nm), das sichtbare Licht (380-780 nm) und den langwelligeren nahen Infrarotbereich (780-1050 nm) sensibel (Tabelle 4). Je nachdem, in welcher Sensorgruppe die CCD- und CMOS-Sensoren eingebaut werden, kann ein Objekt eindimensional, zweidimensional oder dreidimensional erfasst werden (Hering und Martin 2017; Breitmeier et al. 1995).

Analysesensoren umfassen Sensoren, mit denen emittierte bzw. reflektierte elektromagnetische Strahlung eines Objekts entweder mit Photo- oder Thermodetektoren erfasst wird. Die Photodetektoren basieren auf bereits beschriebenen CCD und CMOS Sensortechnologien. Diese werden in den Hyperspektral-, Multispektral-, Farb- sowie Graubildkameras eingesetzt. Je nachdem, in welcher Kamera die Sensoren eingesetzt werden, unterscheiden sich diese (Hering und Schönfelder 2018; Hering und Martin 2017). Thermische Detektoren reagieren direkt auf die von einem Objekt absorbierte Infrarotstrahlungsenergie, die in Wärme umgewandelt wird und in Form der Infrarotstrahlung reflektiert wird. Jedes Objekt, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C bzw. 0 K) liegt, strahlt im Infrarotbereich. Zur thermischen Erfassung können drei Effekte benutzt werden: Pyroelektrizität, Thermoelektrizität oder Thermokonduktivität. Im Folgenden wird ausschließlich auf Thermokonduktivität eingegangen, da sich in der Praxis die Methode zur thermischen Erfassung durchgesetzt hat. Thermokonduktivität wird mit einem Bolometer gemessen. Mit Bolometer wird die Widerstandsänderung, die aufgrund der absorbierten Wärmeenergie zustande kommt, angegeben. Die Änderung des Widerstands führt dann zu einem elektrischen Signal. Die Sensoren sind kompakt, robust wie die Farbkameras, benötigen keine aufwendige Temperaturkühlung und haben eine lange Lebensdauer. Die Wärmebildgebung einer Bolometerkamera erfolgt mittels eines Mikrobolometer-Array. Der Mikrobolometer-Array besteht aus einer Vielzahl an Bildpunkten (Pixel) (Hering und Schönfelder 2018; Hering und Martin 2017; Jähne et al. 1996).

Zeilensensoren werden in Lichtschranken verwendet. Lichtschranken werden in drei Gruppen eingeteilt: Einweg-Lichtschranke, Lichtgitter (Lichtvorhang) und Reflexions-Lichtschranke. Eine Einweg-Lichtschranke schickt einen Lichtstrahl (z. B. Infrarotstrahlen oder Laserstrahlen) aus einem Sender, dieser wird durch eine Diode im Empfänger registriert. Sender und Empfänger sind getrennt und befinden sich in zwei einander gegenüberliegenden Gehäusen. Größere Flächen können mittels Lichtgitter (Lichtvorhang) überwacht werden. Diese bestehen aus mehreren Einweg-Lichtschranken, die in Reihen angeordnet sind und ein Band paralleler Strahlen bilden. Alle Sender sowie alle Empfänger sind jeweils in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Die durch Dioden und den entsprechenden Strahlungseinfall erzeugten Ströme werden ausgelesen und in eine binäre Hell-Dunkel-Information umgewandelt. Diese kann durch einen nachgeschalteten Speicher in Form eines Zeilenbildes gespeichert werden. Erhalten alle Dioden einen Strahlungsimpuls,

liegt kein Objekt im Lichtvorhang. Die Reflexions-Lichtschranke detektiert das reflektierte Licht von einem Trippel-Reflektor. Sender und Empfänger befinden sich bei dem Sensortyp in einem Gehäuse. Die drei Sensortypen registrieren, wenn ein Strahl durch ein opakes Objekt unterbrochen wird (Hering und Schönfelder 2018; Kleger 1998; Breitmeier et al. 1995).

Die geometrischen Größen können mittels Abstands-, Weg- und Winkelsensoren erfasst werden. In der Landwirtschaft werden hauptsächlich Sensoren eingesetzt, die nach dem Triangulations- bzw. Pulslaufzeitprinzip funktionieren (Hering und Schönfelder 2018). Bei dem Triangulationsmessprinzip wird die Strahlung einer Rot- oder Infrarotstrahlungsquelle in Form von Laser- oder Lichtdiode durch ein Sendeobjektiv auf eine Oberfläche bzw. Objekt fokussiert. Entsprechend der Flächeneigenschaften wird die Strahlung reflektiert und auf einem Detektor abgebildet. Die Detektoren sind CCD-Zeilen oder positionsempfindliche Photodioden (PSD-Sensoren). Mit dem System sind Konturerfassungen möglich, indem entweder der Triangulationsmesskopf mit Strahlungsquelle und Abbildungsoptik mit Detektor oder das Objekt senkrecht zur Scanebene bewegt wird (Hering und Schönfelder 2018; Breitmeier et al. 1995).

Die Pulslaufzeitmessung erfolgt, indem Strahlungsimpulse einer Laserdiode einer Sendeoptik im Sensor mit einer bestimmten Pulsdauer auf ein Objekt abgestrahlt werden. Der durch das Objekt reflektierte Strahlungsimpuls wird mittels Empfangsoptik (Lawinen-Fotodiode) erfasst. Der Abstand wird ermittelt, indem die Laufzeit vom Aussenden bis zum Empfangen gemessen wird. Mit beiden Messprinzipien sind ein-, zwei- und dreidimensionale Konturerfassungen möglich. Daher können diese auch zur Identifikation von Objekten eingesetzt werden (Hering und Schönfelder 2018; Breitmeier et al. 1995).

Laserscanner sind optische Sensorsysteme, die anhand eines Lasers (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) eine Fläche erfassen. Nach dem Bundesamt für Strahlenschutz streckt sich der Wellenbereich der Laserstrahlung zwischen etwa 200 nm bis etwa 10000 nm aus. Die eingesetzten Laser werden gemäß ihrem Gefährdungspotential nach Norm DIN EN 60825-1:2015-07 in eine der neun Laserklassen eingeteilt. Mit dem Laserscanner kann sowohl die Geometrie eines Objekts als auch die Intensität des reflektierten Signals erfasst werden. Es gibt unterschiedliche Scannmechanismen. In der Landwirtschaft werden hauptsächlich Laserscanner eingesetzt, die nach dem Triangulations- bzw. Pulslaufzeitprinzip funktionieren. Diese sind bereits bei Abstands-, Weg- und Winkelsensoren beschrieben (Hering und Schönfelder 2018; Breitmeier et al. 1995).

1.2.3 Optische Sensorsysteme in der Landwirtschaft im Feld

Aufgrund der Digitalisierung, Weiterentwicklung der Sensorik und Informatik sind die bildgebenden Sensorsysteme maßgebend in der Landwirtschaft. Die meisten Sensorsysteme basieren auf Kamera- und Lasertechnologien, die bereits in Kapitel 1.2.2. beschrieben wurden. Optische Sensorsysteme werden in der Landwirtschaft eingesetzt, um berührungslos und somit zerstörungsfrei mittels Fernerkundung (Norm DIN 18716:2017-06)

oder stationär Daten ohne großen personellen Aufwand zu erfassen. Die Sensorsysteme der Fernerkundungsverfahren der Landwirtschaft können sich an autonomen oder bemannten Landmaschinen (z. B. Traktor), an unbemannten Luftfahrzeugen (z. B. Drohnen oder Multicopter) oder an künstlichen Satelliten befinden (Pohl et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Ruckelshausen 2014; Young und Pierce 2014; Strothmann et al. 2013; Mahlein 2011).

Für die Beikrautererkennung und -vernichtung im Gemüsebau im Feld stehen mehrere kommerziell verfügbare Sensorsysteme zur Verfügung, die an einen Traktor (Gaus et al. 2017; F. Poulsen Engineering Aps 2013) bzw. Multicopter (JKI) (Pohl et al. 2020) angehängt werden können. Je nach Firma sind die eingesetzten Sensoren zur Erkennung und Steuerung unterschiedlich. Die meisten Sensorsysteme zur Unkrautererkennung werten verschiedene Spektralbereiche der Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarotbereich aus. Robovator (Poulsen ApS, Dänemark) sowie Steketee IC (Machinefabriek Steketee, Niederlande) sind kameragesteuerte Sensorsysteme. Bei Robovator werden die Parameter über eine Doppelspektral-Kamera und bei Steketee IC über eine Standard-Industriekamera erfasst. Robocrop inrow (Garford Farm Machinery Ltd, UK) setzt auf digitale Videokameras als optisches Sensorsystem. Des Weiteren gibt es das Sensorsystem Remoweed (Ferrari Construzioni Mecc, Italien) bei der eine Infrarot-Lichtschanke zur Steuerung und Unkrautererkennung verwendet wird (Schnieper 2017). Zurzeit verwendete kommerziell verfügbare autonome Sensorsysteme im Gemüsebau sind zum Beispiel NAÏO-Hackroboter OZ (NAÏO TECHNOLOGIES, Frankreich), NAÏO-Hackroboter dino (NAÏO TECHNOLOGIES, Frankreich), ecorobotix-Hackroboter (ecorobotix, Schweiz) und der ANATIS Hackroboter (CARRE, Frankreich). Weitere autonome Hackroboter sind in der Entwicklung, wie der Bonirob (Amazone, Deutschland, Deepfield Robotics, Deutschland und Hochschule Osnabrück, Deutschland) und Asterix (Adigo AS, Norwegen). Bei den autonomen Systemen werden entweder einer oder mehrere bildgebende optoelektronische Sensoren eingesetzt. Zum Beispiel bei dem NAÏO-Hackroboter wird eine Stereokamera zur Reihenerkennung eingesetzt. BoniRob hingegen setzt eine Farb- und Fluoreszenzkamera ein, Lichtschranken sowie eine 3D-Time-of-Flight Kamera, die nach dem Prinzip des Pulslaufzeitverfahren funktioniert (Ruckelshausen 2016; Ruckelshausen et al. 2010).

Zur Detektion von Gemüsepflanzenkrankheiten auf dem Feld gibt es bis jetzt keine Untersuchungen mit optoelektronischen Systemen. Zur automatischen Erfassung und Detektion von Pflanzenkrankheiten in Zuckerrüben und Weizen gibt es jedoch zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen. Die Detektion der Pflanzenkrankheiten bei Zuckerrüben und Weizen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Es gibt eine SmartDDS App für Android Mobiltelefone, die fünf Krankheiten an der Zuckerrübe anhand der Smartphonefotos und Bildanalyse automatisch unterscheiden kann (Klatt et al. 2013). Des Weiteren wurde seit über 20 Jahren (Scotford und Miller 2005; Wiltshire et al. 2002) der Einsatz von optoelektronischen Systemen zur Erfassung von Pflanzenkrankheiten im Feld erfolgsversprechend untersucht wie z. B. die Infrarotthermographie (Hellebrand et al. 2005) oder der Einsatz von Hyper- bzw. Multispektralkameras oder Chlorophyllfluoreszenz-Analyse zur Analyse der spektralen Signaturen von Pflanzenkrankheiten (Bohnenkamp et al. 2021; Görlich et al. 2021; Noack 2018; Behmann 2016; Bauriegel, E. Herppich, W. 2014; Mahlein 2011).

Ferner werden optoelektronische Technologien zur Analyse des Stickstoffgehalts (Fitzgerald et al. 2010), zur präzisen Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln in Reihenkulturen im Feldgemüsebau z. B. mit Asterix (Adigo machatronics, Norwegen) (Keller et al. 2020; Ganzelmeier 2014), bei der Phänotypisierung und somit bei der Saatgutentwicklung (Paulus und Mahlein 2020; Paulus et al. 2013) angewandt. Für die Phänotypisierung werden häufig Multi-Sensor-Systeme verwendet. Die Firma LemnaTec bietet eine fest positionierte Anlage namens ScanalyzerField (Lemnatec, Deutschland) an, die eine Kamera für den sichtbaren Lichtbereich, eine Fluoreszenz-Kamera und einen Höhenscanner hat. PlantEye F600 (Phenospex, Niederlande) ist ein kommerziell verfügbarer multispektraler 3D-Scanner, welcher mit entsprechender Phenospex-Software zur automatischen Pflanzenphänotypisierung im Feld eingesetzt wird. Das von der Hochschule Osnabrück entwickelte Multisensor-Phänotypisierungssystem (BreedVison) hat folgende optoelektronische Sensoren: Lichtgitter, Laser-Abstandssensoren (die nach dem Prinzip der Triangulation funktionieren), 3D-Time-Of-Flight Kamera (die nach dem Prinzip des Pulslaufzeitverfahren funktioniert) Farb-, Hyperspektral- und Webkamera (Ruckelshausen 2014).

Der Einsatz von digitalen optoelektronischen Sensorsystemen zur Erfassung von Schadinsekten bzw. von Insektenbefall im Acker- bzw. Gemüseanbau auf dem Feld ist im Vergleich zu den oben aufgeführten Bereichen wie Unkrautkontrolle, Pflanzenkrankheiten-erfassung oder Pflanzenphänotypisierung wesentlich weniger erforscht worden. Dies lag zum Teil daran, dass der Einsatz der digitalen Sensorsysteme zur Schadinsektenerfassung im Feld aufgrund der hohen Systemkosten, fehlender geeigneter Sensorsysteme sowie der aufwendigen Bildverarbeitung als unwirtschaftlich und somit unwahrscheinlich galt (Scotford und Miller 2005; Reynolds und Riley 2002a). Die meisten wissenschaftliche Arbeiten zur digitalen Erfassung von Schadinsekten auf dem Feld konzentrierten sich hauptsächlich auf stationäre kamerabasierte technisch modifizierte Fallensysteme (Rettig 2022; Bjerge et al. 2021; Born 2021; Preti et al. 2021b; Wilson et al. 2017; Fukatsu et al. 2012; Hirafuji et al. 2008; Jiang et al. 2008; Tseng et al. 2004; Beerwinkle 2001).

Von 2012 bis 2015, in dem Versuchszeitraum der Doktorarbeit, gab es zur Erfassung von Schadinsekten auf dem Feld sowohl im Gemüse- als auch Ackerbau keine kommerziell verfügbaren optoelektronischen Sensorsysteme für die Praxis und nur wenige Untersuchungen zur Erfassung von Schadinsekten im Feld. Zur digitalen Erfassung von Kohlmotten gab es zwei Studien mit stationären kamerabasierten Pheromonlockstofffallensystemen, deren Eignung sich je nach Sensorsystem unterschied. Das optoelektronische Sensorsystem von Hirafuji et al. (2008) wurde für Praxis als ungeeignet bewertet. Das kamerabasierte Pheromonlockstofffallensystem von Tseng et al. (2004) wurde als erfolversprechend eingestuft. In dem aufgeführten Zeitraum gab es zur Erfassung der Flugaktivität eines Schadinsektes auf dem Feld stationäre kamerabasierte Pheromonlockstofffallensysteme von den Firmen Efos (Slowenien z. B. TrapView), Pessl Instruments GmbH (Österreich z. B. iSCOUT) und Semios (Kanada, z. B. SemiosBio Insektenfalle), die alle bis 2012 im Obstbau erfolgreich eingesetzt wurden. Je nach Schadinsekt unterscheidet sich der Fallentyp, das Prinzip ist aber das Gleiche. Es werden von einer Klebetafel in bestimmten Zeitabständen Fotos mit einer handelsüblichen Kamera gemacht und auf einen

Server weitergeleitet. Auf dem Server werden die Fotos mit Bilderkennungsalgorithmen ausgewertet. Dabei wird zwischen Ziel- und Nichtzielinsekt unterschieden.

Die seit 2015 voranschreitende Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz (Schramowski et al. 2020; Zhong et al. 2018; Jordan und Mitchell 2015) sowie Preissenkung bei den optoelektronischen Sensorsystemen führte dazu, dass seit 2021 eine automatisierte, digitale Gelbschale (Rettig 2022; Born 2021) und eine automatisierte, digitale Lichtfalle (Bjerge et al. 2021) entwickelt wurden. Bei beiden Fallen werden die erfassten Spektralinformationen durch künstliche Intelligenz gestützte Algorithmen (Autoencoder) digital ausgewertet. Die automatisierte, digitale Gelbschale MagicTrap-System (Bayer, Bayer CropScience) wurde für den Rapsanbau entwickelt. Hierbei werden die Fotos des Schaleninhalts zur digitalen Auswertung auf einen Server weitergeleitet und ausgewertet. Das Sensorsystem kann zwischen fünf Insekten (Rapsglanzkäfer, Rüsselkäfer, Rapserdfloh, Hummel, Biene) und Beifang unterscheiden (Rettig 2022). Die technisch modifizierte Lichterfalle von Bjerge et al. (2021) kann automatisch zwischen acht Nachfalterarten digital unterscheiden. Des Weiteren gibt es Firmen wie Plantix (Deutschland) und xavio (USA), die Smartphone-Apps anbieten mit denen die Telefon-Fotos mittels Bildbearbeitungssoftware ausgewertet werden können.

1.3 Zielsetzungen

Die Erträge sowie die marktgerechte Erntequalität von Kohlgemüse können durch tierische Schädlinge stark dezimiert werden. Die Bekämpfung von Schadinsekten mit Insektiziden ist mit Risiken verbunden. Dazu zählen Pflanzenschutzmittelrückstände auf dem Erntegut, mögliche unerwünschte ökologische und toxikologische Effekte sowie die Entstehung von Resistenzen. Die Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln kann im integrierten Pflanzenschutz theoretisch auf das geforderte "notwendige Maß" durch den Einsatz von Schwellenwerten in Kombination mit effektiven Überwachungsmethoden (z. B. regelmäßige und automatisierte Bestandskontrollen oder Prognosemodelle) beschränkt werden. Die zurzeit verfügbaren Überwachungsmethoden für Schädlinge im Kohlgemüseanbau unter Freilandbedingungen sind aber entweder sehr zeitaufwändig oder die frei verfügbare Entscheidungshilfemethoden (z. B. "SWAT") sind nicht flächenspezifisch und aus diesem Grund in der Praxis wenig implementiert. Durch das Fehlen einfacher Überwachungsmethoden, ist die Akzeptanz in der Praxis gering und die Umsetzung einer möglichst zielgerichteten Applikation von Pflanzenschutzmitteln komplementär zu den Zielsetzungen des Integrierten Pflanzenschutzes unbefriedigend.

Bildgebende, digitale optoelektronische Sensorsysteme führen in vielen Bereichen der Landwirtschaft durch die breite Einsetzbarkeit zur höheren Effizienz und Effektivität im Feld. Im Gemüsebau ist sowohl die automatisierte digitalisierte Detektion der Schadinsekten in einem Feldbestand als auch der damit verbundene potentielle Nutzen von Sensorsystemen bisher nur unzureichend erforscht. Deshalb war ein zentrales Ziel des Promotionsvorhabens die Weiterentwicklung und Erprobung von Überwachungsmethoden zur präzisen Vorhersage des Gefährdungspotentials durch Schadinsekten im Kohlgemüse auf Basis einer

automatisierten Erfassung, Erkennung und Übermittlung von schädlingsspezifischen Daten. Hierbei wurde zunächst untersucht welche optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung von bestimmten oberirdisch vorkommenden schädlingsspezifischen Merkmalen im Kohlgemüse geeignet sind. Im nächsten Schritt wurden die optoelektronischen Sensorsysteme - falls möglich - anhand von konventionellen, gängigen Überwachungsmethoden im Kohlgemüse (Bestandskontrolle, Sexualpheromonlockstofffalle und Eimanschetten) evaluiert. Im Fokus der Untersuchung standen oberirdisch vorkommenden Kohlschädlinge bzw. durch Insekten verursachte oberirdische Kohlgemüseschäden.

Um diese Ziele zu erreichen wurde die Forschungstätigkeit dieser Dissertation in folgende Schwerpunkte untergliedert:

a) Evaluierung von sechs optoelektronischen Sensorsystemen zur Detektion von mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Kohlpflanze sowie der durch diese verursachten Schäden unter kontrollierten Bedingungen. Es wurde damit überprüft, ob die konventionelle Bestandskontrolle mit optoelektronischen Sensorsystemen automatisiert werden kann.

b) Evaluierung von weiteren sechs optoelektronischen Sensorsystemen zur Detektion der mobilen oberirdischen geflügelten Insektenstadien im Pflanzenbestand sowohl im Feld als auch unter kontrollierten Bedingungen. Es wurde untersucht, ob die Erfassung der Flugaktivität von bestimmten Schadinsekten automatisiert werden kann.

c) Um das Potential der optoelektronischen Sensorsysteme für die Praxis evaluieren zu können, wurde parallel der Arbeitsbereich für die digitale Erfassung von Schaderregern im Bestand charakterisiert. Im Fokus hierbei waren sowohl ungeflügelte als auch geflügelte Insektenstadien.

d) Abschließend wurde die Nutzbarkeit der optischen Sensorsysteme für den praktischen Einsatz bewertet und eine Empfehlung erarbeitet. Hierfür wurden die erhobenen Daten mit unterschiedlichen Methoden statistisch evaluiert, mit den praktisch gewonnen Erkenntnissen verbunden und - falls möglich - die Übertragbarkeit der digitalen Erfassung von unterschiedlichen Schadinsektenstadien im Zusammenhang mit dem aktuellen Befall im Feld überprüft.

2. Material und Methoden

Aufgrund der mangelnden Forschung zur digitalen Schadinsekterfassung mittels optoelektronischen Sensorsystemen im Feldgemüseanbau war ein wesentlicher Teil der Doktorarbeit sich einen Überblick über den Sensorsystemeinsatz zu verschaffen. Es wurden insgesamt 12 unterschiedliche optoelektronische Sensorsysteme geprüft. Hierfür wurden im Zeitraum vom 20.12.2012 bis 16.12.2015 zahlreiche Versuche sowohl im Feld als auch unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus bzw. Labor durchgeführt, anhand derer die Evaluierung der getesteten optoelektronischen Sensorsysteme stattfand (Tabelle 7).

Tabelle 7: Übersicht von Zielsetzung, Zeitraum, Versuchsinsekten sowie die Versuchsbedingungen von untersuchten optoelektronischen Methoden sowie Methoden, die als Referenz für optoelektronische Methoden dienten (Kp. Nr. = Kapitel Nummer)

Kp. Nr.	Optoelektronische Methoden	Ziel der Untersuchung	Zeitraum	Versuchsinsekten	Versuchsbedingungen
2.3	Farbkamera, Graubildkamera, zwei 3D-Kamerasysteme, Chlorophyllfluoreszenz-bildanalyse, Bolometerkamera	Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze bzw. der durch diese verursachten Schäden	20.12.2012 - 16.10.2013	Mehlige Kohlblattlaus, Kohleule, Kohlmotte	Unter kontrollierten Bedingungen
2.4	Bestandskontrolle, konventionelle Sexualpheromonfallen, Eimanschetten	Charakterisierung des Arbeitsbereichs für digitale Erfassung von Schadinsekten	21.04.2013 - 09.11.2015	Mehlige Kohlblattlaus, Schadschmetterlinge, Kleine Kohlflye, Kohldrehherzgallmücke	Im Feld
2.5	Drei technisch modifizierte Sexual-Pheromonfallensysteme, Triangel-Camera-System, zwei bildgebende Lichtschranken-Systeme Bolometerkamerasystem	Erfassung der geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge	21.05.2013 - 16.12.2015	Schadschmetterlinge, Kleine Kohlflye, Kohldrehherzgallmücke	Im Feld und unter kontrollierten Bedingungen

Die untersuchten optoelektronischen Systeme ließen sich in zwei Gruppen einteilen: In der ersten Gruppe waren solche, die zur Detektion der mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze eingesetzt wurden und somit zur Automatisierung der Bestandskontrolle vorgesehen waren. Mit den optoelektronischen Systemen aus der zweiten Gruppe wurden geflügelte adulte Kohlschädlinge detektiert. Als Referenz für den Einsatz der optoelektronischen Systeme in der Praxis dienten konventionelle Überwachungsmethoden (s. 1.1.2). Diese waren erforderlich, um die getesteten optoelektronischen Systeme für die Praxis evaluieren zu können. Je nach Versuchsjahr, Fragestellung, Schädlingsart und Insektenstadium unterschied sich der Versuchsaufbau. Im Folgenden werden zunächst Organismen beschrieben, die für beide optoelektronischen Systemgruppen von Bedeutung waren: Versuchspflanzen sowie Insekten, die im Fokus der Untersuchung standen. Im nächsten Abschnitt werden die Versuche zu der ersten optoelektronischen Systemgruppe beschrieben. Im Anschluss der Methodenbeschreibungen zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die digitale Erfassung von Schaderregern im Bestand werden die Versuche zur zweiten optoelektronischen Systemgruppe dargestellt. Zum Schluss wird auf die Datenauswertung eingegangen.

2.1 Versuchspflanzen

Für die Insektenzuchten sowie für die Versuche zur Testung der optoelektronischen Sensoren bzw. Sensorsysteme sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch im Feld wurden hauptsächlich die Kohlgemüsevarietäten Weißkohl, Brokkoli und Rosenkohl verwendet (s. 1.1). Je nach Versuchsjahr und Standort kamen zudem noch andere Kohlgemüsevarietäten bzw. Kohlgemüseconvarietäten auf den Versuchsfeldflächen des Julius Kühn-Instituts (JKI) vor. Diese werden in der Tabelle 8 in der Zweck-Spalte als Sonstiges bezeichnet. In den weiteren Beschreibungen werden die Kohlgemüsevarietäten bzw. Kohlgemüseconvarietäten mit Trivialnamen (d.h. dem deutschen Namen) ohne den Hinweis auf eine Sorte aufgeführt.

Tabelle 8: Auflistung der in der Arbeit vorkommenden und verwendeten Kohlgemüsevarietäten bzw. Kohlgemüseconvarietäten sowie verwendete Sorten in Abhängigkeit von den Versuchsjahren

Deutscher Name	Wissenschaftlicher Name	Sorte	Züchter	Zweck	Jahr
Weißkohl	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>capitata</i> var. <i>alba</i> L.	Storema	RIJK ZWAAN, (Niederlande)	Insektenzuchten und Versuche	2013, 2014, 2015
Brokkoli	<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i> Plenck	Marathon	HILD Samen GmbH, (Deutschland)	Insektenzuchten und Versuche	2013, 2014, 2015
Markstammkohl	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>acephala</i> var. <i>medullosa</i> Thell.	Camaro	P. H. Petersen Saatzucht Lundsgaard GmbH, (Deutschland)	Insektenzuchten	2013, 2014, 2015
		Proteor	Grüner Ring, (Deutschland)	Sonstiges	2014
Rosenkohl	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>oleraceae</i> var. <i>gemmifera</i> L.	Maximus	Syngenta Agro GmbH, (Deutschland)	Versuche	2013, 2014, 2015
		Cyrus	Syngenta Agro GmbH, (Deutschland)	Versuche	
		Octia	Agri-Saaten GmbH, (Deutschland)	Sonstiges	
Blumenkohl	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>botrytis</i> var. <i>botrytis</i> L.	Fremont	Seminis, (Vereinigte Staaten)	Sonstiges	2013, 2014
Wirsing	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>capitata</i> var. <i>sabauda</i> L.	Wirosa	Bejo Samen GmbH, (Deutschland)	Sonstiges	2013
Kohlrabi	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>acephala</i> var. <i>gongylodes</i> L.	Korist	Bejo Samen GmbH, (Deutschland)	Sonstiges	2013
Grünkohl	<i>Brassica oleracea</i> convar. <i>acephala</i> var. <i>sabellica</i> L.	Winterbor	Bejo Samen GmbH, (Deutschland)	Sonstiges	2015

Bei jedem Versuch wurden die phänologischen Entwicklungsstadien der Versuchspflanzen von der Aussaat bis zur Endbonitur erfasst. Als Grundlage hierfür diente die BBCH-Skala (Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie Skala) nach Meier (1997).

Die Jungpflanzen für Freilandversuche wurden im Gewächshaus bei 16 °C, 50-90 % rF (relative Luftfeuchte) und Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) in Erdpresstöpfen angezogen. Nach Bedarf wurden die Pflanzen je nach Witterung zwischen drei Tagen (bei kühler Witterung) und drei Wochen vor dem Auspflanzen in einem Folienhaus mit Kulturschutznetzabdeckung (BIONET®) akklimatisiert. Für die Erdpresstöpfe wurde Grundsubstrat P Presstopfsubstrat von Klasmann-Deilmann GmbH (Deutschland) verwendet. Das Auspflanzen erfolgte in der Regel im Entwicklungsstadium BBCH 12 (2

2. Material und Methoden

echte Blätter) (Meier 1997). Die Kulturdauer von Weißkohl mit 21 Kalenderwochen (KW) ist im Vergleich zu Brokkoli mit einer Kulturdauer von 5 bis 10 KW nach dem Auspflanzen im Feld relativ lang. Um auf der Versuchsfläche in der gesamten Anbauzeit Brokkoli zu haben, wurden mehrere Brokkoli-Sätze im Versuchszeitraum zu unterschiedlichen Terminen ausgesät und gepflanzt (Tabelle 9).

Tabelle 9: Aussaat- und Pflanztermine der Kohlgemüsevarietäten für Freilandversuche

Kohlgemüsevarietät	Satz	Aussaattermin	Pflanztermin
Weißkohl	-	15.04.2013	16.05.2013
	-	04.04.2014	05.05.2014
	-	23.03.2015	05.05.2015
Brokkoli	1.	25.02.2013	19.04.2013
	2.	25.03.2013	06.05.2013
	3.	29.04.2013	07.06.2013
	4.	27.05.2013	26.06.2013
	5.	24.06.2013	24.07.2013
	6.	23.07.2013	19.08.2013
	1.	24.02.2014	01.04.2014
	2.	24.03.2014	29.04.2014
	3.	28.04.2014	02.06.2014
	4.	26.05.2014	23.06.2014
	5.	23.06.2014	17.07.2014
	6.	21.07.2014	18.08.2014
	1.	23.02.2015	30.03.2015
	2.	23.03.2015	29.04.2015
	3.	27.04.2015	28.05.2015
	4.	26.05.2015	23.06.2015
	5.	24.06.2015	21.07.2015
	6.	20.07.2015	20.08.2015

Die Pflanzung von Weißkohl- und Brokkolipflanzen erfolgte im Dreiecksverband (Abbildung 1). Die Pflanzenabstände betragen bei beiden praxisübliche 60 cm Abstand in der Reihe, der Reihenabstand 40 cm und die Beetbreite betrug 1,80 m. Ein Beet bestand aus vier Pflanzreihen.

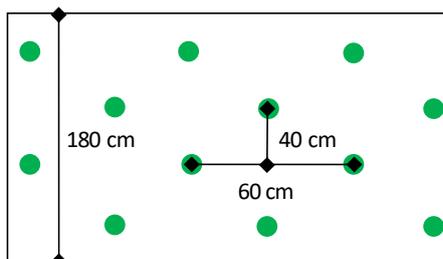


Abbildung 1: Schematische Darstellung zur Pflanzung von Weißkohl- sowie Brokkolipflanzen im Dreiecksverband in einem Beet. Die Beetbreite betrug 1,8 m. Der Abstand zwischen den Pflanzen in der Reihe betrug 60 cm, der Abstand zwischen den Reihen 40 cm

Da auf den Anbauflächen im Freiland (Hötzum und Braunschweig) ein starker Befall mit der Kleinen Kohlflye zu erwarten war, wurden die Versuchspflanzen (BBCH 12) ein bis drei Tage vor dem Auspflanzen mit SpinTor® mit dem Wirkstoff Spinosad (Dow AgroSciences LLC, Vereinigte Staaten) mit der Aufwandmenge von 12 ml/1000 Pflanzen in 1-3 l Wasser/m² angegossen. Ansonsten wurden die Pflanzen sowohl im Feld als auch während der Anzucht mit keinen weiteren Pflanzenschutzmitteln behandelt.

Die Pflanzen im Feld wurden entsprechend dem Bedarf der Kultur sowie der Ergebnisse der Bodenuntersuchungen (s. 7.), die jährlich im Frühjahr erfolgten, gedüngt. Die Versuchs-

kulturen wurden ausschließlich mit Stickstoff (N) gedüngt, da andere Nährstoffe ausreichend im Boden vorhanden waren. Für Weißkohl galt ein N-Sollwert von 300 kg N ha⁻¹ und für Brokkoli 250 kg N ha⁻¹. Der Stickstoff wurde sowohl bei Weißkohl als auch bei Brokkoli in zwei Gaben verabreicht in Form von Perlka (Kalkstickstoff) der Firma AlzChemAG (Deutschland) oder als Kalkammonsalpeter 27 (Kalkammonsalpeter) der Firma AGRAVIS Raiffeisen AG (Deutschland) (Tabelle 10).

Tabelle 10: Bedingungen, nach denen die N-Düngung auf dem Feld erfolgte

Kohlgemüsevarietät	1. Gabe	2. Gabe
Weißkohl	4 Wochen vor der Pflanzung 100 kg N ha ⁻¹ Kalkstickstoff abzüglich Nmin	8 Wochen nach der Auspflanzung 200 kg N ha ⁻¹ Kalkammonsalpeter abzüglich Nmin
Brokkoli	2 Wochen vor der Pflanzung 100 kg N ha ⁻¹ Kalkstickstoff abzüglich Nmin	2 Wochen nach der Pflanzung 150 kg N ha ⁻¹ Kalkammonsalpeter abzüglich Nmin

Die Anzucht der Pflanzen für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen erfolgte bei 25 °C, 40-80 % rF und Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel). Nach Ausbildung der ersten Laubblätter wurden diese in 12er Töpfe mit Tonsubstrat von Klasmann-Deilmann GmbH (Deutschland) pikiert. Die Pflanzen wurden zweimal wöchentlich mit einer Fertyl 2 mega-Lösung, einem NPK(Mg)-Mischdünger (Stickstoff (N), Phosphor (P) Kalzium (K) und Magnesium (Mg)) der Firma Planta Düngemittel GmbH (Deutschland) in der Konzentration von 2 ‰ gedüngt. Die Pflanzengröße für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen unterschied sich je nach BBCH-Stadium und Kohlgemüsevarietäten. Für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen wurden hauptsächlich Weißkohl und Brokkoli verwendet (Tabelle 11).

Tabelle 11: Größe der Kohlgemüsevarietäten, die bei den Versuchen unter kontrollierten Bedingungen verwendet wurden

Kohlgemüsevarietät	BBCH-Stadium	Durchschnittliche Höhe mit Topf (cm)	Durchschnittliche Höhe ohne Topf (cm)	Durchschnittlicher Durchmesser (cm)
Weißkohl	16-19	26	20	36
Weißkohl	19-41	36	30	42
Brokkoli	16-19	36	30	49

2.2 Versuchsinsekten und Zuchten

Im Fokus der Untersuchung standen mehrere Schädlinge der Klasse Insekten (Insecta L.), die zu unterschiedlichen Ordnungen, Unterordnungen und Familien zugeordnet werden (Tabelle 12). In den folgenden Kapiteln werden die Insekten bei ihrem Trivialnamen (deutscher Name) genannt.

Für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen wurden die vier wichtigsten Kohlschädlinge Mehligke Kohlblattlaus, Kleine Kohlflyge, Kohlmotte und Kohleule, die zu erheblichen Ertragseinbußen an Kohlgemüse in Mitteleuropa führen können (s. 1.1.1), im Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst des Julius Kühn-Instituts gezüchtet. Hierzu wurden vitale, parasitoidfreie Insektennachkommen aus dem Feld im Raum Braunschweig eingesammelt. Für die Zucht wurden diese auf unbehandeltem Pflanzenmaterial in Zuchtkäfigen (47 x 47 x 60 cm, Deutschland) aus Macrolon und Gaze, Siebgewebe PP300 µm gehalten. Es wurde jeweils ein Zuchtkäfig für eine Insektenart verwendet. Die

2. Material und Methoden

Zuchtkäfige mit Insekten waren in einem Klimaraum bei Temperaturen von 20 °C, 40-60 % rF und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) untergebracht. Die Reproduktionsraten sowie die Vitalität der Insekten wurden durch bestimmte Zuchtbedingungen gefördert. Diese unterschieden sich je nach Insektenart und Insektenstadium (Tabelle 13). Die gezüchteten Kohlschädlinge wurden je nach Bedarf der Versuchszwecke verwendet.

Tabelle 12: Systematik der in der Arbeit untersuchten Kohlschädlinge nach CABI.org (Centre for Agriculture and Bioscience International)

Deutscher Name	Wissenschaftlicher Name	Synonyme	Ordnung Deutscher Name (Wissenschaftlicher Name)	Unterordnung Deutscher Name (Wissenschaftlicher Name)	Familie Deutscher Name (Wissenschaftlicher Name)
Kleine Kohlflyge	<i>Delia radicum</i> L.	<i>Anthomyia brassicae</i> Bouche, <i>Anthomyia raphani</i> Harris, <i>Hylemya brassicae</i> Bouche, <i>Musca radicum</i> Linnaeus, <i>Chortophila floccosa</i> Macquart, <i>Paregle radicum</i> Linnaeus, <i>Delia hispida</i> Wiedemann, <i>Delia floccosa</i> Macquart, <i>Delia brassicae</i> Hoffmannsegg, <i>Anthomyia brassicae</i> Wiedemann, <i>Delia brassicae</i> Bouché, <i>Delia brassicae</i> Wiedemann	Zweiflügler (Diptera)	Fliegen (Brachycera)	Blumenfliegen (Anthomyiidae)
Kohleule	<i>Mamestra brassicae</i> L.	<i>Phalaena brassicae</i> L., <i>Phalaena omicron</i> Geoffroy, <i>Noctua albidilinea</i> Haworth, <i>Barathra brassicae</i> L.	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Eulenfalter (Noctuidae)
Mehlige Kohlblattlaus	<i>Brevicoryne brassicae</i> L.	<i>Aphis brassicae</i> L., <i>Aphis raphani</i> Schrk., <i>Aphis floris rapae</i> Curt.	Pflanzenläuse (Sternorrhyncha)	Blattläuse (Aphidina)	Röhrenläuse (Aphididae)
Kohlmotte	<i>Plutella xylostella</i> L.	<i>Phalaena xylostella</i> L., <i>Cerostoma maculipennis</i> Curtis	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Schleier- und Halbmotten (Plutellidae)
Kleiner Kohlweißling	<i>Pieris rapae</i> L.	<i>Papilio rapae</i> L.	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Weißlinge (Pieridae)
Großer Kohlweißling	<i>Pieris brassicae</i> L.	<i>Papilio brassicae</i> L., <i>Pontia chariclea</i> Stephens	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Weißlinge (Pieridae)
Kohlzünsler	<i>Evergestis forficalis</i> L.	<i>Phalaena orficalis</i> L., <i>Crambus forficatus</i> Fabricius, <i>Phalaena trivialis</i> Scopoli, <i>Pionea sodalis</i> Butler	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Zünsler (Crambidae)
Gammaeule	<i>Autographa gamma</i> L.	<i>Autographa messmeri</i> Schadewald, <i>Autographa voelkeri</i> Schadewald	Schmetterlinge (Lepidoptera)	Glossata (Glossata)	Eulenfalter (Noctuidae)
Kohldrehherzgallmücke	<i>Contarinia nasturtii</i> Kieffer	<i>Contarinia ruderalis</i> Kieffer, <i>Diplosis ruderalis</i> Kieffer, <i>Diplosis nasturtii</i> Kieffer	Zweiflügler (Diptera)	Mücken (Nematocera)	Gallmücken (Cecidomyiidae)
Weißer Fliege	<i>Aleyrodes proletella</i> L.	<i>Aleyrodes brassicae</i> Walker	Schnabelkerfe (Hemiptera)	Pflanzenläuse (Sternorrhyncha)	Mottenschildläuse (Aleyrodidae)

Die adulten Tiere der Kleinen Kohlflyge wurden in Anlehnung an das Protokoll von Finch und Coaker (1969) mit Trockenfutter, Nassfutter sowie einer Wassertränke in einem Käfig versorgt. Zudem wurden im Zuchtkäfig für die Eiablage zwei offene Petrischalen (90 x 14 mm, Macherey-Nagel, Deutschland) mit Quarzsand der Firma Baunit GmbH (Deutschland) mit der Körnung von 0,1 mm bis 0,7 mm und jeweils ein Kohlrübenwürfel

(2 cm x 2 cm x 1 cm) platziert. Das Vorhandensein von Eiern wurde zweimal in der Woche überprüft. Die Eier wurden mit Wasser aufgeschwemmt und mit einem handelsüblichen Kaffeefilter (Melitta, Deutschland) abfiltriert. Etwa 150 bis 200 Eier wurden auf eine Hälfte einer Kohlrübe (*Brassica napus* subsp. *rapifera* Metzg.) der Sorte `Wilhelmsburger` (Kiepenkerl, Deutschland) aufgelegt. Diese wurde dann in eine viereckige Gerdaschale (20 cm x 20cm x 9,5 cm) von Gerda GmbH & Co. KG mit einer 1 cm dicken Schicht aus Quarzsand der Firma Baunit GmbH (Deutschland) mit der Körnung von 0,1 mm bis 0,7 mm platziert. Von Eiablage bis zur Entwicklung der Puppen dauerte es etwa 28 Tage. Bei den Versuchen musste berücksichtigt werden, dass höhere Temperaturen zur Diapause führen können.

Tabelle 13: Zusammenstellung der Zuchtbedingungen in Abhängigkeit von Insektenstadien und deren biologischen Grundbedürfnissen

Kohlschädling	Insektenstadium	Biologische Grundbedürfnisse	Zuchtbedingungen
Kleine Kohlflye	Adulte	Nahrung	Trockenfutter: 10 g Traubenzucker, 10 g Milcheiweiß, 1 g Sojamehl, 1 g Trockenhefe Nassfutter: 5 g Honig, 1 g Soja, 1 g Bierhefe gemischt mit Wasser Tellertränke mit frischem Wasser
	Larven	Eiablage Nahrung	Quarzsandsubstrat mit einem Kohlrübenwürfel (ca. 4 cm ³) Kohlrübe (ca. 2 g Rübe pro Ei)
Mehlige Kohlblattlaus	Adulte	Nahrung	Weißkohl (BBCH 19, 41-43)
	Larven	Eiablage Nahrung	Weißkohl (BBCH 19, 41-43) Weißkohl (BBCH 19, 41-43)
Kohlmotte	Adulte	Nahrung Eiablage	keine Markstammkohl (mit 6 bis 10 voll entfaltete Laubblättern) bzw. Weißkohl (BBCH 19, 41-43)
	Larven	Nahrung	Markstammkohl- bzw. Weißkohlblätter
Kohleule	Adulte	Nahrung	Tellertränke
	Larven	Eiablage Nahrung	Weißkohl (BBCH 19, 41-43) Weißkohlblätter (BBCH 19, 41-43)

Die Adulten der Kohleule brauchten während der Zucht eine Tellertränke und eine Weißkohlpflanze zur Eiablage. Die Larven wurden bis zum 3. bzw. 4. Larvenstadium (L3 bzw. L4) auf ganzen Weißkohlpflanzen (Tabelle 8) gehalten. Ab dem L3- bzw. L4-Stadium wurden zehn Larven in Gerdaschalen mit Filterpapier und Weißkohlblättern platziert. Filterpapier und Futterkohlblätter wurden bis zur Verpuppung im Abstand von zwei Tagen gewechselt. Im letzten Larvenstadium (L6) wurde der Boden der jeweiligen Gerdaschale mit 2 cm Tonsubstrat (Klasmann-Deilmann GmbH, Deutschland) bedeckt und darauf ein Filterpapier sowie Futterkohlblätter aufgelegt. Die Entwicklung vom Ei bis zur Puppe dauerte einen Monat. Vor dem Schlupf wurden die Männchen von den Weibchen im Puppenstadium sortiert und getrennt (Abbildung 2). Nach Pogue und Simmons (2008) konnten die Geschlechter anhand der Segmenteinschnitte am Hinterleib der Puppen unterschieden werden. Weibchen haben keine klare Genitalnaht im Gegensatz zu Männchen. Die letzten drei Segmenteinschnitte des Abdomenendes an der Analnaht sind bei Weibchen nicht klar getrennt. (Abbildung 2). Die Genitalnaht befand sich im vorletzten Segmenteinschnitt des Abdomenendes. Bei den Versuchen musste die etwa dreiwöchige Puppenruhe berücksichtigt werden.

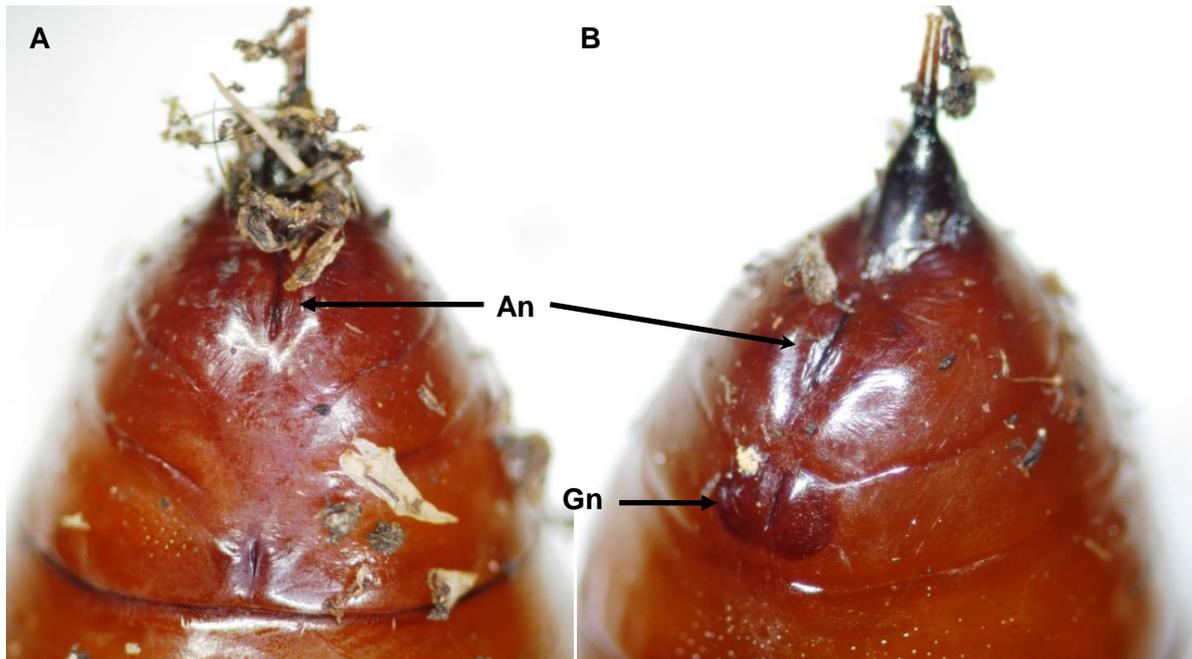


Abbildung 2: Abdomenende einer Kohleulenpuppe von (A) Weibchen und (B) Männchen. Weibchen haben keine klare Genitalnaht im Gegensatz zu Männchen. Die letzten drei Segmenteneinschnitte der Analnaht sind nicht klar getrennt bei Weibchen. An = Analnaht; Gn = Genitalnaht

Die Zuchten der Mehligen Kohlblattlaus und der Kohlmotte ähnelten sich. Bei der Mehligen Kohlblattlaus wurden die parasitoidfreien, vitalen Adulten auf eine Weißkohlpflanze (Tabelle 8) überführt. Im Durchschnitt produzierte eine adulte Mehliges Kohlblattlaus drei Larven innerhalb von 24 Stunden bei 20 °C, 40-60 % rF und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel). Den parasitoidfreien, vitalen Adulten der Kohlmotte wurde entweder Weißkohl oder Markstammkohl (Tabelle 8) angeboten. Sowohl bei der Mehligen Kohlblattlaus als auch bei der Kohlmotte fand die gesamte Entwicklung auf einer Pflanze statt. Es wurden lediglich frische Pflanzen in etwa vierwöchigem Abstand dazu gestellt bzw. alte Pflanzen nach erfolgreichem Befall der neuen Pflanzen entfernt.

Des Weiteren wurde der Kleine Kohlweißling für die Versuche unter kontrollierten Bedingungen benötigt. Hierfür wurden zwölf Adulte in einem Weißkohlfeld mit einem Kescher am Tag des Versuchs eingesammelt. Die Falter wurden bis zu dem Versuchsbeginn in einem Insektenzuchtkäfig (47 cm x 47 cm x 60 cm) mit einer Weißkohlpflanze bei 20 °C, 40-60 % rF und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) gehalten.

2.3 Untersuchungen der optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze sowie der durch diese verursachten Schäden

Die Bestandskontrolle ist eine wichtige konventionelle Überwachungsmethode, um die Befallshäufigkeit bzw. Befalldichte von einem Schadinsekt in einem bestimmten Kohlgemüsebestand im Feld schätzen zu können (s. 1.1.2). Daher war eines der Ziele, die Bestandskontrolle zu automatisieren. Hierfür wurden in dem Zeitraum vom 20.12.2012 bis

16.10.2013 sechs unterschiedliche optoelektronische Sensorsystemtypen getestet. Es wurde überprüft, inwieweit diese zur Detektion der Larven von Schadschmetterlingen bzw. ungeflügelten Mehligen Kohlblattläusen, die sich auf einer Pflanze befanden, sowie der durch diese Insekten verursachten Schäden, eingesetzt werden könnten. Um die Grundlagen für eine Freilandanwendung zu erarbeiten, erfolgten die Untersuchungen hauptsächlich unter kontrollierten Bedingungen. Bei allen eingesetzten Kameras wurde zwischen drei Kameraperspektivarten nach Karn und Frick (2008) unterschieden: Top Shot, Normalsicht und Froschperspektive (Tabelle 14). Bei einer Top Shot Perspektive wurde die Kamera in einem Winkel von 90 Grad (senkrecht) über der Pflanze und Bodenoberfläche in einer bestimmten Höhe ausgerichtet. Normalsicht wird auch als Seitliche-Sicht bezeichnet und bedeutet, dass die Kamera seitlich (vertikal) in der Höhe der Pflanze positioniert wurde. Für die Kamerapositionierung in der Top Shot und der Normalsicht Perspektive wurde ein Gestell oder ein Stativ verwendet. Die Froschperspektive bedeutete, dass die Kamera sich in einer sehr niedrigen Position zum Zielobjekt (Pflanze) befand. Hierbei wurde kein Stativ oder Gestell verwendet. Je nach Art des optoelektronischen Sensorsystems unterschied sich der Versuchsaufbau.

Tabelle 14: Definitionen der verwendeten Perspektiven nach Karn und Frick (2008)

Perspektive	Definition
Top Shot	Kamera ist senkrecht in einem Winkel von 90 Grad zu Pflanze und Bodenoberfläche ausgerichtet
Normalsicht oder Seitliche-Sicht	Kamera ist vertikal in Pflanzenhöhe positioniert
Froschperspektive	Kamera wird in einer sehr niedrigen Position zur Pflanze ausgerichtet

2.3.1 Farbkamera

Farbkameras wurden im Zeitraum vom 02.01.2013 bis 18.03.2013 eingesetzt, um den optisch sichtbaren Spektralbereich (s. 1.2.1) eines Schadinsekts auf einer Pflanze bzw. den sichtbaren Spektralbereich einer befallenen Pflanze naturgetreu in Farbe ohne Zusatzbeleuchtung zweidimensional erfassen zu können und im Hinblick auf die Automatisierung der Bestandskontrolle zu bewerten. Hierfür wurden die digitale Kompaktkamera PowerShot G2 (Canon, Japan), die Spiegelreflexkamera Olympus-E1 (Olympus, Japan) bzw. der Camcorder HDR-CX730E (Sony, Japan) verwendet (Tabelle 15). Die Rot, Grün und Blau (RGB)-Kanäle wurden innerhalb der Kamera mit Algorithmen interpoliert und somit die Farbinformation des Farbbildes gewonnen.

Mit dem Versuch wurden drei Fragestellungen untersucht: 1. Überprüfung der Kameraperspektiven in unterschiedlichen Höhen mit den drei Digitalkameras zur Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelten, pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze sowie die durch diese verursachten Schäden, 2. Untersuchung, wo auf der Pflanze sich die mobilen oberirdischen ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien unter kontrollierten Bedingungen befinden. Und 3. wurden die digitalen Spektralinformationen von Pflanzen mit Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden mittels Bildverarbeitung bewertet.

2. Material und Methoden

Tabelle 15: In den Versuchen verwendete Kameratypensysteme und wichtige Kameraparameter (n.a. = von der Firma nicht angegeben)

Kameratyp	PowerShot G2	Olympus-E1	HDR-CX730E
Firma (Sitz)	Canon (Japan)	Olympus (Japan)	Sony (Japan)
Anzahl effektiver Pixel auf dem Sensor (Megapixel)	4,1	5	6,14
Anzahl physikalischer Pixel auf dem Sensor (Megapixel)	4,1	5,5	6,65
Pixelgröße (μm)	3	6,7	n.a.
Bit-Tiefe pro Farbkanal (Bit)	8	8	n.a.
Sensortyp	CCD	CCD	CMOS
Optischer Bildstabilisator	kein	kein	vorhanden
Bildformate	JPEG, RAW	JPEG, RAW, TIF	JPEG
Sensibel für den Spektralbereich (nm)	380-780	380-780	380-780
Kosten einer neuen Kamera ohne Mehrwertsteuer in € und Jahr des Erwerbs	732 (2002)	730 (2006)	879 (2012)
Blendenumfang des Kameraobjektivs (mm)	35	14-54	38
Brennweite des Kameraobjektivs	F2-F2,5	F2-F3,5	F2-F3,8

Der Grundaufbau des Versuches war wie folgt: Der Versuch wurde in einer Gewächshauskabine mit der Fläche von 35 m² bei Temperaturen von 20 °C und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) durchgeführt. Es gab zwei Versuchswiederholungen: Die erste fand vom 07.01.2013 bis 21.01.2013 und die zweite vom 11.02.2013 bis 08.03.2013 statt. In der Gewächshauskabine befanden sich pro Versuchswiederholung insgesamt 75 Weißkohlpflanzen in den BBCH-Stadien 16 bis 19 (6 bis 9 echte Blätter). Die Pflanzen (Tabelle 11) wurden in drei Blöcken von jeweils 25 Weißkohlpflanzen pro Block platziert. Die drei Blöcke waren durch einen Abstand von 1 m räumlich voneinander getrennt (Abbildung 3). Pro Block wurden an fünf Pflanzen eine bestimmte Insektenart in einer definierten Anzahl ausgebracht, entweder fünf adulte Mehligke Kohlblattläuse, fünf Larven im zweiten Larvenstadium der Kohlmotte oder fünf Larven im dritten Larvenstadium der Kohleule.

Es wurde die Eignung der Froschperspektive (Tabelle 14) aus 10 cm Höhe und Top Shot (Tabelle 14) Perspektive aus 40, 50 und 70 cm Höhe zur Detektion der Schadinsekten bzw. der durch diese verursachten Schäden auf einer Weißkohlpflanze im BBCH-Stadium 16-19 untersucht. Die Pflanzen wurden im Versuchszeitraum fünfmal in der Woche (im Abstand von 24 Stunden) mittels unterschiedlicher Perspektiven und aus unterschiedlichen Höhen mittels der drei digitalen Kameras erfasst.



Abbildung 3: Anordnung der Weißkohlpflanzen sowie der drei Schadinsekten (Mehlige Kohlblattlaus, Kohlmotte bzw. Kohleule) im Versuch. Die drei Blöcke des Versuchs sind durch Vierecke hervorgehoben. Der Mehlige Kohlblattlausblock ist orange (Block 1), der Kohlmottenblock ist lila (Block 2) und der Kohleulenblock ist grün (Block 3) hervorgehoben. Durch ein rotes Viereck und einen Pfeil ist das im Versuch verwendete Stativ (S) hervorgehoben. Die Gelbtafeln wurden gegen Trauermücken ausgebracht, diese hatten keinen Einfluss auf die zu beobachtenden Schadinsekten

Ferner wurde überprüft, wie oft die Schadinsekten sich im Versuchszeitraum auf der Blattoberseite befanden. Hierfür wurden die Anzahl an Schadinsekten auf der Blattoberseite der Umblätter und Außenblätter fünfmal in der Woche (im Abstand von 24 Stunden) erfasst. Nach Verteilung der Stomata wird der Blattaufbau von Kohlgemüse als hypostomatisch bezeichnet. Nach Wagenitz (2003) bedeutet dies, dass die Stomata sich nur auf der Blattunterseite befinden. Daher wurde die Blattunterseite als die Seite des Blattes mit Stomata definiert (Tabelle 16). Die Seite des Blattes war am nächsten zum Boden ausgerichtet. Die Blattseite ohne Stomata wurde als Blattoberseite bezeichnet. Die Anzahl an Schadinsekten an den Blattoberseiten der senkrechtwachsenden Blätter, die auch als Herzblätter benannt wurden, wurde nicht bonitiert, da diese aufgrund der Blattmorphologie sehr brüchig waren und durch die Methode nicht erfasst werden konnten. Somit waren diese für die Methode nicht relevant.

Tabelle 16: Definition der Blattseiten nach Wagenitz (2003). Der Blattaufbau von Kohlgemüse wird nach Verteilung der Stomata als hypostomatisch bezeichnet

Blattseite	Definition
Blattunterseite	Die Seite des Blattes am nächsten zum Boden und mit Stomata.
Blattoberseite	Die Seite des Blattes am nächsten zum Vegetationskegel und ohne Stomata

2.3.2 Graubildkamera

Eine im Nahinfrarot-Wellenbereich empfindliche Graubildkamera (Tabelle 17) mit drei unterschiedlichen Fremdlichteinflüssen wurde im Zeitraum vom 05.03.2013 bis 27.03.2013 verwendet. Ziel war es, die Eignung des Systems zur Automatisierung der Bestandskontrolle zu bewerten. Hierfür wurde eine zweidimensionale, naturgetreue in schwarz-weiß erfasste

Spektralinformation von Schadinsekten auf einer Pflanze bzw. Spektralinformation von befallenen Pflanzen erfasst und mittels Bildverarbeitung ausgewertet.

Für die Versuchszwecke wurden eine Woche vor der Messung fünf Weißkohlpflanzen (BBCH 41) mit je zehn Mehligigen Kohlblattläusen und weitere fünf Weißkohlpflanzen (Tabelle 11) mit je drei Larven der Kohlmotte besetzt. Die Larven der Kohlmotten wiesen das zweite bzw. dritte Larvenstadium auf. Die befallenen Pflanzen wurden bei Temperaturen von 20 °C und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) bis zum Einsatz der Kamera mit Fremdlichteinflüssen gehalten.

Tabelle 17: Parameter zu der im Versuch verwendeten Graubildkamera und deren Objektiv

Kameratyp	monochrome Matrixkamera HXG20NIR
Firma (Sitz)	Baumer (Deutschland)
Anzahl effektiver Pixel auf dem Sensor (Megapixel)	2
Anzahl physikalischer Pixel auf dem Sensor (Megapixel)	-
Pixelgröße (µm)	5,5
Bit-Tiefe pro Farbkanal (Bit)	8
Sensortyp	CMOS
Optischer Bildstabilisator	kein
Bildformate	RAW
Kosten (€)	2200 €
Sensibel für den Spektralbereich (nm)	400-1000
Blendenumfang des Pentax RICOH FL-CC3516-2M (mm)	35
Brennweite des Pentax RICOH FL-CC3516-2M	F1,6

Als Beispiel für eine Graubildkamera wurde die monochrome Matrixkamera HXG20NIR von Baumer (Deutschland) mit dem Objektiv Pentax RICOH FL-CC3516-2M (Pentax, Japan) im Zusammenhang mit unterschiedlichen Fremdlichteinflüssen unter kontrollierten Bedingungen verwendet. Die Graubildkamera nimmt die reflektierte Spektralinformation ausschließlich in Form von Grauwerten auf. Es wurde auf dem Kamera-Chip somit nicht zwischen den RGB-Pixeln unterschieden und ausschließlich Intensitätswerte und ein breites Band an detektierten Wellenlängen erfasst. Dadurch ist eine bessere Ortsauflösung im Vergleich zu einer Farbkamera möglich. Unterschiedliche Fremdlichteinflüsse können die reflektierten Spektralinformationen beeinflussen (Hering und Martin 2017) und dadurch die Erkennung von Schadinsekten, bzw. von diesen verursachten Schäden, erleichtern. Daher wurde im Versuchszeitraum ein extern regelbarer Scheinwerfer, der Licht mit einer Wellenlänge von 780 nm (Halogenlampenbereich) emittierte, und zwei extern regelbare Power-LED-Cluster verwendet. Der eine Cluster aus 9 HPB8b-45K5R/WPCB LEDs emittierte den Wellenbereich um 625 nm (sichtbarer roter Wellenbereich), der andere Cluster aus 9 ILH-IDOI-94NN-SC201 LEDs emittierte den Wellenbereich um 940 nm (Nahinfrarot-Bereich).

Die Kamera sowie die drei Fremdlichtquellen wurden an einem Bosch-Profilständer (Abbildung 4) über dem Förderband befestigt. Die Kamera und die Förderbandsteuerung wurden von einem zentralen Linux-Rechner aus gesteuert. Alle Seiten des Profilständers waren mit einer lichtundurchlässigen schwarzen Folie abgedeckt, damit das Tageslicht bei der Anwendung der Kamera und Fremdlichtquellen so weit wie möglich ausgeschlossen wurde. Die Kamera war in 90 Grad über dem Förderband ausgerichtet. Je nachdem, ob ein Teil der Pflanze oder eine ganze Pflanze mit der Kamera erfasst wurde, betrug der feste Kameraabstand zu dem Förderband entweder 40 cm oder 70 cm. Der Cluster aus 9 HPB8b-

45K5R/WPCB LEDs und der Cluster aus 9 ILH-IDOI-94NN-SC201 LEDs war unmittelbar über den Pflanzen 40 cm zum Förderband seitlich an dem Profilständer befestigt. Der Scheinwerfer wurde in einem 45 Grad Winkel und in einem Abstand von 100 cm zum Förderband befestigt.

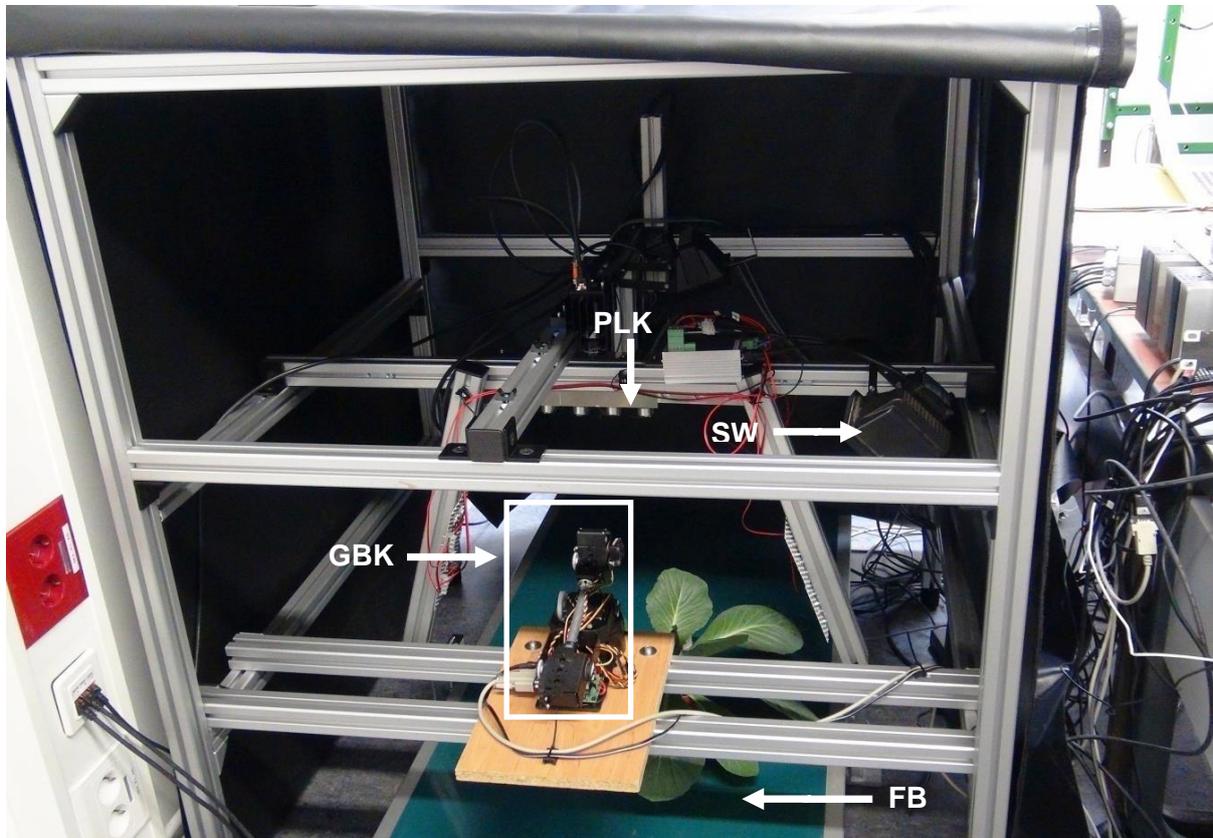


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Erprobung der monochromen Matrixkamera HXG20NIR von Baumer (Deutschland). GBK = Graubildkamera, FB = Förderband, SW = Scheinwerfer, PLK = Power-LED-Cluster

Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Auswertung der Daten fand in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen aus der Hochschule Osnabrück der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik statt.

2.3.3 Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse (CFBA)

Eine Pflanze kann auf biotische Stressoren mit einer Änderung in der Photosyntheseaktivität reagieren, welche mittels Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse (CFBA) detektiert werden kann (Bauriegel, E. Herppich, W. 2014; Brabandt et al. 2014; Gorbe und Calatayud 2012; Maxwell und Johnson 2000; Willert et al. 1995). Daher wurde im Zeitraum vom 13.05.2013 bis 29.05.2013 untersucht, ob mit dem System Schadinsekten auf einer Pflanze sowie durch diese verursachte Pflanzenschäden unter kontrollierten Bedingungen erfasst werden können. Eine Woche vor der Messung mit der CFBA wurden insgesamt 15 Brokkolipflanzen im BBCH-Stadium 19 (Tabelle 11) mit einer bestimmten Art und Anzahl an Schädlingen vorbereitet. Es wurden fünf Brokkolipflanzen mit je drei Kohlmottenlarven, weitere fünf Brokkolipflanzen mit je fünf bzw. 20 Individuen der Mehligen Kohlblattlaus besetzt. Die

Messungen erfolgten sowohl an einer ganzen Pflanze als auch an ausgesuchten Blättern mit Befall.

Die Photosyntheseaktivität von Blättern bzw. Pflanzen mit Schadinsekten bzw. von Pflanzen mit Schäden wurde mittels des Verhältnisses der variablen Fluoreszenz zur maximalen Fluoreszenz nach einem Lichtsättigungsimpuls (F_v/F_m) bewertet. Das Verhältnis F_v/F_m stellt einen Parameter dar, mit dem maximale photochemische Effizienz von Photosystem II bewertet werden kann (Willert et al. 1995). F_v ist dabei die variable Fluoreszenz und F_m ist die maximale Fluoreszenz nach einem Lichtsättigungsimpuls. Die variable Fluoreszenz ($F_v = F_m - F_0$) wird berechnet als Differenz zwischen der maximalen Fluoreszenz nach einem Lichtsättigungsimpuls und der Grundfluoreszenz (F_0). F_m und F_0 wurden mit der CFBA, die mit einem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) erfolgte, erfasst. Das System bestand aus zwei LED-Feldern (Abbildung 5), deren Dioden orangefarbenes Licht emittierten ($\lambda_{\max} = 620 \text{ nm}$), einem Halogenlampensystem (OSRAM Xenophot HLX 64653, 250W, 24V, GX5.3, OSRAM GmbH, Deutschland), welches einen elektronisch angesteuerten Verschlussmechanismus hatte, und einer CCD-Kamera (F: 1,2/2,6-6mm; Bit-Tiefe pro Pixel: 12 Bit) mit einem Kurzbandfiltersystem (Hochpass bei 695 nm und Tiefpass bei 780 nm). Somit wurde von der Systemkamera ein Spektralbereich von 650 nm bis 800 nm erfasst. Die Steuerung des Systems erfolgte durch die FluorCAM 6-Software (PSI, Tschechien).

Die abgetrennten Blätter wurden aus der Top Shot Perspektive und die ganzen Pflanzen aus der Seitlichen-Sicht Perspektive (Tabelle 14) erfasst. Die Messungen an einer ganzen Pflanze waren zu dem Versuchszeitpunkt technisch ausschließlich von der Seite möglich. Bei der Aufnahme der abgetrennten Blätter war die Kamera senkrecht in einer Höhe von 30 cm über den Blättern platziert (Abbildung 5) und bei der Aufnahme der ganzen Pflanzen war die Kamera horizontal zu der Pflanze 20 cm entfernt positioniert. Die Messungen erfolgten nach einer zehnmütigen Dunkeladaptation in einem abgedunkelten Raum. Zunächst wurde die Grundfluoreszenz (F_0), die durch aktinisches Licht der LED-Felder induziert wurde, mit dem System erfasst. Im Anschluss wurde während des einsekundigen Lichtsättigungsimpulses, mit maximal $2500 \mu\text{mol Photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ des Halogenlampensystems, die F_m -Werte aufgenommen. Zur bildanalytischen Auswertung wurde der kumulative Ansatz nach Bauriegel et al. (2010) angewandt. Es wurden sechs abgetrennte Blätter mit Kohlmottenlarven, sechs abgetrennte Blätter mit Larvenschäden, sechs abgetrennte Blätter mit kleinen Blattlauskolonien, sechs abgetrennte Blätter mit großen Blattlauskolonien und sechs abgetrennte Blätter ohne Symptome oder Schadinsekten mit dem System erfasst.

Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Auswertung der Daten fand in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Dr. W. B. Herppich vom Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie aus der Abteilung Technik im Gartenbau (Potsdam) statt.

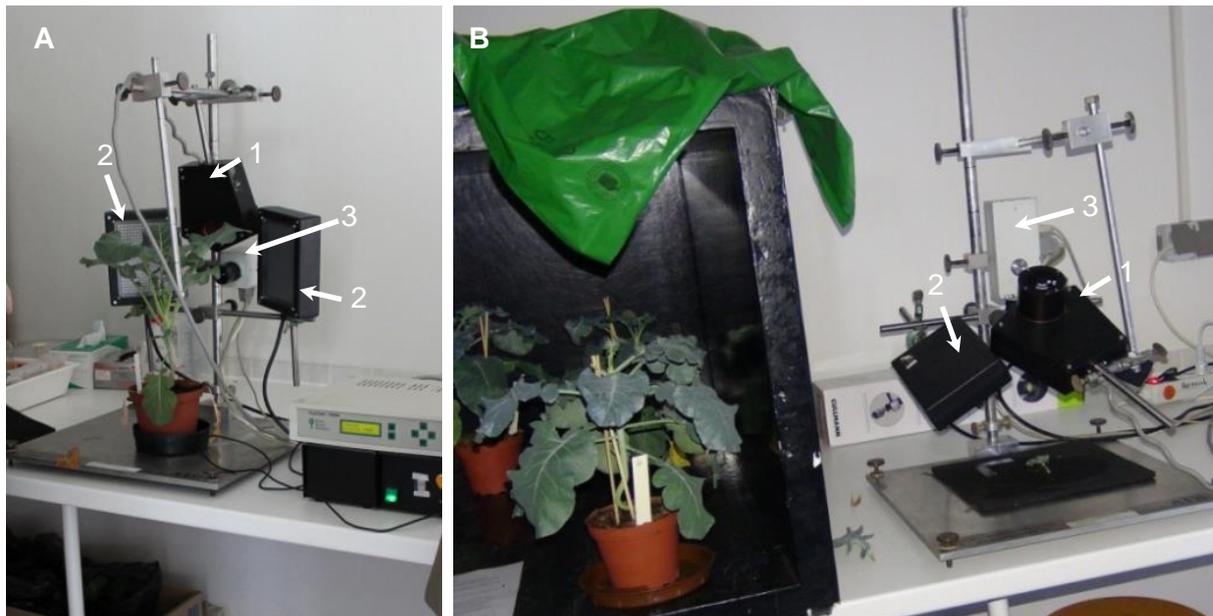


Abbildung 5: Versuchsaufbau mit modularem System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) (A) mit einer ganzen Pflanze und (B) mit einem abgetrennten Brokkoliblatt. 1 = LED-Feld, dessen Dioden das orangefarbene Licht emittieren, 2 = Halogenlampensystem für den Lichtsättigungsimpuls, 3 = CCD-Kamera

2.3.4 Bolometerkamera

Im Zeitraum vom 10.10.2013 bis 16.10.2013 wurde überprüft, ob Kohlschädlinge wie Larven von Schadschmetterlingen und die Mehligke Kohlblattlaus auf einer Pflanze bzw. durch diese verursachten Schäden durch einen Thermodetektor (s. 1.2.2) und somit anhand der Temperaturunterschiede der Oberflächen sowohl im Feld, als auch unter kontrollierten Bedingungen berührungslos erfasst werden können. Hierfür wurde eine Bolometerkamera i7 (FLIR systems Inc., USA), die nach dem Prinzip der Thermokonduktivität (s. 1.2.2) funktioniert, eingesetzt.

Die Bolometerkamera FLIR i7 (Abbildung 6) ist eine Kamera, die bis 250 °C messen kann und die laut dem Hersteller in der Lage ist, Temperaturunterschiede ab 0,10 °C zu erkennen. Die Kamera erfasst den Spektralbereich 7,5-13 µm, ist robust, musste nicht gekühlt werden und ist für den Außenbereich geeignet. Die Infrarotauflösung beträgt 140 x 140 Pixel. Die Bit-Tiefe ist 14 Bit und die Daten werden in Form von Infrarotbildern im JPEG-Format sowie als Messdaten auf der Speicherkarte der Kamera gespeichert. Die Messdaten von FLIR i7 konnten in eine Excel-Tabelle ausgelesen werden. Untersuchungen zur Detektion der Mehligke Kohlblattlaus bzw. Larven von Schadschmetterlingen auf einer Pflanze waren bis zu dem Versuchszeitpunkt nicht bekannt. Daher wurde das Verfahren zur Erfassung der Mehligke Kohlblattlaus bzw. Larven von Schadschmetterlingen auf Kohlgemüse bei 6 °C im Feld sowie 18 °C unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Im Feld wurden die Oberflächentemperaturen von Weißkohl- und Wirsingblättern mit der Mehligke Kohlblattlaus (Kolonie mit > 200 Individuen) bzw. Larven von Schadschmetterlingen direkt mit der Kamera erfasst. Bei den Schmetterlingslarven handelte es sich um den Kleinen Kohlweißling (L5-Stadium) und den Kohlzünzler (L4-Stadium). Unter kontrollierten Bedingungen wurden

Brokkolipflanzen im BBCH-Stadium 16-19 (Tabelle 11) mit Besatz der Mehligen Kohlblattlaus (Kolonie mit > 200 Individuen) bzw. Larven von Kohlmotten (L4-Stadium) erfasst. Sowohl im Feld als auch unter kontrollierten Bedingungen wurden die ganzen Pflanzen und einzelne Blätter sowie einzelne Insekten mit der Kamera untersucht. Bei Aufnahmen von ganzen Pflanzen war die Kamera 70 cm entfernt vom Boden und senkrecht zum Boden ausgerichtet. Bei den Blatt- sowie Insekten-Aufnahmen war die Kamera 5 bis 10 cm von einem Blatt bzw. Insekt oder 30 bzw. 35 cm vom Boden entfernt und senkrecht zum Boden ausgerichtet. Im Feld und unter kontrollierten Bedingungen wurden die Pflanzen mit Insekten und durch diese verursachten Schäden neben der FLIR i7-Bolometerkamera auch mit einem Camcorder HDR-CX730E von Sony (Tabelle 15) erfasst.



Abbildung 6: Im Versuch verwendete Bolometerkamera i7 (FLIR systems Inc., USA). Die Maße der Kamera betragen 223 x 79 x 83 mm. (A) Kamera von hinten mit einem aktivierten Bildschirm; (B) Kamera von vorne mit einem Infrarotobjektiv und Trigger-Taste zum Speichern von Bildern; (C) Kamera von der Seite

2.3.5 3D-Kamerasysteme

Im Zeitraum vom 05.03.2013 bis 27.03.2013 wurde überprüft, ob Schadinsekten auf einer Pflanze und durch diese verursachten Schäden dreidimensional (3D) mittels einer der zwei 3D-Kamerasysteme erfasst werden können und somit das Potential zur automatisierten Erfassung von diesen haben. Wie bei der Graubildkamera wurden auch hier eine Woche vor der Messung fünf Weißkohlpflanzen (BBCH 41) mit je zehn Mehligen Kohlblattläusen und weitere fünf Weißkohlpflanzen mit je drei Larven der Kohlmotte besetzt. Die Larven der Kohlmotten wiesen das zweite bzw. dritte Larvenstadium auf. Die befallenen Pflanzen

wurden bei Temperaturen von 20 °C und unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) bis zum Einsatz der 3D-Kamerasysteme gehalten. Für beide 3D-Kamerasysteme wurden die gleichen Pflanzen verwendet.

Im Versuch wurden die gängigen zwei 3D-Kamerasysteme geprüft: Die Linienprofilsensor Gocator 2350 (LMI technologies, Canada) und die O3D 200 TOF-Kamera (Time-Of-Flight) von IFM Elektronik GmbH (Deutschland). Die Linienprofilsensor Gocator 2350 (LMI technologies, Canada) ist ein System, welches nach dem Prinzip der Lasertriangulation funktioniert (s. 1.2.2). Mit diesem System werden die Konturen in X, Y und Z-Richtung erfasst. Dies erfolgt, indem ein Laser der Klasse 3R mit der elektromagnetischen Strahlung im Wellenbereich von 600 nm eine Linienoptik auf einem Messobjekt (Pflanze) abbildet. Nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz ist bei dem Laser der Klasse 3R zu beachten, dass dieser gefährlich für das Auge ist und nur unterwiesene Personen dürfen diese Art von Lasergeräten verwenden. Das reflektierte Laserlicht des Objektes wurde von einer Kamera, die in einem definierten Winkel im Sensor befestigt war, erfasst (Abbildung 7B). So wird ein Objekt Linie für Linie erfasst. Laut Hersteller hatte die Kamera eine Aufnahmegeschwindigkeit von 267 Hz und eine horizontale Auflösung von 1280 Pixel. Das System wurde über das systemeigene Programm, welches über TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) abgerufen wurde, bedient. Die Messungen sowie die Objekterkennung erfolgten unter dem Betriebsmodus. Gocator 2350 wurde unter kontrollierten Bedingungen senkrecht zu dem Boden und Pflanzen in der Top Shot Perspektive (Tabelle 14) an einem Boschprofilständer mit einem festen Abstand von 70 cm zum Förderband befestigt (Abbildung 7A). Es wurde eine befallene Pflanze auf ein elektronisch gesteuertes Förderband aufgestellt und mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,6 m/s während der Messung bewegt. Sowohl die Kamera als auch das Förderband wurden von einem zentralen Linux-Rechner gesteuert. Die Messdaten wurden im CSV-Format (Comma-separated values) sowie die Intensitätsdaten als zweidimensionale Bilder (Grauwert- und Falschfarbenbild) exportiert.

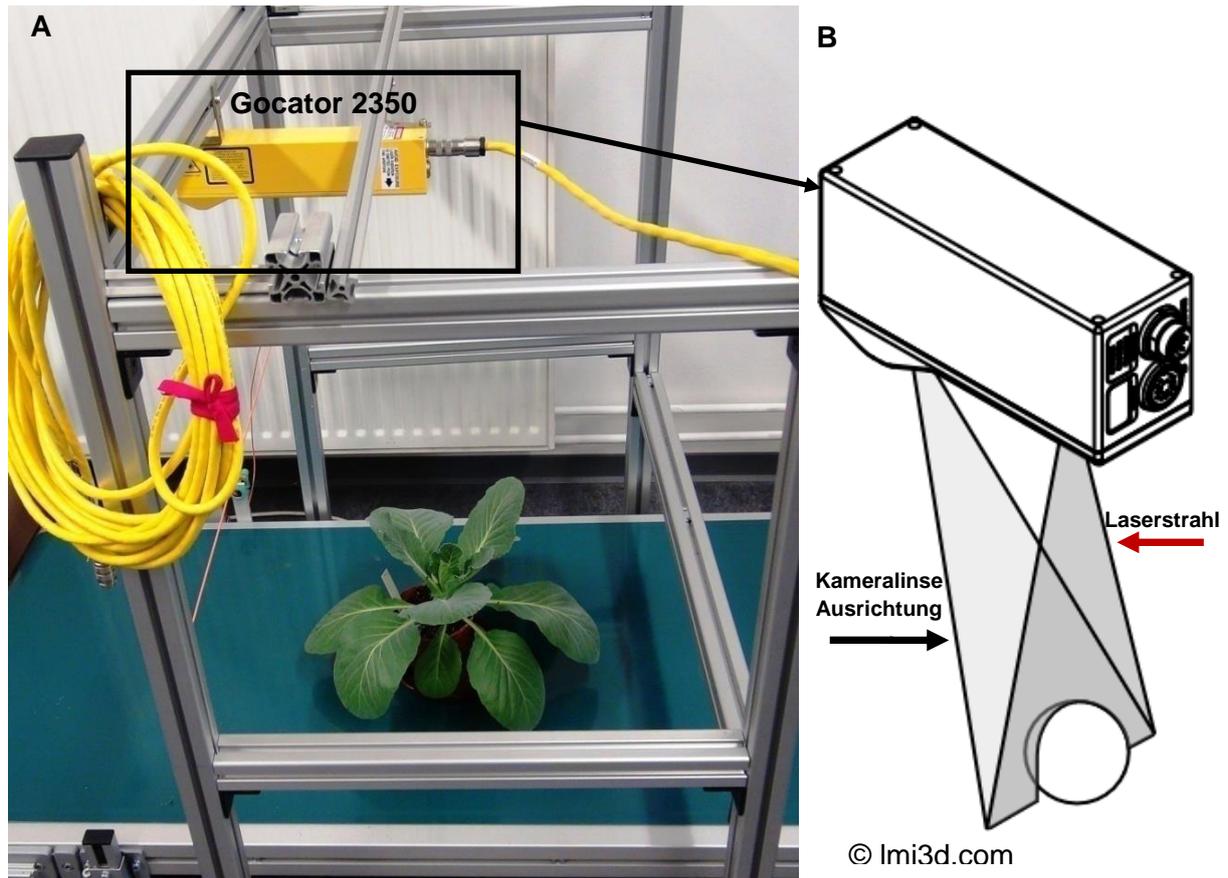


Abbildung 7: Gocator 2350 (LMI technologies, Canada). (A) Versuchsaufbau: Die Gocator 2350 ist durch ein rotes Viereck und Pfeil hervorgehoben. (B) © Imi3d.com Schematische Darstellung (LMI technologies) der Funktionsweise von Gocator 2350. Durch den schwarzen Pfeil ist die Ausrichtung der Kameralinse sowie durch den roten Pfeil der Laserstrahl hervorgehoben

Das zweite 3D-Sensorsystem war eine O3D 200 TOF-Kamera (Time-Of-Flight) von IFM Elektronik GmbH (Deutschland), welche nach dem Prinzip des Pulslaufzeitverfahrens (s. 1.2.2) funktioniert. Bei dem System wird das ganze Objekt auf einmal durch die Kamera erfasst und nicht Linie für Linie ertastet. Hierfür wird von dem System das Messobjekt durch ein Infrarotlicht einer Wellenlänge von 850 nm beleuchtet und der PMD-Sensor (Photonic Mixing Device) der Kamera misst für jeden Bildpunkt die Zeit, die der Strahl bis zum Objekt und wieder zurück braucht. Anhand des Sensorsystems wird eine Grauskala und ein 3D-Bild erzeugt. Laut Hersteller hat das System eine Auflösung von 64x48 Bildpunkten. Die Kamera ist ein spritzwasserfestes System und somit für den Einsatz im Freiland gut geeignet. Die Kamera wurde im Abstand von 70 cm zur Pflanze senkrecht darüber befestigt und die Daten erfasst. Zur Datenerfassung wurde die firmeneigene Software verwendet, die auf der Firmeninternetseite www.ifm.com verfügbar ist. Im Anschluss wurden die erfassten Daten ausgewertet. Sowohl die Versuchsdurchführung als auch die Auswertung der Daten fand in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen von der Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, statt.

2.4 Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die digitale Erfassung von Schaderregern

Im Versuchszeitraum vom 21.04.2013 bis 09.11.2015 wurden Versuche zur Verteilung, Populationsdynamik bzw. Flugaktivität der Schadinsekten im Feld sowie Testversuche zur Fängigkeit der Trichter-Sexualpheromonlockstoffalle unter kontrollierten Bedingungen mit dem Ziel durchgeführt, den Arbeitsbereich für die digitale Erfassung von Schadinsekten zu charakterisieren. Das Potential und die Eignung der zwei digitalen Systemgruppen wurden anhand der erhobenen Daten evaluiert. Im Fokus der Untersuchungen waren die Mehligke Kohlblattlaus, Schadschmetterlinge, die Kleine Kohlflye und die Kohldrehherz gallmücke. Der Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs unterschied sich je nach Fragestellung, Schädlingsstadium und Schädlingsart.

2.4.1 Versuchsflächen

Die Freilandversuche erfolgten auf den Versuchsbetriebsflächen des Julius Kühn-Instituts in Hötzum und Braunschweig (Tabelle 18). Die Flächen wurden in Flächenabschnitte untergliedert, die als Schlag bezeichnet wurden. In Braunschweig handelt es sich um einen schwach lehmigen Sand mit einem Tongehalt von 5-12 %. Die Fläche in Braunschweig hatte vier Schläge, jeder Schlag war 1000 m² (25 m x 40 m) groß. Auf der Freilandfläche in Braunschweig gab es zudem eine Kastenanlage, von der zwei Kästen mit der Fläche von jeweils 28 m² (1,4 m x 20 m) für die Versuche verwendet wurden. Der Bodentyp in Hötzum entsprach einem sandigen Lehm mit einem Tongehalt von 17-25 %. Auf der Fläche in Hötzum befanden sich 12 Schläge, jeder Schlag hatte eine Fläche von 1080 m² (27 x 40 m).

Tabelle 18: Grad-Minuten-Sekunden Koordinaten (GMS-Koordinaten) sowie Dezimalkoordinaten von den Flächen, an denen Freilandversuche stattfanden

Ort	GMS-Koordinaten Breitengrad	GMS-Koordinaten Längengrad	Dezimalgradkoordinaten Breitengrad	Dezimalgradkoordinaten Längengrad
Braunschweig	52°16'35.994"N	10° 33' 57.851"O	52.276665	10.566070
Hötzum	52°12'14.0"N	10°36'17.6"O	52.203884	10.604885

Die Beetlängen sowie die Breite der Wege zwischen den Beeten, die auch als Wegbreite bezeichnet wurden, unterschieden sich je nach Versuchsstandort. In Braunschweig betrug die Beetlänge 40 m und die Wegbreite 1,20 m. In Hötzum war die Beetlänge 21 m und die Wegbreite 1,30 m. Die Maße zur Auspflanzung der Versuchspflanzen waren an beiden Versuchsstandorten gleich und sind in der Abbildung 1 dargestellt.

Auf allen Flächen des Julius Kühn-Instituts wurde eine rotierende Fruchtfolge betrieben. Je nach Versuchsfläche, Kultur und Versuchsjahr unterschied sich die Vorkultur (Tabelle 19). Die Bodenbearbeitung der Flächen in Hötzum und Braunschweig erfolgte im Herbst nach der Anbausaison und im Frühling vor dem Auspflanzen. Im Herbst wurden die Bestandsreste zunächst abgeschlägelt und in den Boden eingefräst. Im Anschluss wurde der Boden mit einem Pflug gelockert und gewendet sowie mit einer Kreisegge eingeebnet. Im Frühjahr wurden die Flächen mit einer Saatbettkombination pflanzfertig vorbereitet.

Tabelle 19: Vorkulturen der jeweiligen Schläge, auf denen Weißkohl bzw. Brokkoli für die Feldversuche angepflanzt wurden

Kohlgemüsevarietät	Ort	Jahr	Vorkultur
Weißkohl	Braunschweig	2013	Futterpflanzen
		2014	Weißkohl und Brokkoli
		2015	Mais
	Hötzum	2013	Blumenkohl
		2014	Winterweizen
		2015	Möhren
Brokkoli	Braunschweig	2013	Futterpflanzen
		2014	Weißkohl und Brokkoli
		2015	Mais
	Hötzum	2013	Brache
		2014	Winterweizen
		2015	Winterweizen

2.4.2 Untersuchung zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus auf einer Pflanze im Feld

Die Mehliges Kohlblattlaus (s. 1.1.1 und 2.2) ist ein bedeutender Schädling im Kohlgemüseanbau. Um das Potential und die Eignung der Sensoren bzw. Sensorsystemen zur Erfassung von Schadinsekten beurteilen zu können, war das Ziel im Zeitraum vom 12.05.2014 bis 13.10.2014 sowie vom 11.05.2015 bis 12.10.2015 die Besiedlung der Wirtspflanzen durch die Mehliges Kohlblattlaus in einem Weißkohlbestand zu erfassen. Anhand der erhobenen Daten wurde zudem die Populationsdynamik der Mehliges Kohlblattlaus im Weißkohlfeld erfasst.

Im Fokus der Untersuchungen zur Besiedlung der Mehliges Kohlblattlaus in einem Weißkohlfeldbestand waren zwei Schwerpunkte: Die vertikale Verteilung des Schadinsekts auf einer Wirtspflanze und dessen Blattseitenpräferenz. Bei beiden Schwerpunkten der Untersuchung wurde die Anzahl an Adulten und Larven der Mehliges Kohlblattlaus durch direktes Auszählen ermittelt. Bei der vertikalen Verteilung der Mehliges Kohlblattlaus wurde die Anzahl an Adulten und Larven des Schädling auf den Blättern der drei vertikalen Zonen ausgezählt. Hierfür wurde die Pflanze bei der Bonitur in drei horizontale Zonen unterteilt: Herz-, Um- und Außenblätter (Abbildung 8).

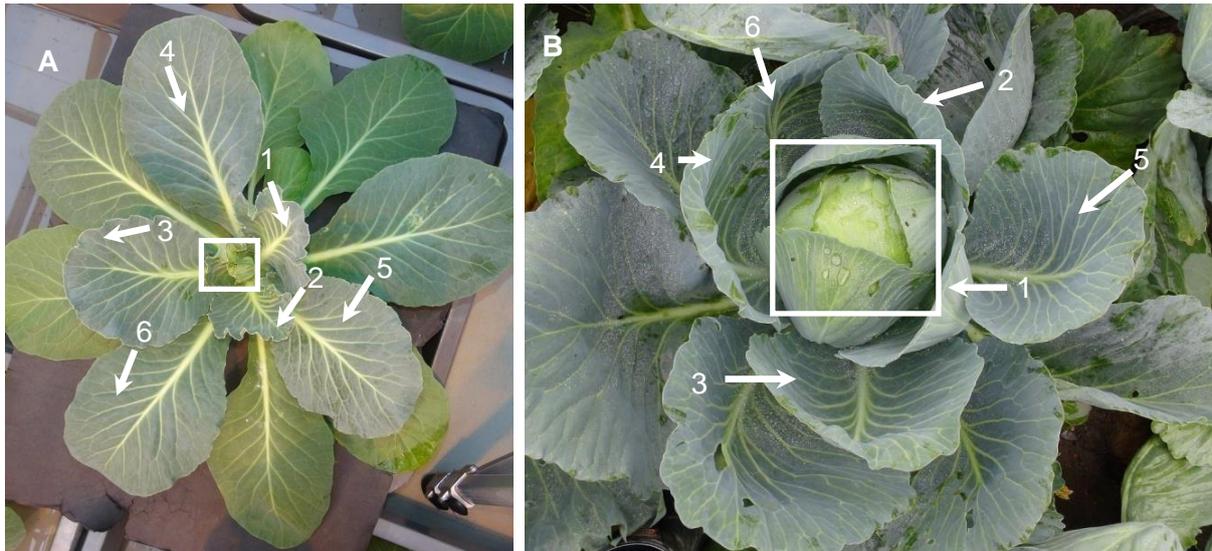


Abbildung 8: Schematische Darstellung der vertikalen Zonierung von (A) Weißkohlpflanzen mit Herz und (B) Kopf. Herz- bzw. Kopfbereich sind durch ein weißes Viereck hervorgehoben. Die sechs Umblätter sind durch Pfeile und Zahlen hervorgehoben. Die Blätter unter den Umblättern wurden als Außenblätter definiert

Als Herzblätter wurde die vertikale Zone definiert, die Herz- bzw. Kopfblätter der Weißkohlpflanze enthielt (Abbildung 8; Tabelle 20). Vor der Kopfbildung wurden die senkrechtwachsenden Blätter als Herzblätter benannt. Die Kopfbildung bei kopfbildendem Blattgemüse fängt nach Feller et al. (1995) an, wenn die zwei jüngsten Blätter, die auch als Herzblätter bezeichnet werden, sich nicht mehr entfalten. Als Umblätter wurde eine Zone bezeichnet, die aus sechs um das Herz bzw. den Kopf umliegenden Blättern bestand. Die Blätter unter der Umblätterzone wurden als Außenblätter bezeichnet (Abbildung 8; Tabelle 20).

Tabelle 20: Definitionen der vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze

Zonenbezeichnung	Definition der Zone
Herzblätter=Herzbereich=Herz	Herz- bzw. Kopfblätter
Umblätter=Umblattbereich=Umblatt	sechs um das Herz bzw. den Kopf herum liegende Blätter
Außenblätter=Außenblätterbereich=Außenblatt	unter den Umblättern liegender Blattbereich

Des Weiteren wurden Daten zur Blattseiten-Präferenz erhoben. Es wurde untersucht, ob das Schadinsekt die Blattunterseite oder die Blattoberseite priorisiert. Die Definitionen zur Blattober- und Blattunterseite sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Von den 800 Weißkohlpflanzen auf der Fläche in Braunschweig bzw. 2500 Weißkohlpflanzen auf der Fläche in Hötzum wurden, wie nach Forster (1997) empfohlen, pro Fläche 50 Weißkohlpflanzen, die auch als 50-iger Stichprobe bezeichnet wurden, auf das Vorkommen der Mehligen Kohlblattlaus auf den drei Zonen (Abbildung 8; Tabelle 20) sowie den zwei Blattseiten durch Auszählen erfasst (Tabelle 16). Pro Feld wurden, wie nach Hommes (1987) und Forster et al. (1992) empfohlen, zehn Kontrollpunkte mit je fünf Pflanzen pro Hektar auf das Vorkommen der Mehligen Kohlblattlaus wöchentlich bonitiert. Aus Gründen der Effektivität wurden die fünf Pflanzen nicht zufällig im Plot verteilt, sondern folgten aufeinander. Die zehn Kontrollpunkte mit je fünf Stichproben waren über das

gesamte Weißkohlfeld in der zweiten und dritten Reihe des Beetes verteilt (Abbildung 9). Um Randeffekte auszuschließen, waren Pflanzen in der ersten und vierten Reihe sowie die ersten und letzten fünf Pflanzen der zweiten und dritten Reihe eines Beets vom Bonitieren ausgeschlossen. Zu jedem Boniturtermin wurde das BBCH-Stadium der Weißkohlpflanzen nach Meier (1997) erfasst. Die Bestimmung der Mehlig Kohlblattlaus auf dem Feld erfolgte nach Dubnik (1991).

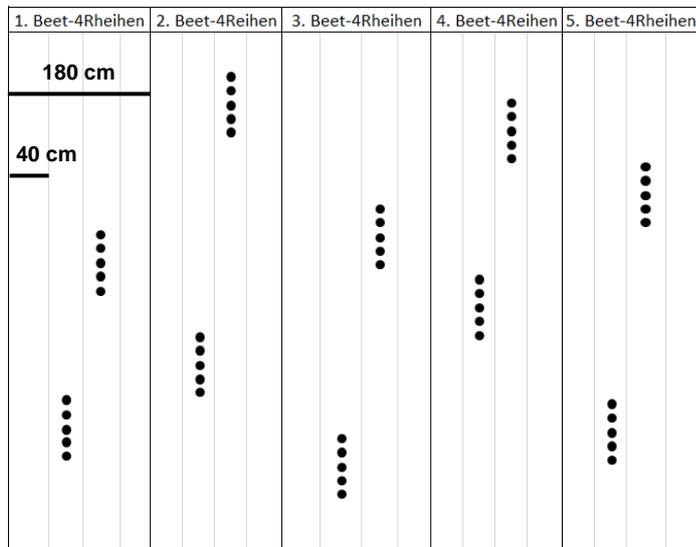


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Verteilung der 10 Kontrollpunkte an den zwei Versuchsflächen mit je 5 Stichproben (jede Stichprobe ist durch einen schwarzen Punkt markiert). Die Beetsbreite betrug 180 cm, Reihenbreite 40 cm

2.4.3 Schadschmetterlinge

Für die automatisierte Erfassung von Schadschmetterlingen wurden zwei optoelektronische Systemgruppen überprüft (Abbildung 10). Die eine Systemgruppe basiert auf der Erfassung von Larven von Schadschmetterlingen auf einer Pflanze und die andere Gruppe auf der Erfassung von adulten Schadschmetterlingen im Pflanzenbestand. Um die optoelektronischen Systeme bewerten zu können, wurde im Zeitraum vom 21.05.2013 bis 12.10.2015 der Arbeitsbereich zur Erfassung von Schadschmetterlingen im Feldbestand charakterisiert. Eine der Hauptfragen war die Verteilung von Larven der Schadschmetterlinge auf einer Wirtspflanze im Bestand. Der andere Untersuchungsfokus lag auf der Datenerhebung zur Flugaktivität von bestimmten adulten Schadschmetterlingsarten. Je nachdem, welches Insektenstadium im Fokus der Untersuchung stand, unterschied sich der Versuchsaufbau.

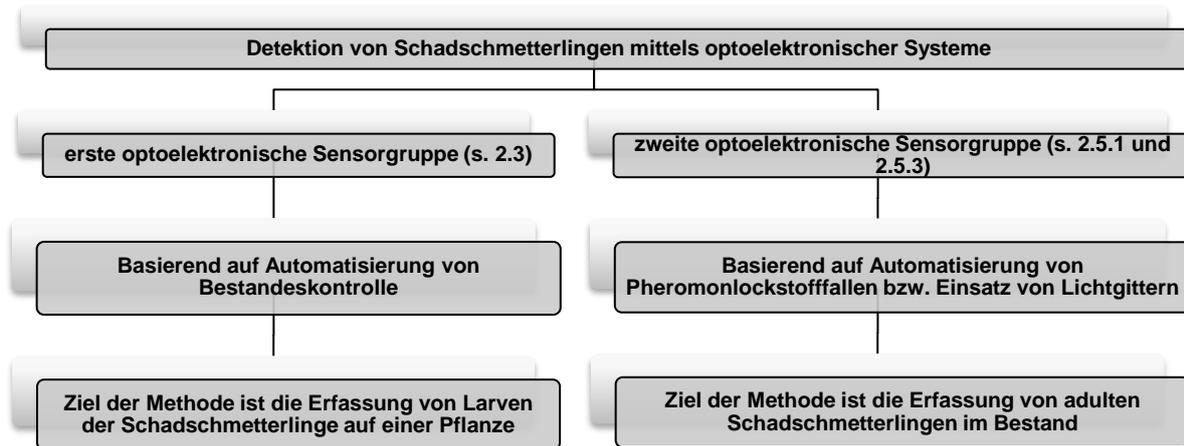


Abbildung 10: Übersicht der untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung von Schadschmetterlingen

2.4.3.1 Untersuchungen zur Verteilung der Larven von Schadschmetterlingen auf einer Pflanze

Kohleule, Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Großer Kohlweißling, Gammaeule und Kohlzünsler sind bedeutende Schadschmetterlinge im Weißkohlanbau in Deutschland (s. 1.1.1). Um das Potential und Eignung der Sensoren bzw. Sensorsysteme zur Erfassung von Larven der Schadschmetterlinge beurteilen zu können, war eines der Ziele im Zeitraum vom 12.05.2014 bis 13.10.2014 sowie vom 11.05.2015 bis 12.10.2015 die Besiedlung der Wirtspflanzen durch Larven der Schadschmetterlinge in einem Weißkohlbestand zu erfassen. Anhand der erhobenen Daten wurde zudem die Flugaktivität der Schadschmetterlinge in Abhängigkeit der Schmetterlingsart im Feld erfasst.

Die Bonitur der Larven von Schadschmetterlingen und der Mehligen Kohlblattlaus erfolgte zur selben Zeit nach demselben Prinzip (s. 2.4.2). Die Fragestellung zur Verteilung der Larven war genau die gleiche wie bei der Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus. Es wurde die Anzahl an Larven auf den vertikalen Zonen Herz-, Umblatt- und Außenblätter (Abbildung 8; Tabelle 20) einer Weißkohlpflanze ausgezählt. Des Weiteren wurde die Larvenanzahl auf der Blattunterseite bzw. Blattoberseite genau wie bei der Mehligen Kohlblattlaus erfasst (Tabelle 16).

Die Bonitur der Pflanzen auf das Vorkommen der Larven von Schadschmetterlingen auf den drei vertikalen Zonen (Abbildung 8; Tabelle 20) sowie die Untersuchungen zur Präferenz einer Blattseite (Tabelle 16) erfolgten wie im Kapitel 2.4.2 beschrieben (Abbildung 9). Die Bonitur erfolgte an zehn Kontrollpunkten mit je fünf Stichproben. Jede in dem Versuchszeitraum vorkommende Larve wurde einer bestimmten Schadschmetterlingsart zugeordnet, so dass die Verteilung der Larven artabhängig erfasst wurde. Die Bestimmung der Larven erfolgte auf dem Feld nach Crüger et al. (2002), Benada et al. (1966) und dem Bestimmungsschlüssel von Kirk (1992).

2.4.3.2 Untersuchungen zur Erfassung der adulten Schadschmetterlinge mittels konventioneller Sexualpheromonfallen

Anhand der Feldversuche, die im Zeitraum vom 21.05.2013 bis 01.10.2015 stattfanden, wurde der Einsatz von Sexualpheromonfallen zur Erfassung von adulten Kohlmotten und Kohleulen im Feld untersucht. Eine der Hauptfragestellungen war, wie die Larvenanzahl einer bestimmten Art im Bestand der Weißkohlpflanzen mit der Anzahl an bestimmten adulten Schadschmetterlingen in den Sexualpheromonfallen im Feld korreliert. Des Weiteren dienten die erhobenen Daten in den konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen von Kohlmotte bzw. Kohleule als Vergleichsparameter für die optoelektronischen Systeme. Unter kontrollierten Bedingungen wurde zudem in dem Zeitraum vom 01.12.2013 bis 19.03.2014 das Verhalten der Kohleule in Zusammenhang mit konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen erfasst.

Sowohl bei den Untersuchungen zur Korrelation zwischen Larven und den adulten Schadschmetterlingen, als auch bei den Vergleichen der konventionellen mit den technisch modifizierten Sexualpheromonfallen, waren die Daten der Flugaktivität der Schadschmetterlinge notwendig. Die Daten zur Flugaktivität der Kohlmotte bzw. Kohleule wurden mittels konventioneller Sexualpheromonfallen (1.1.2) auf zwei Flächen (Hötzum und Braunschweig, s. 2.4.1) erhoben.

Die Sexualpheromonfallen unterscheiden sich je nach Schadschmetterlingsart. Für die Kohlmotte wird die Delta-Sexualpheromonlockstofffalle (Miluch 2010) und für die Kohleule die Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle (Brambila et al. 2014; Muirhead-Thomson 1991) empfohlen und in diesem Versuch verwendet (Abbildung 11). Die Delta-Falle von Andermatt Biocontrol (Schweiz) hatte eine Fläche von 152 cm² (16 x 9,5 cm) und eine Gesamthöhe von 10 cm (Abbildung 11A). Der Dispenserträger mit dem Pheromondispenser wurde an einer Lasche in der Falle befestigt. Auf den Fallenboden wurde ein Leimpapier mit der klebrigen Seite nach oben platziert.

Im europäischen Raum gibt es zwei Trichter-Fallentypen, beide werden zur Erfassung der Flugaktivität der Kohleule im Feld empfohlen, eine von der Firma Andermatt Biocontrol (Schweiz) (Abbildung 11B) und die andere von der Firma Csalomon (Ungarn) (Abbildung 11C). Die Pheromontrichter-Falle der Firma Andermatt Biocontrol hatte eine Bodenfläche von 132,7 cm² (ø 13 cm) und war 22 cm hoch. Der Pheromondispenser wurde in das Körbchen im Fallendach entsprechend der Gebrauchsanweisung gelegt. Die Trichter-Falle der Firma Csalomon hatte eine Bodenfläche von 56,7 cm² (ø 8,5 cm) und eine Gesamthöhe von 23 cm. Der Pheromondispenser wurde durch einen Stopfen an einer Pheromondispenser-Halterungslasche im Fallendach befestigt. Damit die Kohleulen nicht aus der Sexualpheromonlockstofffalle fliehen konnten, wurde in das Gefäß der Falle ein 1 cm langer Streifen eines Ungezieferhalsbands für Hunde Bolfo (Bayer, Deutschland) mit den Wirkstoffen 2-Isopropoxyphenyl und Methylcarbammat gelegt.



Abbildung 11: In den Untersuchungen verwendete Pheromonfallen (A) Delta-Falle (Andermatt Biocontrol, Schweiz), (B) Trichter-Falle (Andermatt Biocontrol, Schweiz), (C) Trichter-Falle (Csalomon, Ungarn)

Je nach Schadschmetterlingsart (Kohlmotte bzw. Kohleule) und Jahr (von 2013 bis 2015) unterschied sich der Versuchsaufbau zur Erfassung der adulten Schadschmetterlinge mittels Sexualpheromonlockstofffallen im Feld. Der Versuchsaufbau an beiden Standorten war identisch. Damit die Pheromone richtig wirken und Männchen einer bestimmten Schadschmetterlingsart angelockt wurden, durfte nur eine bestimmte Anzahl an Pheromonendispensern auf einer Fläche ausgebracht werden. Des Weiteren musste die räumliche Distanz zwischen den artspezifischen als auch artunspezifischen Schadschmetterling-Pheromondispensern eingehalten werden. Es wurden sowohl in den konventionellen (Abbildung 11) als auch in den optoelektronischen Sexualpheromonlockstofffallen Pheromondispenser verwendet. Die optoelektronischen Sexualpheromonfallen werden im Kapitel 2.5 genauer beschrieben. Pro Sexualpheromonlockstofffalle, konventionelle oder optoelektronische, wurde jeweils ein artspezifischer Pheromondispenser mit einem Sexualpheromon platziert. Die Pheromondispenser in den Trichter-, Delta- sowie optoelektronischen Fallen wurden, wie von den Herstellern empfohlen, in fünfwöchigem Abstand gewechselt.

Da sich die Anzahl an verfügbaren optoelektronischen Sexualpheromonfallen je nach Jahr unterschied, wurde die Anzahl an verwendeten konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen je nach Jahr und Versuchsfläche angepasst (Tabelle 21). Beim Versuchsaufbau war wichtig, wie die Pheromondispenser - unabhängig vom Fallentyp - auf einer Fläche verteilt waren. Daher wird in der folgenden Versuchsbeschreibung auf die Verteilung der Pheromonendispenser und somit der Sexualpheromonlockstofffallen allgemein, ohne eine bestimmte Zuordnung zu einem Fallentyp, eingegangen. Die Verteilung der Pheromondispenser wird in Abhängigkeit von der Schadschmetterlingsart dargestellt.

Im Jahr 2013 wurde die Fängigkeit der Sexualpheromonfallen anhand der Tastversuche überprüft. Um die Fängigkeit der Sexualpheromonfallen nicht negativ zu beeinflussen, wird von Andermatt Biocontrol (Schweiz) sowie Csalomon (Ungarn) grundsätzlich empfohlen, pro Hektar und einer Insektenart eine bis zwei Fallen auszubringen. Daher wurden pro Schadschmetterling (Kohlmotte bzw. Kohleule) und Versuchsfläche jeweils zwei Sexualpheromonfallen in Weißkohl- und Rosenkohlkulturen aufgestellt. Alle Pheromonfallen wurden zu Kulturbeginn, wie von der Firma Andermatt Biocontrol empfohlen, auf einer

2. Material und Methoden

Kohlgemüsefläche in einem festen Abstand von etwa 50 cm Höhe über dem Gemüsebestand platziert. Sexualpheromonfallen für dieselbe Schadschmetterlingsart wurden in einer räumlichen Distanz von mindestens 50 m und Sexualpheromonfallen für verschiedene Schadschmetterlingsarten in einer räumlichen Distanz von mindestens 10 m aufgestellt.

Tabelle 21: Im Versuchszeitraum eingesetzte Fallen, Hersteller der verwendeten Pheromondispenser sowie Versuchszeitraum, in dem die jeweiligen Fallen eingesetzt wurden. In der Tabelle wurde zwischen konventionellen Sexualpheromonfallen wie Delta-Falle oder Trichter-Falle sowie optoelektronischer Falle unterschieden. Die optoelektronischen Sexualpheromonfallen werden in dem Kapitel 2.5 beschrieben

Schmetterlingsart	Jahr	Fläche	Pheromonfallenanzahl	Fallentyp	Pheromondispenserhersteller	Versuchszeit
Kohlmotte	2013	Braunschweig	1	Delta-Falle (Abbildung 11A)	Andermatt Biocontrol, Schweiz	21.05 - 31.10
			1	Optoelektronische Falle (s. 2.5.)		21.05 - 31.10
		Hötzum	2	Delta-Falle (Abbildung 11A)		21.05 - 31.10
	2014	Braunschweig	3	Delta-Falle (Abbildung 11A)	Csalomon, Ungarn	02.05 - 17.10
			1	Optoelektronische Falle (s. 2.5.)		02.05 - 17.10
		Hötzum	3	Delta-Falle (Abbildung 11A)		02.05 - 17.10
			1	Optoelektronische Falle (s. 2.5.)		02.05 - 17.10
	2015	Braunschweig	2	Delta-Falle (Abbildung 11A)	Csalomon, Ungarn	06.05 - 19.10
			2	Optoelektronische Falle (s. 2.5.)		06.05 - 19.10
		Hötzum	2	Delta-Falle (Abbildung 11A)		06.05 - 19.10
			2	Optoelektronische Falle (s. 2.5.)		06.05 - 19.10
	Kohleule	2013	Braunschweig	2	Trichter-Falle (Abbildung 11B)	Andermatt Biocontrol, Schweiz
1				Optoelektronische Falle (s. 2.5)	21.05 - 29.07 danach Trichter-Falle	
Hötzum			1	Trichter-Falle (Abbildung 11B)		21.05 - 31.10
2014		Braunschweig	3	Trichter-Falle (Abbildung 11C)	Csalomon, Ungarn	02.05 - 17.10
			1	Optoelektronische Falle (s. 2.5)		01.05 - 16.06 danach Trichter-Falle
		Hötzum	4	Trichter-Falle (Abbildung 11C)		02.05 - 17.10
2015		Braunschweig	3	Trichter-Falle (Abbildung 11C)	Csalomon, Ungarn	06.05 - 19.10
			1	Optoelektronische Falle (s. 2.5)		20.06 - 18.09. davor und danach Trichter-Falle
		Hötzum	4	Trichter-Falle (Abbildung 11C)		06.05 - 19.10

Mittels der Fänge von Sexualpheromonlockstofffallen in 2014 und 2015 wurde der Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der Kohlmotte bzw. der Kohleule und der entsprechenden Larvenanzahl auf den Pflanzen im Bestand überprüft. Des Weiteren dienten die erhobenen Daten als Vergleichsparameter für die optoelektronischen Systeme. Aufgrund der Ergebnisse aus dem Jahr 2013 sowie der persönlichen Beratungen durch Dr. Miklós Tóth (Plant Protection Institute, Centre for Agricultural Research, Budapest, Ungarn) wurde das Versuchsdesign für 2014 und 2015 optimiert (Tabelle 21). Pro Feld und pro Schädling gab es insgesamt zwei Kontrollpunkte, die mindestens 50 m voneinander entfernt lagen

(Abbildung 12). Jeder Kontrollpunkt bestand aus zwei Pheromonfallen für den gleichen Schädling. Die Pheromondispenser zur Überwachung der Kohlmotte bzw. Kohleule waren innerhalb des Kontrollpunkts 15 m voneinander entfernt. Zwischen den Kontrollpunkten der Kohlmotte und der Kohleule lag ein räumlicher Mindestabstand von 30 m. Die Pheromondispenser für die Kohlmotte wurden in einem festen Abstand in etwa 50 cm Höhe über dem Gemüsebestand platziert. Die Pheromondispenser für die Kohleule wurden, wie von Csálon (Ungarn) und Terytze et al. (1987) empfohlen, in einer Höhe von 1,2 m über dem Boden platziert. Die Fallen wurden zweimal in der Woche im Abstand von drei Tagen kontrolliert.



Abbildung 12: Schematische Darstellung der Verteilung der Pheromondispenser von Kohlmotte (schwarzes Viereck) bzw. Kohleule (rotes Viereck) in 2014 und 2015 am Beispiel der Versuchsfläche in Braunschweig. Ein Viereck stellt einen Kontrollpunkt mit zwei Pheromondispensern (Pheromonfallen) unabhängig von dem Typ der Sexualpheromonlockstofffalle dar. Die schwarz gestrichelte Linie stellt die Entfernung zwischen den Pheromondispensern bzw. Kontrollpunkten dar

Alle Kontrollpunkte befanden sich für die gesamte Anbausaison des Kohlgemüses von Kulturbeginn bis zum Kulturende in einer bestimmten Pflanzenart im Feld. Je nach Jahr, Fläche und Schadschmetterlingsart unterschied sich der Standort der Sexualpheromonlockstofffallen und somit auch der Standort der Kontrollpunkte (Tabelle 22). Die Schmetterlinge in den Fallen wurden nach Chinery (2012), Sterry und Mackay (2005) sowie Benada et al. (1966) entweder auf dem Feld oder im Labor mit Hilfe eines Stereomikroskopes Zeiss Stemi 2000-C (Zeiss, Deutschland) mit einer bis zu 15-fachen Vergrößerung bestimmt.

2. Material und Methoden

Tabelle 22: Standort der Kontrollpunkte zur Erfassung der adulten Kohlmotten und Kohleulen in Abhängigkeit von Jahr und Versuchsfläche

Schmetterlingsart	Jahr	Fläche	Kontrollpunkt nummer	Ort des Kontrollpunkts auf dem Feld
Kohlmotte	2013	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Kohlrabibestand im Feld
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Brokkolibestand im Feld
	2014	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Weißkohlbestand in der Kastenanlage
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Rosenkohlbestand im Feld
	2015	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Weißkohlbestand in der Kastenanlage
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Rosenkohlbestand im Feld
Kohleule	2013	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Weißkohlbestand im Feld
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand im Feld
			2	Im Brokkolibestand im Feld
	2014	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand
			2	Am Feldrand in der Hecke mit Kastanienbäumen
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand
			2	Am Feldrand in der Hecke mit Kastanienbäumen
	2015	Braunschweig	1	Im Weißkohlbestand
			2	Am Feldrand in der Hecke mit Kastanienbäumen
		Hötzum	1	Im Weißkohlbestand
			2	Am Feldrand in der Hecke mit Kastanienbäumen

Im Anschluss an die Feldsaison 2013 wurden im Zeitraum vom 01.12.2013 bis 19.03.2014 im Gewächshaus Versuche zum Verhalten der Kohleulen im Zusammenhang mit Trichter-Fallen (Abbildung 11B; Abbildung 11C) untersucht. Des Weiteren wurde die Fängigkeit der Trichter-Fallen von Firma Andermatt Biocontrol (Schweiz) und Firma Csalomon (Ungarn) verglichen. Die Versuche fanden in zwei Gewächshauskabinen statt, die jeweils eine Fläche von 35 m² aufwiesen. In je einer Gewächshauskabine standen auf den Tischen, die eine Gesamtfläche von je 24 m² hatten, jeweils eine Falle mit einem entsprechenden Dispenser und 30 Weißkohlpflanzen. Pro Wiederholung wurden 12 adulte, männliche Kohleulen (Abbildung 2) bei etwa 19 °C und bei 14 h Licht : 10 h Dunkel Tagesrhythmus freigelassen. Es gab insgesamt pro Art der Sexualpheromonlockstofffallen zwei Wiederholungen. Die Verhaltensdokumentation der Schmetterlinge erfolgte mittels eines Camcorders (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus, hierfür wurden die Infrarot-Sperrfilter deaktiviert.

2.4.4 Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye anhand der Eimanschetten in der Anbausaison und im Tagesverlauf

Um den Einsatz der optoelektronischen Systeme (Triangel-Camera-System s. 2.5.2) zu optimieren und bewerten zu können, war das Erfassen der Anzahl der abgelegten Eier der Kleinen Kohlflye innerhalb der Anbausaison und im Tagesverlauf von großer Bedeutung. Im Zeitraum vom 29.04.2013 bis 07.11.2013, vom 07.04.2014 bis 16.10.2014 und vom 13.04.2015 bis 15.10.2015 wurde die Aktivität der Kleinen Kohlflye anhand der Anzahl der abgelegten Eier in den Eimanschetten (Freuler und Fischer 1982) im Brokkolibestand auf zwei Versuchsflächen (Hötzum und Braunschweig s. 2.4.1) erfasst. Eine Eimanschette besteht aus mehreren Filzringen und hat einen Durchmesser von 6 cm, eine Höhe von 2 cm

und eine Länge des äußeren Filzringes von 15 cm (Abbildung 13). Die Filzringe sind ineinander befestigt und werden von der Firma Okado (Schweiz) vertrieben. Die Weibchen der Kleinen Kohlflye legen die Eier entweder in oder auf die Eimanschette. Die Eimanschetten werden zwei Wochen nach dem Auspflanzen am Boden um den Wurzelhals einer Pflanze angebracht und mit einem Klettverschluss befestigt.

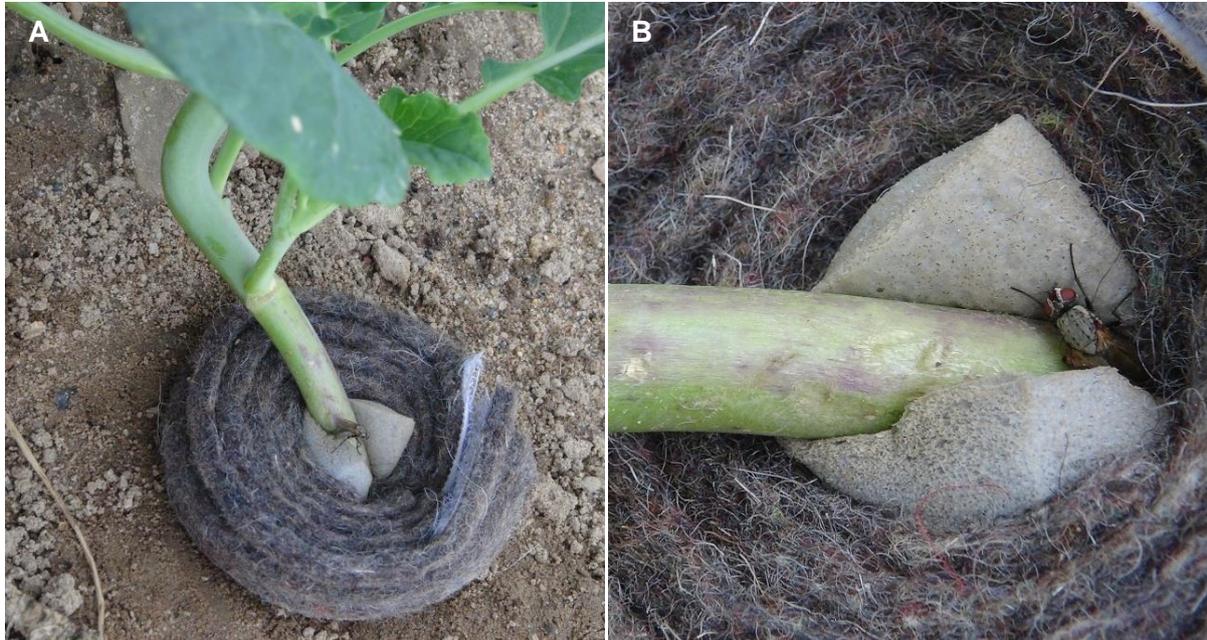


Abbildung 13: Eimanschette (Okado, Schweiz) an einer Brokkolipflanze (A) mit einer Fliege, die einen Platz zur Eiablage sucht und (B) einer Fliege, die zur Eiablage einen Ort gefunden hat

Auf den Versuchsflächen in Braunschweig und Hötzum wurden im Zeitraum von Anfang April bis Ende Oktober in den Jahren 2013, 2014 und 2015 die Daten zur Eiablage der Kleinen Kohlflye erhoben. Diese dienen als Vergleichsparameter für das optoelektronische System (Triangel-Camera-System s. 2.5.2). Hierfür wurden, wie von Hommes (1987) empfohlen, 20 Eimanschetten pro Versuchsfläche an den Brokkolipflanzen angebracht. Des Weiteren wurde von Ester (1993) und von Ouden und Theunissen (1988) darauf hingewiesen, dass die Kleine Kohlflye Pflanzen ohne Eimanschetten bevorzugt, weswegen die Eimanschetten nicht einzeln auf einer Fläche angebracht werden sollten. Zur allgemeinen Überwachung der Eiablage der Kleinen Kohlflye pro Versuchsfläche wurden an insgesamt vier Kontrollpunkten jeweils fünf Eimanschetten an hintereinanderstehenden Pflanzen angebracht (Abbildung 14). Um Randeffekte auszuschließen, wurden an die Pflanzen in der ersten und vierten Reihe sowie an die ersten und letzten fünf Pflanzen der zweiten und dritten Reihe keine Eimanschetten angelegt.

Um repräsentative Werte zu Beginn, Dauer und Ausmaß der Eiablage zu erhalten, wurde die Anzahl an Eiern in den Eimanschetten zweimal in der Woche im Abstand von 3 Tagen (Montag und Donnerstag) erfasst. Nachdem die Eier auf einer Eimanschette ausgezählt und notiert wurden, wurden diese entfernt.

In der gesamten Anbausaison befanden sich Eimanschetten an den Brokkolipflanzen auf beiden Versuchsflächen (Braunschweig und Hötzum). Auf beiden Versuchsflächen wurden Brokkolipflanzen satzweise gepflanzt (Tabelle 9). Die Eiablage der Kleinen Kohlflye kann

nach Hardman und Ellis (1978) sowie Dreves (2007) durch das Pflanzenstadium beeinflusst werden. Daher wurden die Eimanschetten in der Anbausaison vom älteren Brokkolisatz erst dann entfernt und neue Eimanschetten an den jüngeren Satz angebracht, wenn die Anzahl der Eier auf dem jüngeren Satz gleich hoch oder höher war.

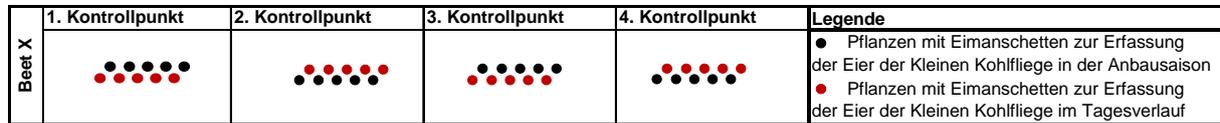


Abbildung 14: Versuchsdesign zur Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison als Vergleichsparameter sowie zur Erfassung des Eiablageverhaltens der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf am Beispiel eines Brokkolisatzes auf einer Versuchsfläche in Braunschweig. Die Pflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison wurden mit schwarzen Punkten, die Pflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf mit roten Punkten dargestellt

2.4.4.1 Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf

In der Anbausaison 2013 und 2014 wurde neben den regelmäßigen Erfassungen der Kleinen Kohlflyeneier, die als Vergleichsparameter für das optoelektronische System (TCS s. 2.5.2) dienten, an vier Terminen im Jahr 2013 (16.07.2013, 22.07.2013, 12.09.2013 und 13.09.2013) sowie an zwei Terminen in 2014 (02.09.2014 und 03.09.2014) in Braunschweig in acht unterschiedlichen Zeitperioden die Anzahl an abgelegten Eiern in den Eimanschetten erfasst (Tabelle 23). Ziel des Versuches war zu überprüfen, ob die Kleine Kohlflye für die Eiablage bestimmte Zeitabschnitte am Tag bevorzugt, um somit die Aktivität des optoelektronischen Systems (TCS s. 2.5.2) zur Erfassung der Kleinen Kohlflye bei der Eiablage auf einen bestimmte Zeitraum zu begrenzen. Laut Zohren (1968) werden die meisten Eier in den ersten Stunden der Hellphase abgelegt, laut Hawkes (1972) hingegen werden die meisten Eier in der Zeit zwischen 16 und 17 Uhr abgelegt.

Hierfür wurden in dem Versuchszeitraum an den sechs Terminen an insgesamt 20 Brokkolipflanzen (vier Kontrollpunkte) Eimanschetten angebracht, die innerhalb des Tagesverlaufs zur bestimmten Zeit kontrolliert wurden (Tabelle 23). Die Brokkolipflanzen mit Eimanschette zur Kontrolle der Eiablage der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf befanden sich unmittelbar neben den Brokkolipflanzen mit Eimanschetten zur regelmäßigen Kontrolle der Eiablage der Kleinen Kohlflye im der Anbausaison (Abbildung 14). Im Jahr 2013 wurde an Pflanzen im dritten, vierten und fünften Satz und im Jahr 2014 an Pflanzen im fünften Satz Eimanschetten angelegt.

Tabelle 23: Übersicht der untersuchten Zeitperioden an den sechs Terminen im Jahr 2013 und 2014 zur Erfassung der Eiablage der Kleinen Kohlflye in Eimanschetten

Zeitperiode	1	2	3	4	5	6	7	8
Aufteilung der Zeitperiode innerhalb der 24 Stunden (Uhr)	20:00 bis 6:00	6:00 bis 8:00	8:00 bis 10:00	10:00 bis 12:00	12:00 bis 14:00	14:00 bis 16:00	16:00 bis 18:00	18:00 bis 20:00
Dauer der Zeitperiode (h)	10	2	2	2	2	2	2	2

2.4.5 Erfassung der Kohldrehherzgallmücke mittels konventioneller Sexualpheromonfallen

Anhand der Feldversuche, die im Zeitraum vom 21.05.2013 bis 01.10.2015 stattfanden, wurde der Einsatz von Sexualpheromonlockstofffallen zur Erfassung von adulten Kohldrehherzgallmücken im Feld untersucht. Die erhobenen Daten in den konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen der Kohldrehherzgallmücke dienten hauptsächlich als Vergleichsparameter für die optoelektronischen Systeme.

Anhand der konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen (1.1.2) wurde die Flugaktivität der männlichen Kohldrehherzgallmücken auf zwei Versuchsflächen (Hötzum und Braunschweig s. 2.4.1) erfasst. Für die Kohldrehherzgallmücke wurde die Tetra-Falle (Sauer und Fährdrich 2010) empfohlen und im Versuch verwendet (Abbildung 15A). Die Tetra-Falle von Andermatt Biocontrol (Schweiz) hat eine Fläche von 225 cm² (22,5 x 10 cm) und eine Gesamthöhe von 13 cm. Der Dispenserträger mit dem Pheromondispenser wurde an einer Lasche in der Falle befestigt. Auf dem Fallenboden wurde ein Leimpapier (16 x 10 cm) mit der klebrigen Seite nach oben platziert.

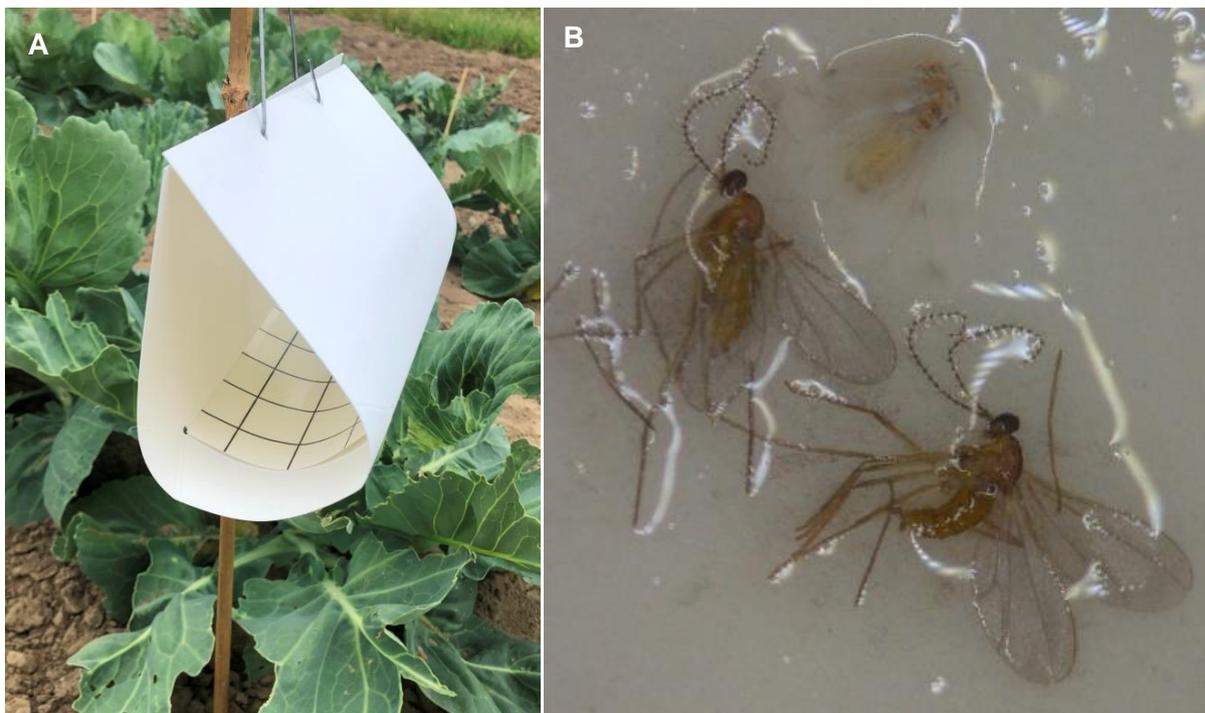


Abbildung 15: (A) Tetra-Falle im Weißkohlbestand sowie (B) 30-fach vergrößerte Kohldrehherzgallmücke auf einem Klebeboden

Es wurden zu Kulturbeginn, wie von der Firma Andermatt Biocontrol (Schweiz) empfohlen, pro Versuchsfläche zwei Pheromonfallen in einem Abstand von etwa 10 cm Höhe über dem Gemüsebestand platziert. Die Sexualpheromonfallen für die Kohldrehherzgallmücke wurden in einer räumlichen Distanz von 50 m und in einer räumlichen Distanz von 10 m zu Sexualpheromonfallen der anderen Schadinsektenarten aufgestellt. Die Klebeböden wurden mit Hilfe eines Stereomikroskopes Zeiss Stemi 2000-C (Zeiss, Deutschland) bei einer 15fachen bis 100fachen Vergrößerung und eines Bestimmungsschlüssels nach Eder et al. (2005) innerhalb der Versuchslaufzeit zweimal in der Woche im Abstand von drei Tagen

(Montag und Donnerstag) ausgewertet. Die Pheromondispenser in den Tetra- sowie optoelektronischen Fallen wurden, wie von den Herstellern empfohlen, in einem fünfwöchigen Abstand gewechselt. Des Weiteren wurde im Jahr 2014 und 2015 die Anzahl an geschädigten Brokkolipflanzen sowie geschädigten Weißkohlpflanzen durch Kohldrehherz gallmücken in Hötzum ausgezählt.

2.5 Untersuchungen zur Erfassung der geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge mit optoelektronischen Sensorsystemen

Im Versuchszeitraum vom 21.05.2013 bis 16.12.2015 wurde untersucht, ob adulte geflügelte Schadinsekten von Kohlgemüse mit optoelektronischen Sensorsystemen erfasst werden können und ob die automatisierte Erfassung mit den sechs untersuchten optoelektronischen Sensorsystemen möglich ist (Abbildung 16). Die Versuche fanden mit folgenden Sensorsystemen statt: TrapView, Z-Trap-System, einer technisch modifizierten Sexualpheromonlockstofffalle von der Hochschule Osnabrück, einem Triangel-Camera-System, Lichtschrankensensor-System Infracan 5000 und Optoelektronischer Objekt Scanner (OEOS). Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die fünf folgenden adulten geflügelten Schadinsektenarten: Kohlmotte, Kohleule, Kohldrehherz gallmücke, Kleine Kohlflye und Kleiner Kohlweißling. Je nach optoelektronischer Sensorsystemart fanden die Versuche für bestimmte Schädlingsarten im Feld oder unter kontrollierten Bedingungen statt und je nach Systemart unterschied sich der Versuchsaufbau.

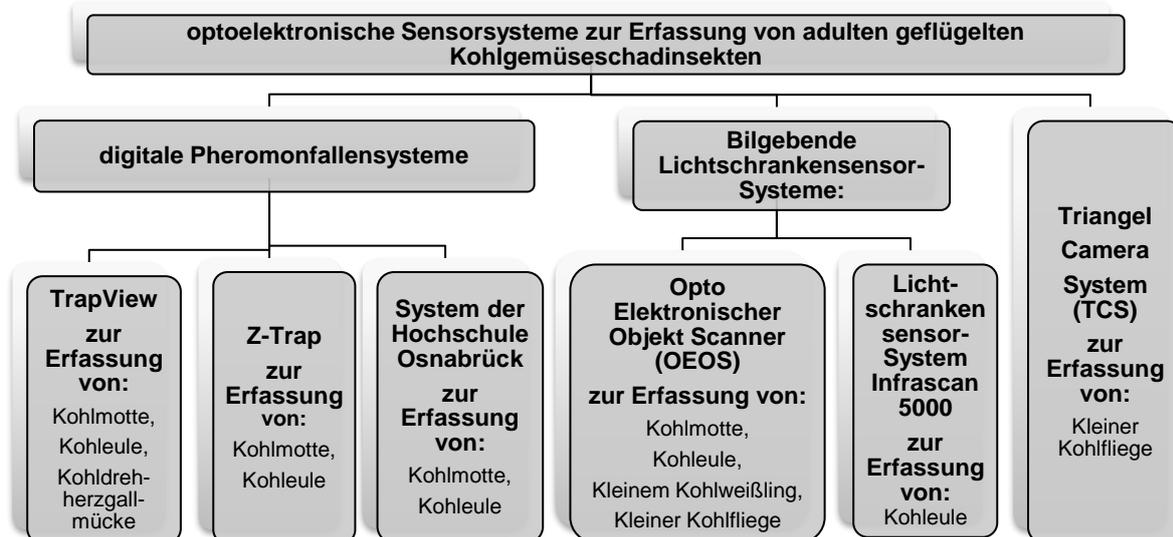


Abbildung 16: Übersicht der untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme aus der zweiten Sensorgruppe, mit denen adulte geflügelte Kohlgemüseschadinsekten erfasst wurden

2.5.1 Untersuchungen zu digitalen Pheromonfallensystemen

In Zeitraum vom 21.05.2013 bis 09.10.2015 wurde untersucht, welche digitalen Pheromonfallensysteme zur automatischen Erfassung von bestimmten geflügelten Schadinsekten geeignet sind. Die getesteten digitalen Sexualpheromonfallensysteme waren TrapView (Efos, Slowenien), Z-Trap-System (Spensa Technologies by DTN, USA) und ein von der Hochschule Osnabrück entwickeltes Pheromonlockstofffallensystem. In zwei Sexualpheromonfallensystemen war die Erfassung von Schadinsekten durch optoelektronische Sensoren (TrapView und Falle der Hochschule Osnabrück) und in einem weiteren Fallen-System durch einen Bioimpedance-Sensor optimiert.

Bei den Versuchen wurde im ersten Schritt überprüft, ob die Fallensysteme im Feld bestimmte Schadinsekten erfassen können. Hierfür wurden die Fallensysteme mit einem Pheromondispenser bestückt und im Feld wie eine konventionelle Sexualpheromonlockstofffalle (s. 2.4.3.2) aufgestellt. Im zweiten Schritt wurde in einem bestimmten Zeitraum getestet, welches Insektenspektrum mit einem der digitalen Fallensysteme erfasst werden kann (Tabelle 24). Im Folgenden werden die digitalen Pheromonfallensysteme sowie der entsprechende Versuchsaufbau beschrieben.

Tabelle 24: Versuchszeiträume, in denen bestimmte Arten der technisch modifizierten Sexualpheromonlockstofffallen zur Erfassung der Schadinsektenarten geprüft wurden

Systemart	Schadinsektenart	Versuchszeitraum	Versuchsbedingungen	Versuchsort	
TrapView	Kohlmotte	16.05.2013 - 01.06.2013 26.08.2013 - 09.10.2015	Im Feld	Braunschweig	
	Kohleule	03.06.2013 - 25.07.2013			
	Kohldrehherz gallmücke	29.07.2013 - 20.08.2013			
Z-Trap-System	Kohleule	01.05.2014 - 16.06.2014 14.04.2015 - 20.04.2015	Im Feld Unter kontrollierten Bedingungen	Braunschweig	
		20.06.2015 - 18.09.2015 20.04.2015 - 24.04.2015	Im Feld Unter kontrollierten Bedingungen		
	Kohlmotte				Hötzum
Technisch modifiziert Falle der Hochschule Osnabrück	Kohleule	03.06.2013 - 29.07.2013	Im Feld	Braunschweig	
	Kohlmotte	30.07.2013 - 26.08.2013			

2.5.1.1 TrapView

TrapView (Efos, Slowenien) ist ein kommerziell verfügbares optoelektronisches Delta-Pheromonfallensystem und wurde laut Hersteller vor den Untersuchungen im Gemüsebau ausschließlich für die automatische Erfassung von Apfelwicklern (*Cydia pomonella* L.) kommerziell verwendet. Im ersten Jahr (2013) wurde untersucht, welche Schadinsektenarten mit dem Sensorsystem erfasst werden können (Tabelle 24). In den Jahren 2014 und 2015 wurde überprüft, ob das Sensorsystem zur automatischen Erfassung speziell der Kohlmotte geeignet war.

TrapView ist ein webbasiertes System, das aus einem Plastikgehäuse (25 x 19,5 x 21 cm), einer elektronischen Einheit (18 x 13 x 3,5 cm) und einer Solarzelle (18 x 13 x 2 cm, 6 V, 333 mA) bestand (Abbildung 17). In dem Plastikgehäuse befanden sich ein Klebeboden (24 x 18 cm) mit einem Pheromondispenser und einer elektronische Einheit mit Akkus (Lithium-Ionen Batterie, 3.7 V/ 220 mAh), ein GSM Modem (Global System for Mobile

2. Material und Methoden

Communications), für das eine funktionsfähige SIM-Karte notwendig war, ein GPS Modul (Global Positioning System), vier 2-Megapixel RGB-Kameras sowie 16 LEDs (light-emitting diode). Die elektronische Einheit befand sich in dem Plastikgehäuse 20 cm oberhalb des Klebebodens. Sie war über ein Kabel mit einer Solarzelle, welche 2 m entfernt vom Plastikgehäuse nach Süden ausgerichtet auf einer Halterung befestigt war, verbunden und wurde damit mit Energie versorgt (Abbildung 17).

Die vier Kameras des optoelektronischen Systems wurden in dem gesamten Versuchszeitraum (vom 16.05.2013 bis 09.10.2015) um 24 Uhr durch die elektronische Einheit nacheinander aktiviert und ausgelöst. Somit wurden pro Zeiteinheit vier Fotos aus dem Inneren der Falle via GSM Funk auf ein Benutzerkonto, welches unter www.trapview.com hinterlegt war, gesendet, in einer Datencloud im Internet gesichert, mit einer Efos-Software verarbeitet und archiviert. Die durch die firmeneigene Software ausgewerteten Fotos wurden, falls notwendig, nachträglich korrigiert. Die Auszählung der markierten Schadinsekten auf den Fotos erfolgte automatisch über die Efos-Software.



Abbildung 17: TrapView in einem Weißkohlfeld (A). TrapView bestand aus einem Plastikgehäuse (PG), Solarzelle (SZ) und einer (B) elektronischen Einheit. Die elektronische Einheit befand sich im Plastikgehäuse. K = Kameras, LED = LED, SK = SIM-Karte

Im Versuchszeitraum vom 16.05.2013 bis 09.10.2013 wurde untersucht, welche der drei Schadinsektenarten (Kohleule, Kohlmotte oder Kohldrehherzgallmücke) mit TrapView erfasst werden konnten (Tabelle 24). Hierfür wurde TrapView zu Versuchszwecken von der Firma Pessl Instruments GmbH (Österreich) gemietet. In der Mitte des Klebebodens wurde ein Pheromondispenser, welcher nur für eine bestimmte Schadinsektenart spezifisch war, platziert. Das optoelektronische System wurde mit einem spezifischen Pheromondispenser für eine bestimmte Zeit (Tabelle 24) in Braunschweig nach dem gleichen Prinzip wie eine konventionelle Pheromonfalle (s. 2.4.3.2 und 2.4.5) aufgestellt. Die Pheromondispenser in TrapView wurden wie in 2.4.3.2 beschrieben gewechselt und kontrolliert.

In den Versuchszeiträumen vom 05.05.2014 bis 10.10.2014 sowie vom 04.05.2015 bis 09.10.2015 wurde untersucht, ob das digitale Delta-Sexualpheromonlockstoffallensystem

zur Erfassung von adulten Kohlmotten verwendet werden kann. Hierfür wurden im Jahr 2014 von der Firma Efos (Slowenien) zwei und im Jahr 2015 insgesamt vier TrapView-Systeme für die Versuche bereitgestellt. Der Versuchsaufbau in den Versuchsjahren 2014 mit zwei und 2015 mit vier TrapView-Systemen ist in Abbildung 18 dargestellt. Die Verteilung der konventionellen sowie technisch modifizierten Fallen in Hötzum glich der Verteilung der Fallen in Braunschweig. Wie bereits in 2.4.3.2 beschrieben, gab es pro Versuchsfläche (s. 2.4.1) zwei Kontrollpunkte, die 50 m voneinander entfernt lagen (Abbildung 12). Innerhalb der Kontrollpunkte waren die Pheromonfallen 15 m voneinander entfernt. Der Pheromondispenserwechsel erfolgte wie in 2.4.3.2 beschrieben und die Fotos aus dem Inneren der TrapView wurden täglich am Computer geprüft. Zusätzlich wurden die digitalen Fallensysteme zusammen mit den konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen zweimal wöchentlich kontrolliert.

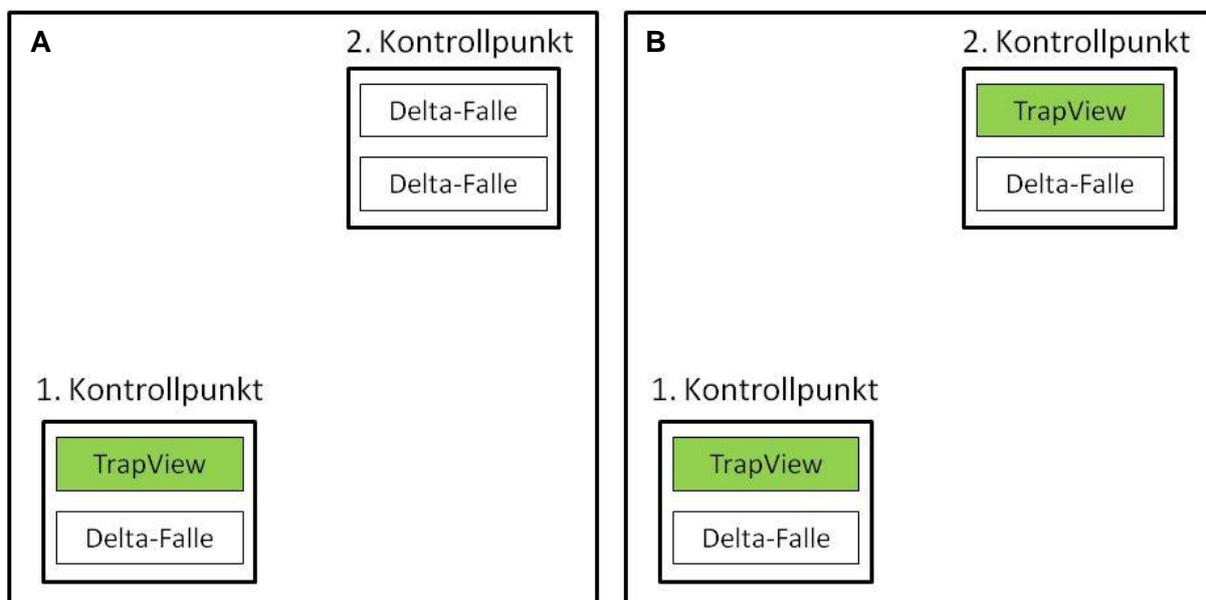


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus auf einer Fläche (A) im Jahr 2014 und (B) 2015

2.5.1.2 Z-Trap-System

Das Z-Trap-System (Spensa Technologies by DTN, USA) ist ein kommerziell verfügbares digitales Sexualpheromonlockstofffallensystem, das von der Firma Spensa Technologies (USA) zur Detektion von Apfelwicklern (*Cydia pomonella* L.) entwickelt wurde. Im Jahr 2014 und 2015 (Tabelle 24) wurde untersucht, ob Kohleulen mit dem System im Feld erfasst werden können. Weiterhin wurde im April 2015 (Tabelle 24) unter kontrollierten Bedingungen überprüft, ob das Sensorsystem zur automatischen Erfassung von Kohlmotte und Kohleule geeignet war.

Das Z-Trap-System ist ein webbasiertes System, das aus einem Gehäuse einer Delta/Trichter-Falle (\varnothing 13 cm, Höhe 27 cm), einer elektronischen Einheit (als Z-Trap von der Firma bezeichnet) (17 x 12 x 8 cm) und einem Basisstation-Notebook der Firma HP Inc. (USA) mit dem Betriebssystem Linux Ubuntu, an den über eine USB-Verbindung (Universal

Serial Bus) ein Funkmodul (11,5 x 9 x 5,5 cm) angeschlossen war, bestand (Abbildung 19). Die elektronische Z-Trap-Einheit bestand aus einer Steuerungseinheit des Systems, Akkus (Lithium-Eisenphosphat Batterien 2 x 3,2 V/12,8 Ah), zwischen 11,5 und 10 cm langen Metallstäben und einer Pheromondispenserhalterung, die sich zwischen den Metallstäben befand. Die elektronische Z-Trap-Einheit war an der Delta-Falle, die wiederum mit einem Trichterbehälter verbunden war, befestigt. In der Steuerungseinheit des Systems war ein Bioimpedance-Sensor integriert. Auf dem Basisstation-Notebook war die firmeneigene Software MyTraps installiert und kontinuierlich mit dem Internet verbunden. Über den Aktivitätszeitplan auf MyTraps und das Funkmodul erfolgte die Systemsteuerung. Die elektronische Z-Trap-Einheit stand über ein Funkmodul mit dem Basisstation-Notebook in Verbindung. Diese durften laut dem Hersteller bei der Signalübertragung nicht weiter als 60 m voneinander entfernt sein.

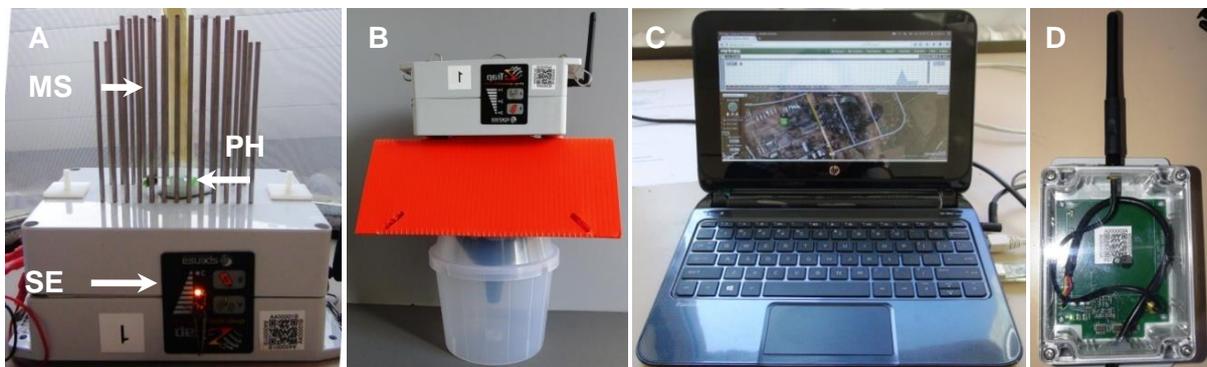


Abbildung 19: Bestandteile des Z-Trap-Systems: (A) Elektronische Z-Trap-Einheit (MS = Metallstäbe; PH = Pheromondispenserhalterung; SE = Steuerungseinheit mit einem Bioimpedance-Sensor), (B) Trichter/Delta-Falle mit elektronischer Z-Trap-Einheit, (C) Basisstation-Notebook der Firma HP Inc. (USA), (D) Funkmodul

Im Zeitraum vom 01.05.2014 bis 16.06.2014 und vom 20.06.2015 bis 18.09.2015 wurde untersucht, ob das Z-Trap-System zur Erfassung von Kohleulen im Feld geeignet ist. Hierfür wurde ein Z-Trap-System der Firma Spensa Technologies by DTN (USA) ausgeliehen. Die elektronische Z-Trap-Einheit wurde mit einem für Kohleulen spezifischen Pheromondispenser bestückt, mit der Trichter-Falle verbunden und auf der Versuchsfläche in Braunschweig nach dem gleichen Prinzip wie eine konventionelle Trichter-Sexuallockstofffalle (s. 2.4.3.2 und 2.4.4) 1,2 m über dem Pflanzenbestand aufgestellt. Das Z-Trap-System war in dem Versuchszeitraum zwischen 19 Uhr und fünf Uhr morgens aktiv und die Daten wurden täglich um neun Uhr an das Basisstation-Notebook übermittelt. Bei einem aktiven System erzeugten Akkus Spannung auf den Metallstäben. Berührte ein Schmetterling die Metallstäbe, wurde dieser hierdurch bewusstlos und es kam zu einem elektrischen Spannungsabfall, der durch die Entladung durch den Bioimpedance-Sensor erfasst wurde. Die Veränderung der elektrischen Spannung an den Metallstäben sowie die Urzeit wurden durch das aktive System erfasst. Die bewusstlosen Schmetterlinge wurden im Z-Trap-Fangkörbchen eingesammelt. Die durch das Z-Trap-System übertragenen Daten in MyTraps wurden täglich mit den Fängen im Gehäuse der konventionellen Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle kontrolliert. Zusätzlich wurden die technisch modifizierten Fallen zusammen mit der konventionellen Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle zweimal

wöchentlich kontrolliert. Die Pheromondispenser im Z-Trap-System wurden wie in 2.4.3.2 beschrieben gewechselt und kontrolliert.

Im April 2015 (Tabelle 24) wurde untersucht, ob das Z-Trap-System die Kohleule bzw. Kohlmotte unter kontrollierten Bedingungen erfassen kann. Da die Basisstation kontinuierlich mit dem Internet verbunden sein musste, wurde der Versuch im Labor mit Internetzugang aufgebaut. Im Gegensatz zu Feldversuchen wurde die elektronische Z-Trap-Einheit andersherum, d.h. mit den Stäben nach oben ohne Trichter-Falle wie in Abbildung 19A in einem Insektenkäfig aus Gaze in Zylinderform (56 cm \varnothing und 51 cm hoch) mit entweder fünf Männchen der Kohleulen oder 15 Männchen der Kohlmotten aus den Zuchten platziert. In der elektronischen Z-Trap-Einheit befand sich entweder ein Pheromondispenser für die Kohleule oder Kohlmotte, je nachdem, welcher Schadschmetterling sich im Insektenkäfig befand. Die Verhaltensdokumentation der Schmetterlinge erfolgte von Montag bis Freitag mittels eines Camcorders (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus mit deaktiviertem Infrarot-Sperrfilter.

2.5.1.3 Digitales Trichter-Sexuallockstoffallensystem der Hochschule Osnabrück

Im Zeitraum vom 03.06.2013 bis 26.08.2013 wurde untersucht, ob ein optoelektronisches Trichter-Sexuallockstoffallensystem der Hochschule Osnabrück (Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Deutschland) zur Erfassung von Kohlmotte und Kohleule im Feld geeignet ist.

Das Fallensystem bestand aus einer Aufbewahrungsbox SAMLA (39 x 28 x 28 cm 22 l, IKEA, Schweden), dem Fallentrichter einer Trichter-Falle (ohne Fangbehälter) und einem trapezförmigen Metallgestell (32 x 20 x 20,5 bzw. 16,5 cm), auf dem sich eine Drehvorrichtung mit einem klebenden Förderband und die Smart-Kamera leanXcam von Firma SCS AG (Schweiz) befand (Abbildung 20). Das klebende Förderband war ein doppelseitiges Klebeband mit einer Breite von 5 cm. Die Smart-Kamera leanXcam (8 x 7,5 x 3 cm) erfasste die Wellenlänge von 380 nm bis 780 nm, hatte eine Auflösung von 752 x 480 Pixel und einen Blackfin-DSP-Prozessor (ADSP-BF537), mit dem die Bilddaten direkt analysiert, ausgewertet und gespeichert werden konnten. Die Software der Kamera konnte über TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) aufgerufen werden. Im Dispenserkorb des Fallentrichters einer Trichter-Falle befand sich ein für eine bestimmte Schadschmetterlingsart spezifischer Pheromondispenser.

Das Prinzip des Fallensystems war, dass ein männlicher Schadschmetterling durch ein Sexualpheromon angelockt wurde, in der Falle durch das Klebeband festgehalten wird und dies anhand der Algorithmen der Smart-Kamera detektiert und gespeichert wird. Im Anschluss sollen die festgehaltenen und detektierten Schadschmetterlinge aus dem Sichtbereich mittels einer Drehvorrichtung entfernt werden. Die Drehvorrichtung hatte zum Zeitpunkt des Versuchs keinen Motor, somit konnte das Klebeband sich nicht automatisch aufrollen.

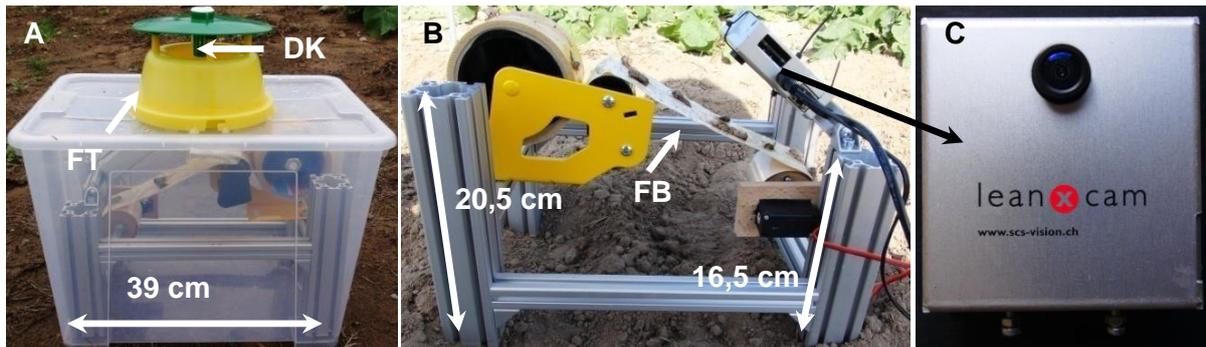


Abbildung 20: Technisch modifizierte Trichterfalle der Hochschule Osnabrück (A) gesamtes System (FT = Fallentrichter; DK = Dispenserkorb), (B) das Innere der Falle (FB = klebendes Förderband) und (C) die Kamera, die bei dem System verwendet wurde

Im Zeitraum vom 03.06.2013 bis 29.07.2013 bzw. 30.07.2013 bis 26.08.2013 wurde untersucht, ob mit der technisch modifizierten Trichter-Falle Kohleulen bzw. Kohlmotten auf der Versuchsfläche in Braunschweig in einem Weißkohlbestand detektiert werden konnten. Hierfür wurden in den Dispenserkorb des Fallentrichters entweder für Kohleulen oder für Kohlmotten spezifische Pheromondispenser platziert und auf dem Boden im Pflanzenbestand abgestellt. Die räumliche Distanz der technisch modifizierten optoelektronischen Falle zu den konventionellen Sexuallockstofffalle (Trichter- und Delta-Falle) ist in 2.4.3.2 beschrieben (Abbildung 12). Die Pheromondispenser der technisch modifizierten Pheromonfalle wurden wie in 2.4.3.2 beschrieben gewechselt und kontrolliert. Die Daten des Systems wurden täglich durch Auslesen der Smart-Kamera leanXcam (SCS AG, Schweiz) Speicherkarte kontrolliert.

2.5.2 Triangel-Camera-System (TCS)

Das Triangel-Camera-System (TCS) wurde in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück (Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Deutschland) zur Detektion der Kleinen Kohlflyge entwickelt. Im Versuchszeitraum vom 03.07.2013 bis 15.10.2015 wurde untersucht, ob die konventionellen Überwachungsmethoden zur Eiablageerfassung der Kleinen Kohlflyge (z. B. Einsatz von Eimanschetten) grundsätzlich digitalisiert werden können. Zunächst wurde im Zeitraum vom 03.07.2013 bis 24.04.2014 untersucht, ob die Kleinen Kohlfiegen bei der Eiablage automatisch durch das TCS erfasst werden können (s. 2.5.2.1). Im zweiten Teil der Untersuchung wurde im Zeitraum von 07.08.2014 bis 15.10.2015 überprüft, welchen Einfluss der TCS-Rahmen auf die Eiablage der Kleinen Kohlflyge hat (s. 2.5.2.2). Je nach Fragestellung unterschied sich der Versuchsaufbau, welcher in den folgenden zwei Kapiteln beschrieben wird.

2.5.2.1 Erfassung der Kleinen Kohlflyge bei der Eiablage mit TCS

Im Zeitraum vom 03.07.2013 bis 24.04.2014 wurde auf der Versuchsfläche in Braunschweig und unter kontrollierten Bedingungen untersucht, ob das TCS zur automatischen Erfassung

der Kleinen Kohlflyge bei der Eiablage geeignet ist. Je nach Jahr unterschieden sich der Versuchsaufbau sowie die TCS-Bestandteile (Tabelle 25) da das System ständig aufgrund der enthaltenen Ergebnisse modifiziert wurde. In beiden Jahren wurde das System über das allgemeine Stromnetz über eine Steckdose mit Energie versorgt.

Tabelle 25: Zusammenfassung der TCS-Bestandteile in Abhängigkeit von Versuchszeitraum und Versuchsbedingungen

Jahr	Versuchszeitraum	TCS-Bestandteile	Programmiersprache	Testbedingungen
2013	03.07 - 31.07	<ul style="list-style-type: none"> • Dreieckförmiger Metall-Rahmen • 3 x Webcams • 1 x USB-Hub • Notebook 	C#	Im Feld
2014	26.02 - 24.04	<ul style="list-style-type: none"> • Dreieckförmige Metall- und Kunststoff-Rahmen • 1 x Webcam • 1 x Raspberry Pi • Minimonitor (7 Zoll) • Tastatur • USB-Hub 	C++	Unter kontrollierten Bedingungen

Im Jahr 2013 bestand das TCS aus einem dreieckförmigen Metall-Rahmen (19,5 x 8 x 0,2 cm), drei Lifecam 1080p Webcams (Microsoft, USA), einem USB-Hub (Abbildung 21) und einem Notebook (Samsung, Südkorea). Für die Verankerung des Systems im Boden waren an jeder Ecke des Metall-Rahmens 8 cm lange Metallstäbe angebracht. Der Metall-Rahmen hatte von außen eine silberne Farbe, innen waren die Seiten gelb gefärbt. Die Ecken des Dreiecks hatten einen Winkel von 60° und in jeder Ecke des Rahmens befanden sich Öffnungen (\varnothing 3,5 cm), in die jeweils eine Webcam platziert wurde. Der dreieckförmige TCS-Rahmen mit den Webcams war so angebracht, dass sich in der Mitte der Stängel einer Brokkolipflanze befand, um die Bewegung einer Kleinen Kohlflyge im bodennahen Bereich zu erfassen.

Die Webcams waren über einen USB-Hub (Universal Serial Bus-Verteiler), welcher sich in einem witterungsfesten Kunststoffgehäuse befand, und über einen USB-Anschluss mit dem Notebook, auf dem die Software OpenCV (Open Computer Vision Library; Intel, USA) mit der Programmiersprache C-Sharp (C#) installiert war, verbunden. Die Webcams-Steuerung wie die Helligkeit, Auflösung und der Fokus-Einstellungen sowie An- und Abmelden der Kameras, Bildauslesung und Bildverarbeitung erfolgten über die OpenCV-Software (Intel, USA) nach dem Anschalten des Systems automatisch. Die Kameraeinstellungen wurden zusätzlich über das Betriebssystemen MS-Windows 8 unterstützt. Die Webcams wurden automatisch der Reihe nach durch das OpenCV-Programm nacheinander im Abstand von drei Sekunden versetzt an- und abgemeldet und das erfasste Frame (Bild) der Kamera ausgelesen, zwischengespeichert im OpenCV und direkt über OpenCV verarbeitet. Bei der Bildverarbeitung durch die Software OpenCV wurde in dem ersten Schritt der Hintergrund und der Pflanzenstängel mit Algorithmen rausgefiltert und ein binäres Bild (schwarz-weiß Bild) generiert. Im nächsten Schritt wurde mit einem weiteren Algorithmus der OpenCV-Software die Plausibilität des Ergebnisses überprüft und bei Detektion einer Kleinen Kohlflyge das Originalbild unter aktuellem Datum und der Uhrzeit auf dem Computer gespeichert.

2. Material und Methoden

Das beschriebene System war nicht witterungsfest und wurde an regenfreien Tagen im Zeitraum vom 10.07.2013 bis 30.07.2013 auf der Versuchsfläche Braunschweig in einem Brokkolibestand getestet. Das System wurde zu einem Zeitpunkt getestet, an dem verstärkt die Eiablage durch die Kleine Kohlflye im Feld stattgefunden hat. Hierfür wurde an einer Pflanze mit der TCS eine Eimanschette (s. 2.4.4) angebracht, um die Eiablage der Kleinen Kohlflye überprüfen zu können. Die TCS wurde so ausgerichtet, dass mit dem System der Stängel oberhalb der Eimanschetten vollständig bildgebend überwacht wurde.

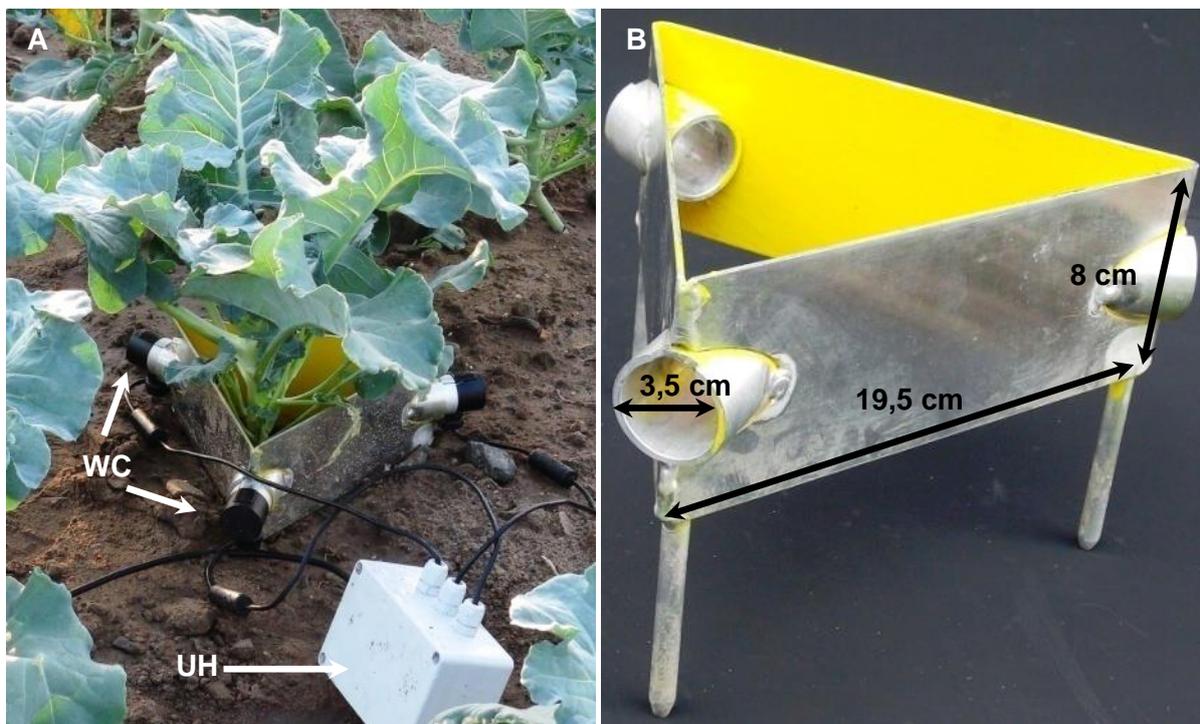


Abbildung 21: TCS (A) aus dem Jahr 2013 im Brokkolibestand in Braunschweig (WC = Webcams; UH = USB-HUB in einer wetterfeste Kunststoffhülle) sowie (B) dreieckförmiger Metall-Rahmen des Systems

Die Steuerung des TCS im Jahr 2013 erfolgte über ein Notebook. Dieses wurde im Jahr 2014 durch ein eingebettetes System, das Raspberry Pi (Version B, 512 MB Speicherplatz; Raspberry Pi Foundation, Großbritannien) mit auf Linux basierte Raspbian als Betriebssystem, ausgetauscht. Raspberry Pi wurde in eine passende wetterfeste Kunststoffhülle platziert, wodurch das TCS kostengünstiger und witterungsfest wurde. Somit bestand das TCS im Jahr 2014 (Abbildung 22; Tabelle 25) aus dem Miniaturcomputer Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Großbritannien), Tastatur (Dell, USA), Minimonitor (7 Zoll, Firma FayTech, China) mit HDMI-Anschluss (High Definition Multimedia Interface), dreieckförmigem Rahmen (19,5 x 8 x 0,2 cm), USB-Hub, einer Webkamera (Lifecam 1080p; Microsoft, USA) und einer SDHC-Karte (16 GB Speicherplatz). Die Webcam war über einen USB-Hub mit Raspberry Pi verbunden und Raspberry Pi war über einen HDMI-Anschluss mit dem Minimonitor und über einen USB-Anschluss mit der Tastatur verbunden. Die OpenCV-Software (Intel, USA) in der Programmiersprache C# aus dem Jahr 2013 wurde in die Programmiersprache C++ kompiliert.

Da das Betriebssystem das auf Linux basierte Raspbian war, wurde die Kameraeinstellungen nicht über das Betriebssystem unterstützt. Daher mussten die HSV-Farbraumgrenzwerte (Tabelle 26) sowie Festlegung des Kamerafokus über Konsolenbefehle

nach Aktivieren des Systems ausgeführt werden. Die Bildverarbeitung funktionierte automatisch wie bei dem System aus dem Jahr 2013 beschrieben. Die Konsolenbefehle für die HSV-Grenzwerte waren:

```
./bin/main Hmax Hmin Smax Smin Vmax Vmin Omax Omin
./bin/main 180 0 78 0 58 0 70 15
```

Die Konsolenbefehle für die Festlegung des Kamerafokus waren:

```
v4l2-ctl -d 0 -c focus_auto=0
v4l2-ctl -d 0 -c focus_absolute=30
```

Tabelle 26: Bedeutung der HSV-Farbraumgrenzwerte sowie der definierte maximale (Max) bzw. minimale (Min) Farbraumbereich und die Pixelzahl eines Objekts bei den Untersuchungen mit der Kleinen Kohlflye

Abkürzung	Bedeutung	Über die Konsole angegebener Max-Wert	Über die Konsole angegebener Min-Wert
H	Farbwert	180	0
S	Farbsättigung	78	0
V	Hellwert	58	0
O	Pixelzahl	70	15

Im Zeitraum vom 26.02.2014 bis 24.04.2014 wurde das TCS aus dem Jahr 2014 (Abbildung 22) unter kontrollierten Bedingungen bei 19 °C und Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) in einer Gewächshauskabine mit 35 m² Fläche an Brokkolipflanzen untersucht. Es gab drei Wiederholungen. Pro Wiederholung wurden 15 Pflanzen auf den Tischen in der Gewächshauskabine verteilt und 120 Kleine Kohlfiegen freigelassen. Das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye an einer Brokkolipflanze wurde zusätzlich zum TCS mit einem Camcorder (Sony HDR-CX730E, Japan) dokumentiert.

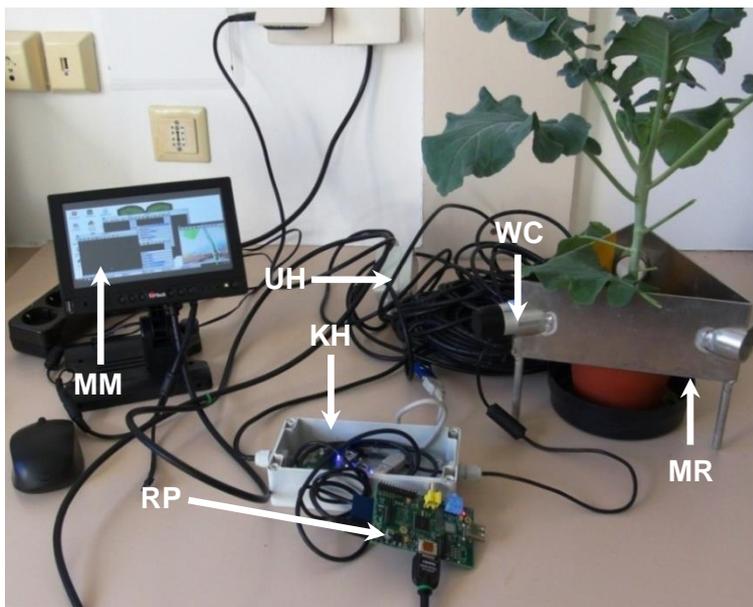


Abbildung 22: TCS aus dem Jahr 2014 (RP = Raspberry Pi; KH = Raspberry Pi wetterfeste Kunststoffhülle; MM = Minimonitor; UH = USB-HUB in einer wetterfesten Kunststoffhülle; WC = Webcam; MR = Metall-Rahmen aus dem Jahr 2013)

2.5.2.2 Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye

Im Zeitraum vom 07.08.2014 bis 23.10.2014 sowie vom 20.04.2015 bis 15.10.2015 wurde auf den Versuchsflächen in Braunschweig und Hötzum in Brokkolibeständen untersucht, ob das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye durch die dreieckförmigen TCS-Rahmen beeinflusst wurde. Laut Košťál und Finch (1996) und Prokopy et al. (1983a) wird die Eiablage der Kleinen Kohlflye durch die visuellen Eigenschaften des Blattes und des Hintergrunds beeinflusst. Die spektralen Eigenschaften eines Objekts können sich unter anderem je nach Materialart und Farbe unterscheiden (Hecht 2018). Daher wurde im Versuch untersucht, ob der TCS-Rahmen (19,5 x 8 x 0,2 cm) an sich oder bestimmte Materialien und bestimmte Farben des TCS-Rahmens einen negativen Einfluss auf die Eiablage der Kleinen Kohlflye haben.

Zusätzlich zum dreieckförmigen Metall-Rahmen des TCS wurden 2014 am Julius Kühn-Institut (Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst) aus 2 mm dicken gelbfarbenen PVC-Blättern 12 Dreiecks-Rahmen erstellt, die dieselben Maße wie das TCS-Metallgestell hatten (Abbildung 21). Hierdurch konnten die Kosten für den TCS-Rahmen von 300 € auf 50 € gesenkt werden. Die Innenwände von allen im Versuch eingesetzten TCS-Rahmen hatten eine gelbe Farbe, da dadurch laut der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen (Hochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, Deutschland) die Kleine Kohlflye mit dem Bildbearbeitungsprogramm der OpenCV-Software am besten auf einem Brokkolistängel detektiert werden konnte. Nach Košťál und Finch (1996) wird ein brauner Hintergrund von der Kleinen Kohlflye bevorzugt, daher wurden insgesamt sechs der Dreiecke von außen mit brauner Farbe besprüht. Somit gab es drei TCS-Rahmenarten: Kunststoff-Rahmen mit gelben Wänden außen, Kunststoff-Rahmen mit braunen Wänden außen und Metall-Rahmen mit silberfarbenen Wänden außen. In 2014 unterschied sich je nach Standort die Anzahl an verfügbaren TCS-Metallrahmen (Tabelle 27).

Tabelle 27: In dem Versuch eingesetzte dreieckförmige TCS-Rahmenarten in Abhängigkeit von Standort und Jahr zur Untersuchung des Einflusses auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye

Jahr	Versuchsstandort	Anzahl an Metall-Rahmen	Anzahl an PVC-Rahmen mit gelber Außenfarbe	Anzahl an PVC-Rahmen mit brauner Außenfarbe	Gesamt Anzahl an TCS-Rahmen
2014	Hötzum	0	3	3	6
	Braunschweig	3	3	3	9
2015	Hötzum	3	3	3	9
	Braunschweig	3	3	3	9

In dem Versuchszeitraum gab es an beiden Versuchsstandorten in beiden Jahren (2014 und 2015) Brokkolipflanzen mit Eimanschetten ohne TCS-Rahmen, an denen die Aktivität der Kleinen Kohlflye durchgehend zweimal in der Woche im Abstand von 3 Tagen erfasst wurde (s. 2.4.4). Diese Pflanzen dienten als Kontrollpflanzen zu den Brokkolipflanzen mit TCS-Rahmen mit Eimanschetten. Die Aktivität der Kleinen Kohlflye an den Brokkolipflanzen mit TCS-Rahmen wurde gleichzeitig ebenfalls mit Eimanschetten zweimal in der Woche (im Abstand von 3 Tagen) erfasst. Die Daten zur Aktivität der Kleinen Kohlflye an den Kontrollbrokkolipflanzen und Brokkolipflanzen mit TCS-Rahmen wurden über die gesamte Anbausaison erhoben. Der Wechsel der Pflanzen von dem älteren Satz in

den jüngeren, das Auszählen der Eier der Kleinen Kohlflye sowie der Wechsel der Eimanschetten und des Brokkolisatzes erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie bei den Kontrollpflanzen (s. 2.4.4).

Pro Versuchsfläche und pro TCS-Rahmenart konnten maximal drei TCS-Rahmen auf einer Versuchsfläche aufgestellt werden. Somit konnten insgesamt pro Versuchsfläche maximal neun TCS-Rahmen aufgestellt werden (Tabelle 27). Es gab insgesamt pro Versuchsfläche vier Kontrollpunkte, an denen die Aktivität der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison erfasst wurde (Abbildung 23; s. 2.4.4). Wie bereits in 2.4.4 beschrieben, bevorzugt die Kleine Kohlflye Pflanzen ohne Eimanschetten. Daher wird empfohlen, in den Kontrollpunkten die Eimanschetten an hintereinanderstehenden Pflanzen anzubringen (Ester 1993; Ouden und Theunissen 1988). Aus diesem Grund wurden jeweils drei TCS-Rahmenarten mit Eimanschetten im Jahr 2014 in Braunschweig und im Jahr 2015 in Braunschweig und Hötzum an die Pflanzen in einem Kontrollpunkt direkt hinter den Pflanzen, an denen die Aktivität der Kleinen Kohlflye während der Anbausaison erfasst wurde, platziert (Abbildung 23). Um auszuschließen, dass die bestimmte Anordnung der TCS-Rahmenarten die Eiablage der Kleinen Kohlflye beeinflusst, unterschied sich die Reihenfolge der TCS-Rahmenarten in den drei Kontrollpunkten (Abbildung 23). Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an verfügbaren TCS-Rahmen in 2014 (Tabelle 27), unterschied sich der Versuchsaufbau in 2014 in Hötzum im Vergleich zum Versuchsaufbau in 2014 in Braunschweig sowie 2015 in Braunschweig und Hötzum (Abbildung 23).

A	1. Kontrollpunkt	2. Kontrollpunkt	3. Kontrollpunkt	4. Kontrollpunkt	Legende
Beet X					<ul style="list-style-type: none"> ● Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison ▲ Metall-Rahmen ▲ PVC-Rahmen mit brauner Außenfarbe ▲ PVC-Rahmen mit gelber Außenfarbe

B	1. Kontrollpunkt	2. Kontrollpunkt	3. Kontrollpunkt	4. Kontrollpunkt	Legende
Beet X					<ul style="list-style-type: none"> ● Eimanschetten zur Erfassung der Eier der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison ▲ PVC-Rahmen mit brauner Außenfarbe ▲ PVC-Rahmen mit gelber Außenfarbe

Abbildung 23: Übersicht über den Versuchsaufbau zum Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye A) in 2014 in Braunschweig sowie in 2015 in Braunschweig und Hötzum und B) in 2014 in Hötzum. Schwarze Kreise stellen Brokkolipflanzen mit Eimanschetten zur Erfassung der Aktivität der Kleinen Kohlflye in der Anbausaison dar. Die TCS-Rahmen sind durch Dreiecke gekennzeichnet. Die drei TCS-Rahmenarten sind durch unterschiedlich gefärbte Dreiecke dargestellt

2.5.3 Bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme

Im Zeitraum von 01.07.2013 bis 16.12.2015 (Tabelle 28) wurden unter kontrollierten Bedingungen zwei bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme (s. 1.2.2), Infrascan 5000 (Sitronik GmbH, Österreich) und Opto Elektronische Objekt Scanner (OEOS; iotec GmbH, Deutschland), zur Erfassung von fliegenden opaken Schadinsekten untersucht. Das Prinzip von Lichtschranken ist in 1.2.2 beschrieben. In beiden Jahren wurden beide Lichtschrankensensor-Systeme über das allgemeine Stromnetz über eine Steckdose mit

2. Material und Methoden

Energie versorgt. Je nach Lichtschrankensensor-System unterschied sich der Versuchsaufbau.

Tabelle 28: Übersicht über die untersuchten Lichtschrankensensor-Systemarten und einige Parameter der Lichtschrankensensor-Systeme nach Kovacheva et al. (2014) sowie der Versuchszeitraum

Lichtschrankensensor-Systemarten	Infrascan 5000 (Sitronik GmbH, Österreich)	OEOS-Prototyp (iotec GmbH, Deutschland)	OEOS (iotec GmbH, Deutschland)
Lichtquelle	Infrarot	Laser	Laser
Strahlenabstand/Auflösung (mm)	2,5	0,064	0,064
Dioden/ Pixelzahl	288 Dioden	1536 Pixel pro 98 mm Messfeld	1536 Pixel pro 98 mm Messfeld
Messrate (Hz)	330	4000	4000
Ausgabemodi	Binär, BCD oder Grauwerte	Binär oder Grauwerte (8 Bit)	LLD, Binär oder Grauwerte (8 Bit)
Software	ScanView (Sitronik GmbH, Österreich)	OEOS (iotec GmbH, Deutschland)	OEOS (iotec GmbH, Deutschland)
Versuchszeitraum	01.07.2013 - 17.07.2013	22.04.2014 - 07.05.2014 25.07.2014 - 05.08.2014	29.10.2015 - 16.12.2015

In 2013 wurde das bildgebende Lichtschrankensensor-System Infrascan 5000 erprobt. Das System bestand aus einer Sendereinheit mit Dioden, die Infrarotlicht zu den Empfangseinheiten aussendeten sowie einem Computer mit ScanView-Software (Sitronik GmbH, Österreich). Vom Infrascan 5000 wird die Anzahl der unterbrochenen Lichtstrahlen gezählt und anhand der ScanView-Software als ein zweidimensionales Bild dargestellt. In dem Versuchszeitraum wurde unter kontrollierten Bedingungen untersucht, ob mit Infrascan 5000 ein binäres Bild der Kohleule erzeugt und somit erfasst werden kann. Hierfür wurde das System unter kontrollierten Bedingungen in einer Klimakammer unter Langtagbedingungen (16 h Licht : 8 h Dunkel) bei 20 °C in einem Insektenanzuchtkäfig (47 x 47 x 60 cm) mit zehn Kohleulen aus der JKI-Zucht (s. 2.2) erprobt.

In 2014 und 2015 wurde ein bildgebendes Lichtschrankensensor-System OEOS-System (Opto Elektronische Objekt Scanner) von der Firma iotec GmbH (Deutschland) ausgeliehen und unter kontrollierten Bedingungen erprobt. Das Lichtschrankensensor-System OEOS wurde in der Versuchszeit von der Firma iotec GmbH entwickelt und optimiert.

In 2014 hatte das Lichtschrankensensor-System ein Labornetzgerät (Voltcraft LSP-1403, Deutschland) für die externe Spannungsversorgung der Sendereinheit (Tabelle 29). Ansonsten bestand das Lichtschrankensensor-System in 2014 und 2015 aus einem Notebook (Samsung, Südkorea) mit den Betriebssystemen Windows 8 und OEOS-Software (iotec GmbH, Deutschland) in der Programmiersprache C#, UA0144B USB 2.0 Ethernet RJ45 Adapter (LogiLink, Taiwan), einer Sendereinheit (iotec GmbH, Deutschland), die ein parallelisierter Linienlaser aus der Laserklasse 1 als Lichtquelle (mit einer Wellenlänge von 650 nm) an eine CCD-Sensorzeile der Empfängereinheit (iotec GmbH, Deutschland) projizierte (Abbildung 24). Nach Angaben des Bundesamtes für Strahlenschutz sind die Laser aus der Klasse 1 bei bestimmungsgemäßigem Gebrauch sicher und dürfen für den privaten Gebrauch in den Verkehr gebracht werden. Das OEOS-System speichert die binären Daten in einem Laser Line Data Format (LLD). Dieses Datenformat wurde speziell für den OEOS-System Sensor entwickelt. Die binären Daten des LLD-Formats wurden für die Auswertung der Daten in binäre Bilder umgewandelt.

Tabelle 29: Übersicht der Bestandteile des optoelektronischen Objekt Scanners (iotec GmbH, Deutschland) in 2014 und 2105

Lichtschrankensensor-Systemeart	OEOS-Prototyp (iotec GmbH, Deutschland)	OEOS (iotec GmbH, Deutschland)
ahr	2014	2015
System-Bestandteile	<ul style="list-style-type: none"> • Labornetzgerät • Sender und Empfängereinheit • Notebook • RJ45 Adapter 	<ul style="list-style-type: none"> • Sender und Empfängereinheit • Notebook • RJ45 Adapter

In dem Versuchszeitraum wurde unter kontrollierten Bedingungen untersucht, ob mit dem OEOS-System die Kohlmotte, die Kohleule, der Kleine Kohlweißling und die Kleine Kohlflye erfasst werden können und somit durch das Lichtschrankensensor-Systeme binäre Bilder (Schattenbilder) von den Schadinsekten erzeugt werden können. Hierfür wurde das OEOS-System in einem Insektenkäfig aus Gaze in Zylinderform (56 cm \varnothing und 51 cm hoch) mit 10 Weibchen und 6 Männchen der Kohleule, 5 Männchen und 5 Weibchen der Kohlmotte, 10 Kleinen Kohlweißlingen bzw. 25 Weibchen der Kleinen Kohlflye gebracht. Sender und Empfänger lagen hierbei 50 cm voneinander entfernt (Abbildung 24). Der Käfig mit dem OEOS-System und den Schadinsekten wurde in einem Raum platziert, welcher nach Bedarf komplett abgedunkelt werden konnte, da Kohleulen nachtaktiv und Kohlmotten tag- und nachtaktiv sind (Sterry und Mackay 2005).

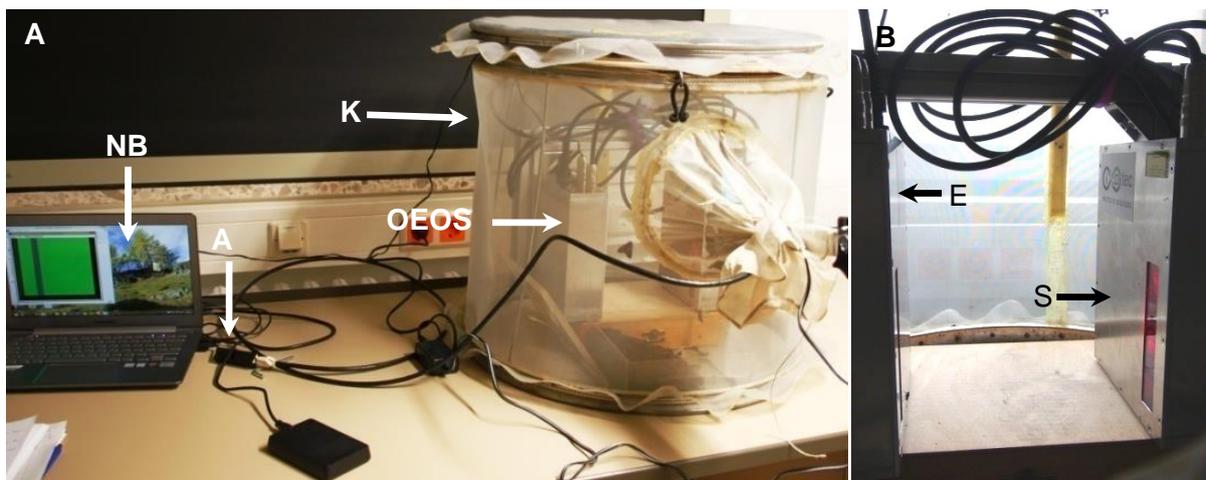


Abbildung 24: (A) Versuchsaufbau mit NB = Notebook (Samsung, Südkorea); A = RJ45 Adapter (LogiLink, Taiwan); K = Insektenkäfig aus Gaze in Zylinderform (56 cm \varnothing und 51 cm hoch) mit Schadinsekten und OEOS (iotec GmbH, Deutschland). Das (B) OEOS (bestand aus einem E = Empfänger als CCD-Zeilensensor und einem S = Laserzeilensensor, der eine parallele Laserlinie aussendet

2.6 Datenauswertung

Die Datenauswertung unterschied sich je nach Datenformat, Zielsetzung und Fragestellung. Es wurden unterschiedliche Programme angewandt, mit denen entweder eine Bildverarbeitung erfolgte oder mit denen die erhobenen Daten statistisch ausgewertet und graphisch dargestellt werden können. Dementsprechend werden diese wie folgt getrennt voneinander dargestellt.

2.6.1 Bildverarbeitung

Im Folgenden wird auf die Auswertung der spektralen 2D-Informationen anhand der Bildverarbeitung eingegangen, die mit optoelektronischen Sensorsystemen aus der ersten Systemgruppe (s. 2.3) erzielt wurden. Die Bildverarbeitungsprozesse der zweiten optoelektronischen Systemgruppe (s. 2.5) wurden, wenn diese bekannt waren, in den entsprechenden Kapiteln zu den jeweiligen Systemen beschrieben.

Die Auswertung der spektralen 2D-Informationen, welche mit optoelektronischen Sensorsystemen aus der ersten Systemgruppe erzielt wurden, waren vor allem notwendig, um die Nutzbarkeit dieser zur automatischen Erfassung von bestimmten Objekten (Insekten bzw. Insektenschäden) bewerten zu können. Daher konzentrierte sich die Bildverarbeitung der Farb- sowie Schwarzbilder, welche mit der Farb-, Graubild- und Infrarotkamera sowie 3D-Kamerasystemen erzeugt wurden, auf konventionelle Verfahren wie Farbraumkonvertierung oder Freistellen. Bei der Farbraumkonvertierung wurde jedem RGB-Wert (Rot-, Grün- und Blauwert) ein grauer Wert zugeordnet, wodurch ein Graubild entstand (Burger und Burge 2006). Im Anschluss wurde anhand der Farbraumkonvertierten-Bilder und Original-Bilder untersucht, ob Zielobjekte (Insekten bzw. Insektenschäden) sich von dem Hintergrund hervorhoben und ob diese durch ein Freistellungsverfahren mittels eines der aufgeführten Softwareprogramme leicht erfasst werden konnten. Die automatischen Softwareverfahren anhand Autoencoder, wie Training von Support Vector Machines (SVM) mit Hilfe von z. B. Bag of Words (Pflanz et al. 2018), wurden in dieser Arbeit außer Acht gelassen, da diese im Versuchszeitraum nicht verbreitet waren. Außerdem reichte die konventionelle Bildverarbeitung aus, um die optoelektronischen Systeme bewerten zu können. Die erzielten Ergebnisse mit Farb- sowie Schwarzweißbildern, welche mit Farb-, Graubild- und Infrarotkameras sowie 3D-Kamerasystemen erzeugt wurden, wurden in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. A. Ruckelshausen aus der Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik der Hochschule Osnabrück sowie Dr. Michael Pflanz des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB-Potsdam) aus der Abteilung Technik im Gartenbau bewertet. Die hierfür verwendeten Bildverarbeitungsprogramme waren ImageJ (Version 1.47s), OpenCV (Version 2.3, Open Computer Vision Library; Intel, USA) und MATLAB (Version 2016b, The Mathworks, Natick, USA).

Die mittels FlourCAM 700MF erfassten Fluoreszenzbilder wurden nach dem kumulativen Ansatz (Bauriegel et al. 2010) durch Dr. Elke Bauriegel des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB-Potsdam) aus der Abteilung Technik im Gartenbau ausgewertet.

2.6.2 Statistische Auswertungen der erhobenen Daten

Alle graphischen Darstellungen sowie statistische Auswertungen der Versuche erfolgten mit dem Statistikprogramm R (R Core Team 2021) Version 4.1.0. Die graphischen Darstellungen wurden mit Hilfe des Pakets ggplot2 (Wickham 2016) erstellt. Bei den statistischen Auswertungen wurde unterschieden zwischen Korrelationsanalysen und Datenanalysen anhand bestimmter statistischer Modelle (z. B. generalisiertes lineares Modell).

Bei allen statistischen Tests wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (Niveau Alpha = 0,05) gewählt und p-Werte kleiner als 0,05 wurden als signifikant bewertet.

2.6.2.1 Korrelationsanalyse

Die Korrelationsanalyse wurde angewandt, um eine Beziehung zwischen zwei Variablen zu untersuchen (Tabelle 30). Bei allen untersuchten Daten wurde davon ausgegangen, dass die Variablen in monotoner Beziehung und nicht proportionaler Beziehung zueinander stehen. Daher wurde zunächst die Beziehung zwischen zwei Variablen, wie durch Köhler et al. (2002) empfohlen, mit Spearman-Rangkorrelation berechnet. Dabei wird angenommen, dass keine Zeitverschiebungen zwischen Variablen vorliegen. Der Rangkorrelationskoeffizient rho kann einen Wert zwischen 1 und -1 annehmen. Wenn rho größer 0 ist, dann liegt eine positive lineare Korrelation vor. Bei rho kleiner 0 handelt es sich um eine negative lineare Korrelation.

Die Spearman-Rangkorrelation wurde angewandt, um mögliche Korrelationen zwischen der Anzahl an überlappten Blättern mit Larvenschäden der Schadschmetterlinge und Befallsdauer unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Des Weiteren wurden mögliche Korrelationen zwischen Raupenanzahl der Kohleulen bzw. Kohlmotten und der entsprechenden Anzahl der adulten Schadschmetterlinge (Kohleule und Kohlmotte) im Feld mittels Spearman-Rangkorrelation berechnet.

Zwei Variablen können in Abhängigkeit von deren Zeitverlauf korrelieren. Die Korrelation zwischen zwei Zeitreihen kann mithilfe der Kreuzkorrelation untersucht werden. Da der Datensatz viele Nullwerte in der Datenreihen hat, wurde dieser durch eine $\log(x+1)$ transformiert. Bei der Kreuzkorrelationsanalyse werden ein Signifikanzwert und Absolutwerte für bestimmte Zeitabschnitte berechnet. Alle Zeitabschnitte, die einen höheren Absolutwert im Vergleich zu Signifikanzwert haben, sind als statistisch signifikant zu bewerten. Je höher der Unterschied zwischen Absolut- und Signifikanzwert ist, desto stärker ist die Korrelation. Die Zeitkorrelation wurde verwendet, um einerseits die Korrelation zwischen der Anzahl an Kohleuleneigelegen mit der Kohleulenanzahl zu untersuchen und andererseits die Beziehung zwischen der Anzahl an Kohleulenlarven und der Kohleulenanzahl zu berechnen.

Tabelle 30: Übersicht zu den verwendeten Variablen, die im Fokus der jeweiligen Korrelationsuntersuchung standen

Erste Variable	Zweite Variable	Statistische Vergleichsmethode
Anzahl überlappter Blätter	Befallsdauer	Spearman Rangkorrelation
Larvenanzahl (Kohlmotte, Kohleule)	Adultenanzahl	Spearman Rangkorrelation
Larvenanzahl bzw. Eigelege (Kohleule)	Kohleulenanzahl	Kreuzkorrelation

2.6.2.2 Angewandte statistischen Modelle und Methoden zur Datenanalyse

Die zur Datenanalyse verwendeten statistischen Modelle sowie Methoden unterschieden sich je nach Fragestellung und je nach verwendeten optoelektronischen Sensorsystemen (Tabelle 31). Für statistische Auswertungen wurden die Pakete *lme4* (Bates et al. 2015), *Matrix* (Bates und Mächler 2021), *MASS* (Venables und Ripley 2002), *MuMIn* (Barton 2020),

lsmmeans (Lenth 2016), *estimability* (Lenth 2018), *glmmADMB* (Bolker et al. 2012), *multcomp* (Hothorn et al. 2008), *blmeco* (Korner-Nievergelt et al. 2015) und *car* (Fox und Weisberg 2019) verwendet. Die relative Qualität der Modelle mit unterschiedlichen unabhängigen Variablen wurde mit den AIC-Werten (Akaike Information Criterion) nach Zuur et al. (2009), Streuungsmaßen (Dispersionsmaß) nach Zuur et al. (2013) (bei GLM.NB und GLM), den marginalen und bedingten R²-Werte, die mit dem Paket *MuMIn* (Barton 2020) berechnet wurden, sowie nach Bedarf nach Bolker et al. (2012) (bei *glmmADMB*), bewertet. Die Varianz der Daten eines Modells wurde mit Modelldiagnostik, wie Plotten von ermittelten und errechneten Werten, sowie Untersuchungen der Residualvarianz überprüft. Wenn signifikante Varianzen zwischen den Standorten bzw. Jahren bestanden, wurden die Daten getrennt und unabhängig voneinander ausgewertet und dargestellt.

Tabelle 31: Übersicht der abhängigen Variablen sowie der unabhängigen Variable, die im Fokus der Untersuchung mit bestimmten statistischen Modellen standen. Je nach Fragestellung wurden die Daten an ein bestimmtes statistisches Modell (lmer = gemischtes Lineares Modellen *glm.nb* = generalisiertes lineares Modell mit der Annahme der negativen Binomialverteilung; *glmmadmb* = generalisiertes lineares gemischtes Modell mit AD-Model Bilder; *glm* = generalisiertes lineares Modell; *lm* = einfaches lineares Modell) angepasst. Signifikante Variantenunterschiede wurden mittels einer bestimmten statistischen Methode ausgewertet

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	Statistisches Modell	Statistische Vergleichsmethode
Fv/Fm-Werte	Insektenart/ Gewebeart	<i>glm</i> (family=binomial)	<i>lsmmeans</i> : Paarweise-Vergleich mit Adjustierung der p-Werte nach Hochberg-Verfahren
Bolometerkamera-Daten (Temperatur)	Insektenart/ Gewebeart	<i>lm</i>	Keine gebraucht
Raupenanzahl	Vertikale Zone Blattseite	<i>lmer</i>	<i>lsmmeans</i> : Paarweise-Vergleich mit Adjustierung der p-Werte nach Hochberg-Verfahren
Blattlausanzahl	Vertikale Zone Blattseite	<i>lmer</i>	<i>lsmmeans</i> : Paarweise-Vergleich mit Adjustierung der p-Werte nach Hochberg-Verfahren
Anzahl abgelegter Kohlfliogeneier	8 Uhrzeitabschnitte	<i>lmer</i>	<i>multcomp</i> : Multiple Mittelwertvergleiche mittels Tukey-Test
Kohlmottenanzahl	Art der Falle (TrapView und Konventionell)	<i>glm.nb</i>	Keine gebraucht
Anzahl der Kohlfliogeneier	Umgebung der Eiablage (Kontrolle und drei Rahmenarten)	<i>glmmADMB</i> (family=binomial, + Nullinflation)	<i>lsmmeans</i> : Paarweise-Vergleich mit Adjustierung der p-Werte nach Hochberg-Verfahren
Anzahl schwarzer Pixel	Insektenart	<i>glm</i> (family = Gamma(link="log"))	<i>lsmmeans</i> : Paarweise-Vergleich mit Adjustierung der p-Werte nach Hochberg-Verfahren

Im Folgenden wird auf die verwendeten statistischen Modelle sowie eingesetzte statistische Methoden in Abhängigkeit von der Versuchsfrage eingegangen.

- Die erhobene Fv/Fm-Werte (s. 2.3.4) mit CFBA wurden zur Bestimmung signifikanter Unterschiede zwischen den Gewebearten (Insekt, Insektenschaden und befallsfrei) untersucht. Hierfür wurde im ersten Schritt ein generalisiertes lineares Modell (GLM) unter der Annahme einer Binomialverteilung erstellt. Die Unterschiede zwischen den Varianten wurde durch paarweisen Vergleich mit dem Paket *lsmmean* (least-square-mean; Lenth 2016) und einer Adjustierung der p-Werte nach Hochberg (Blakesley et al. 2009) ermittelt.
- Die Signifikanzen der Bolometerkamera-Daten zwischen den Pflanzenbereichen mit Schadinsekten und ohne Schadinsekten bzw. zwischen den Pflanzenbereichen mit Gewebeschädigungen und ohne Gewebeschädigungen wurden anhand einfacher

linearer Regression (LM) untersucht. Die Varianzhomogenität der Daten wurde neben Modelldiagnostik mittels leveneTest überprüft.

- Für die Auswertung der Anzahl der Blattläuse bzw. Larven von Schadschmetterlingen in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen (Abbildung 8; Tabelle 20) bzw. in Abhängigkeit der Blattseite wurde zunächst die Datenstruktur vereinheitlicht, so dass sich für die statistische Auswertung ein Wert pro Versuchsfläche, Jahr, Kontrollpunkt und Stichprobennummer ergab. Um statistische Auswertungen bei der Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die Mehlig Kohlblattlaus und für die Larven von Schadschmetterlingen übersichtlich zu gestalten, wurden die nach Meier (1997) erfassten BBCH-Stadien der Weißkohlpflanzen in vier, den BBCH-Stadien entsprechenden, Entwicklungsstufen nach Forster et al. (1992) eingeteilt (Tabelle 32). Bei den statistischen Auswertungen wurden im ersten Schritt mit den Paketen lme4 (Bates et al. 2015) und Matrix (Bates und Mächler 2021) gemischte lineare Modelle (LMER) mit abhängigen und unabhängigen Variablen unter Einbeziehung der zufälligen Effekte wie Stichprobennummer und Kontrollpunktnummer (die Stichprobennummer war im Kontrollpunkt genestet) erstellt. Da in den Datensätzen viele Nullwerte in den Datenreihen vorkamen, wurden die abhängigen Variablen in den gemischten linearen Modellen durch die Funktion $\log(\text{Abhängige Variable} + 1)$ transformiert. Bei den gemischten linearen Modellen (LMER) wurde davon ausgegangen, dass die Daten normalverteilt sind.

Nachdem die gemischten linearen Modelle erstellt wurden, wurden die signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Pflanzenzonen bzw. zwischen den unterschiedlichen Blattseiten durch paarweisen Vergleich mit dem Paket lsmean (Lenth 2016) und einer Adjustierung der p-Werte nach Hochberg (Blakesley et al. 2009) ermittelt.

Tabelle 32: BBCH-Stadien der Weißkohlpflanzen nach Meier (1997) sowie die korrespondierenden Entwicklungsstufen nach Forster et al. (1992)

BBCH -Stadien nach Meier (1997)	Entwicklungsstufen nach Forster et al. (1992)
12-18	1
19-40	2
41-46	3
46-49	4

- Die Ermittlung der signifikanten Unterschiede der Anzahl der Kleinen Kohlfliengeneier zwischen den bestimmten Zeitabschnitten an bestimmten Tagen erfolgte mittels eines gemischten linearen Modells (LMER) mit abhängigen und unabhängigen Variablen unter Einbezug der zufälligen Effekte wie Stichprobennummer und Kontrollpunktnummer (die Stichprobennummer war im Kontrollpunkt genestet). Da in den Datensätzen viele Nullwerte in den Datenreihen vorkamen, wurden die abhängigen Variablen in den gemischten linearen Modellen durch die Funktion $\log(\text{Abhängige Variable} + 1)$ transformiert. Die Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Zeitabschnitten erfolgte durch multiplen Mittelwertvergleich zum Gesamtmittel (multcomp, Hothorn et al. 2008) mit dem Tukey-Test.
- Zur Analyse signifikanter Unterschiede zwischen der Anzahl an Kohlmotten in den konventionellen Delta-Pheromonfallen und der Anzahl an Kohlmotten in der technisch

modifizierten Pheromonfalle TrapView (Efos, Slowenien) wurden die Daten in ein generalisiertes lineares Modell mit der Annahme einer negativen Binomialverteilung eingesetzt und bewertet.

- Zur Analyse signifikanter Unterschiede zwischen der Anzahl der Kleinen Kohlfliogeneier in den Eimanschetten ohne TCS-Rahmen und der Anzahl der Kleinen Kohlfliogeneier in den Eimanschetten mit TCS-Rahmen mit silberner, gelber bzw. brauner Außenfärbung wurden die Daten in ein generalisiertes lineares gemischtes Modell mit AD-Model-Bildern mit der Annahme der negativ Binomialverteilung und Nullinflation eingesetzt. Die Modelle beinhalteten abhängige und unabhängige Variablen unter Einbezug der zufälligen Effekte wie Stichprobennummer und Kontrollpunktnummer (die Stichprobennummer war im Kontrollpunkt genestet). Die Beurteilung der signifikanten Unterschiede erfolgte durch paarweise Vergleiche mit dem Paket lsmear (Lenth 2016) und einer Adjustierung der p-Werte nach Hochberg (Blakesley et al. 2009).
- Um die Daten des OEOS-Systems (iotec GmbH, Deutschland, s. 2.5.3) statistisch analysieren zu können, wurde die Anzahl schwarzer Pixel von jedem erfassten Schadinsekt mittels GIMP (Version 2.10.22; GIMP Development Core Team 2021) ausgezählt. Der Stichprobenumfang unterscheid sich je nach Insektenart (Kohleule n=12; Kleine Kohlflye n=16; Kleiner Kohlweißling n=10; Kohlmotte n=20). Zur Analyse der signifikanten Unterschiede zwischen der schwarzen Pixelanzahl der vier geflügelten Schadinsektenarten wurden die Daten in ein generalisiertes lineares Modell mit der Annahme der Gammaverteilung eingesetzt. Die Beurteilung der signifikanten Unterschiede erfolgte durch paarweise Vergleiche mit dem Paket lsmear (Lenth 2016) und einer Adjustierung der p-Werte nach Hochberg (Blakesley et al. 2009).

3. Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit war zu untersuchen, inwieweit oberirdisch vorkommende Schadinsekten bzw. Insektenschäden durch die ausgewählten optoelektronischen Sensorsystemgruppen erfasst und somit für die praktische Anwendung verwendet werden können. Je nach Sensorsystem variierten die erfassten Parameter (z. B. Pixelanzahl). Um einen gesamten Überblick über die Einsatzmöglichkeiten der 12 untersuchten digitalen Sensorsysteme zu erhalten und diese abschließend evaluieren zu können, werden alle in dem Zusammenhang erzeugten Ergebnisse hier dargestellt.

Im ersten Teil der Ergebnisse wird zunächst auf die Auswertung der Daten der verwendeten optoelektronischen Sensorsysteme aus der ersten Gruppe (s. 2.3), mit denen mobile, ungeflügelte und pflanzenschädigende Insektenstadien sowie durch diese verursachte Schäden direkt auf einer Pflanze erfasst wurden, eingegangen. Als Nächstes werden die Ergebnisse zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs dargestellt, bei dem der flächenbezogene Befall im Fokus der Arbeit lag. Diese Werte dienten auch als Vergleichsparameter für alle optoelektronischen Sensorsysteme. Im Anschluss werden die Ergebnisse von optoelektronischen Sensorsystemen aus der zweiten Gruppe (s. 2.5), mit denen die geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge erfasst wurden, vorgestellt. In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich die p-Werte von den statistisch signifikanten Vergleichen der gemischten Modelle mit einem bedingtem R^2 über 0,1 angegeben. Des Weiteren wiesen die Modelle einen höheren bedingten R^2 -Wert im Vergleich zum marginalen R^2 -Wert auf. Die statistischen Modelle mit einem niedrigen bedingten R^2 (unter 0,1) und höheren marginalen R^2 -Wert (im Vergleich zu bedingten R^2) wurden trotzdem statistisch ausgewertet und sind im Anhang (s. 7.2) zusammen mit den errechneten Signifikanzen der anderen gemischten Modelle aufgeführt.

3.1 Überprüfung optoelektronischer Sensorsysteme zur Detektion der mobilen, oberirdischen, ungeflügelten und pflanzenschädigenden Insektenstadien sowie die durch diese verursachten Schäden direkt auf einer Pflanze unter kontrollierten Bedingungen

Im Fokus der Untersuchungen standen sechs optoelektronische Systeme, die Schadinsekten bzw. durch diese verursachte Schäden mit Hilfe der Spektraleigenschaften (Farbkamera, Graubildkamera, CFBA, Bolometerkamera) und der Rückstreuungseigenschaften (Linienprofilsensor, TOF-Kamera) von Objekten (Pflanzen bzw. Schadinsekten) erfassten. Bei den Schadinsekten handelte es sich um Larven von Schadschmetterlingen sowie ungeflügelte Individuen der Mehligen Kohlblattläuse, die hauptsächlich zu Schäden an Kohlgemüsepflanzen führen. Im folgenden Kapitel wird auf die erzielten Ergebnisse mit der jeweiligen optoelektronischen Systemart eingegangen. Im Anschluss werden die Ergebnisse von den sechs optoelektronischen Sensorsystemen zusammengefasst.

3.1.1 Farbkamera

Für den Einsatz von Farbkameras erfolgten die Versuche zur Erfassung von Kohlmotten- bzw. Kohleulenlarven oder Mehliger Kohlblattlaus sowie der durch diese verursachten Schäden unter kontrollierten Bedingungen. Hierfür wurde die digitale Kompaktkamera PowerShot G2 (Canon, Japan), die Spiegelreflexkamera Olympus-E1 (Olympus, Japan) bzw. der Camcorder HDR-CX730E (Sony, Japan) verwendet. Es wurde zunächst der Kameraaufbau zur Detektion der Schadinsekten bzw. der durch diese verursachten Schäden getestet. Im zweiten Schritt wurde das Vorkommen der Schädlinge auf Weißkohlpflanzen (BBCH-19; Tabelle 11) sowie durch diese verursachten Schäden täglich dokumentiert. Im Anschluss wurden die spektralen Informationen durch die Bildverarbeitung ausgewertet.

Bei den Voruntersuchungen zur Überprüfung des Kameraaufbaus wurden die befallenen Pflanzen mit unterschiedlichen Kamerastellungen und aus unterschiedlichen Höhen erfasst. Unabhängig vom Kameratyp erwiesen sich die Aufnahmen von oben, das heißt aus der Top Shot Perspektive (Tabelle 14), von Vorteil. Bei den Aufnahmen aus der Froschperspektive und Seitliche-Sicht (Tabelle 14) wurde immer ein großer Pflanzenbereich nicht ausreichend ausgeleuchtet und somit nicht erfasst. Weitere Untersuchungen erfolgten aus den oben erwähnten Gründen aus der Top Shot Perspektive. Bei den Untersuchungen zur Höhenposition der Kamera in Relation zum Boden haben sich die Höhen 70 cm und 40 cm als vorteilhaft erwiesen. Bei der Kameraposition in 70 cm Höhe waren alle Blätter einer Weißkohlpflanze auf den digitalen spektralen Informationen gut erkennbar. Jedoch konnten in der Höhe nicht alle Schadinsekten auf einer Pflanze erfasst werden. Um kleinere Schadinsekten wie die Kohlmottenlarven (L3) auf der kamerazugewandten Blattseite digital erfassen zu können, war die Höhenposition von 40 cm förderlich. Damit wurde ein für die Auswertung wichtiger Teilbereich einer Pflanze gezielt erfasst. Die Fotos mit der Höhenposition von 70 cm und 40 cm wurden im Anschluss für die Bildbearbeitung wie Freistellen oder Farbraumkonvertierungen verwendet.

In dem Versuchszeitraum von sechs Wochen innerhalb zweier Wiederholungen wurde das Schadinsektenvorkommen auf den kamerazugewandten Blattseiten anhand Top Shot Perspektive und einer Höhenposition der Farbkamera von 70 cm und 40 cm digital erfasst. Im Versuchsverlauf je Wiederholung blieb die Anzahl an Larven mit insgesamt 25 Kohleulenlarven bzw. 25 Kohlmottenlarven unverändert. Im Gegensatz dazu erhöhte sich die Anzahl an Mehligen Kohlblattläusen. Im Durchschnitt legten große adulte Mehliges Kohlblattläuse bei 20 °C ca. drei Larven innerhalb von 24 Stunden ab. Das bedeutet, dass sich nach sieben Tagen Versuchslaufzeit auf einer Pflanze je eingesetzte Mehliges Kohlblattlaus bis zu 105 neue Mehliges Kohlblattläuse befanden. Sowohl die Schadschmetterlingslarven als auch Mehliges Kohlblattläuse wurden am Anfang des Versuches (am Tag 0 des Versuches) auf die Blattoberseiten platziert. Am ersten Tag des Versuches wurden bei der ersten Wiederholung nur drei und bei der zweiten Wiederholung gar keine Mehliges Kohlblattläuse auf der Blattoberseite vorgefunden (Tabelle 33). Somit befanden sich über 88 % der Mehliges Kohlblattläuse im Herz und auf der Blattunterseite der Weißkohlpflanzen. Pro Tag wurden

insgesamt höchstens 13 Mehliges Kohlblattläuse an zwei Pflanzen (am neunten Versuchstag der ersten Wiederholung) festgestellt.

Zu Beginn des Versuches befanden sich alle Schmetterlingslarven auf der Blattunterseite und konnten nicht mit Farbkameras erfasst werden (Tabelle 33). Mit zunehmender Versuchsdauer nahm der Anteil an Larven auf der Blattoberseite zu. Von den insgesamt ausgebrachten 25 Schadschmetterlingslarven je Art konnten insgesamt höchstens zwei Raupen (8 %) pro Tag auf der Blattoberseite detektiert werden.

Die durch die Insekten verursachten Schäden waren bei Larven bereits am selben Tag nach zwei Stunden und bei Mehliges Kohlblattläusen nach sieben Tagen sichtbar. Bei den Kohlmottenlarven kam es zunächst zum Fensterfraß, dabei bleibt die obere Epidermis des Blattes erhalten. Die älteren Larvenstadien (L4) der Kohlmotten sowie die Kohleulenlarven führten zu Lochfraß (Abbildung 25) oder Skelettierfraß. Durch die Saugaktivität der Blattläuse kam es zu Blattverformungen und Verfärbungen (Abbildung 26). Die digitalen spektralen Informationen von Blattschäden, die durch Insekten verursacht wurden, wurden auch mittels Bildverarbeitungssoftware ausgewertet.

Tabelle 33: Ergebnisse der Untersuchung, wie häufig sich die Mehliges Kohlblattlaus bzw. die Kohlmotten- bzw. Kohleulenlarven auf der Blattoberseite einer Weißkohlpflanze aufhalten. Zudem wurde die Anzahl an Pflanzen, auf denen sich die Insekten auf der Blattoberseite befanden, notiert. Die Anzahl an Mehliges Kohlblattläusen im Pflanzenherz konnte nur destruktiv erfolgen, daher wurden die Daten hierzu nicht erhoben. Es gab zwei Wiederholungen: 1. Wdh. = erste Wiederholung, 2. Wdh. = zweite Wiederholung

Versuchstag	Anzahl Mehliges Kohlblattläuse auf der Blattoberseite (Herzblätter ausgenommen)/ Anzahl Pflanzen		Anzahl Kohlmottenlarven auf der Blattoberseite (Herzblätter ausgenommen)/ Anzahl Pflanzen		Anzahl Kohleulenlarven auf der Blattoberseite (Herzblätter ausgenommen)/ Anzahl Pflanzen	
	1. Wdh.	2. Wdh.	1. Wdh.	2. Wdh.	1. Wdh.	2. Wdh.
1	3/1	0	0	0	0	0
2	3/1	0	0	0	0	0
3	5/1	0	0	0	0	0
4	12/2	0	0	0	0	0
7	12/2	0	1/1	0	1/1	1/1
8	12/2	0	0	0	1/1	2/2
9	13/2	0	0	1/1	1/1	1/1
10	13/2	0	0	0	1/1	0

Die Auswertung der erfassten spektralen 2D-Information von Schadinsekten mittels konventioneller Bildverarbeitung wie Freistellen oder Farbraumkonvertierungen hat ergeben, dass ausschließlich Kohleulenlarven (L5 und L6) auf der Blattoberseite mit einer Kameraposition in 70 cm und 40 cm Höhe detektierbar waren. Die digitalen spektralen 2D-Informationen der Farbkamera mit Kohlmottenlarven sowie der Mehliges Kohlblattlaus auf der Blattoberseite unterschieden sich nicht von den spektralen Informationen der Pflanzen. Dies war der Fall sowohl bei den Farbbildern mit der ganzen Weißkohlpflanze (aus 70 cm Höhe) als auch bei den Farbbildern, die nur auf einen bestimmten Teilbereich der Pflanzen (aus 40 cm Höhe) fokussiert waren. Die spektrale Information der Kohlmottenlarven und der Mehliges Kohlblattlaus war nicht verwertbar, da diese der spektralen Informationen einer Weißkohlpflanze ähnelte (Abbildung 25; Abbildung 26).

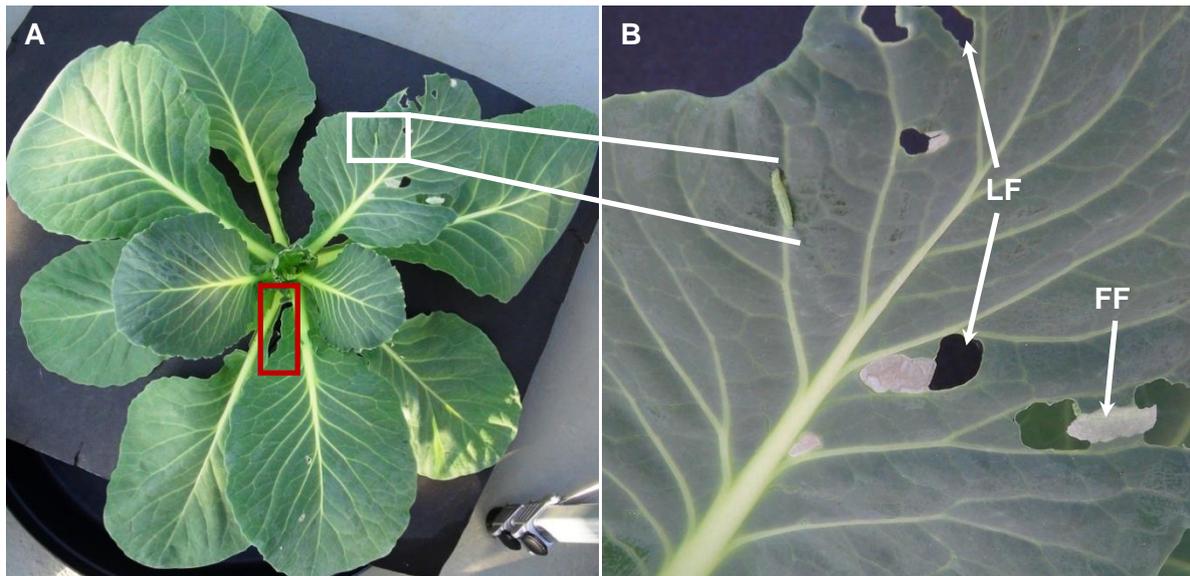


Abbildung 25: Weißkohlplantage mit Kohlmottenlarve auf der Blattoberseite sowie durch diese verursachte Blattschäden (Fensterfraß und Lochfraß). Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet (FF = Fensterfraß, LF = Lochfraß). Im roten Viereck ist exemplarisch eine Stelle zwischen zwei Blättern hervorgehoben, die durch Bildverarbeitung als Larvenfraß ausgewertet wurde

Die durch Schmetterlingslarven verursachten Schäden konnten grundsätzlich mittels der konventionellen Bildbearbeitungsalgorithmen wie Freistellen oder Farbraumkonvertierungen aus der Höhe 70 cm bzw. 40 cm ausgewertet werden. Die Auswertung der spektralen Information von Larvenschäden wurde durch Blattüberlappungen gestört. Lag ein unbeschädigtes Pflanzenblatt unterhalb oder oberhalb des geschädigten Blattes, konnte der Larvenschaden nicht erfasst werden. Die spektrale Information von Larvenschäden konnten nur dann ausgewertet werden, wenn der schwarze Hintergrund durch den Lochfraß sichtbar war. Der Anteil an Blättern mit Fraßschäden, die sich mit einem befallsfreien Blatt überlappt haben, lag zwischen 8 % und 37 % bei Pflanzen mit Kohleulenlarven und zwischen 10 % und 43 % bei Pflanzen mit Kohlmottenlarven. Der Anteil an Blättern mit überlappten Kohleulenschäden korrelierte positiv ($\rho=0,5629293$) signifikant ($p=0,007887$) mit der Befallsdauer. Das bedeutet, dass der Anteil an überlappten Blättern mit Kohleulenlarvenschäden mit der Zeit zunahm. Der Anteil an Blättern mit überlappten Kohlmottenlarvenschäden korrelierte nicht signifikant ($\rho=0,294691$; $p=0,2072$) mit der Befallsdauer. Es konnten dabei keine Korrelation festgestellt werden. Eine weitere Blattüberlappungsart verfälschte die Auswertung: überlappte befallsfreie Blattbereiche am Weißkohlstamm wurden als Larvenschäden eingestuft (Abbildung 25). Anhand der verwendeten Bildverarbeitungsmethode konnte nicht zwischen alten und frischen Schäden differenziert werden. Die Auswertung von senkrechtwachsenden Blättern des Herzbereichs (Abbildung 8; Tabelle 20) war durch die Position der Blätter erschwert, da die Larvenschäden in dem Pflanzenbereich schwer erkennbar waren.

Die spektrale Information der Blattverfärbungen, welche durch die Mehligke Kohlblattlaus verursacht wurden, hatten den gleichen Spektralbereich wie die Adern der Weißkohlplantage und konnten bei keiner der Positionierung des Systems ausgewertet werden. Die Auswertung der spektralen 2D-Informationen von Blattverformungen, welche durch Mehligke Kohlblattläuse verursacht wurden, waren mittels konventioneller Bildbearbeitungsalgorithmen

nicht möglich, da diese den Pflanzen ohne Befall (Abbildung 26; Abbildung 27) stark ähnelten.

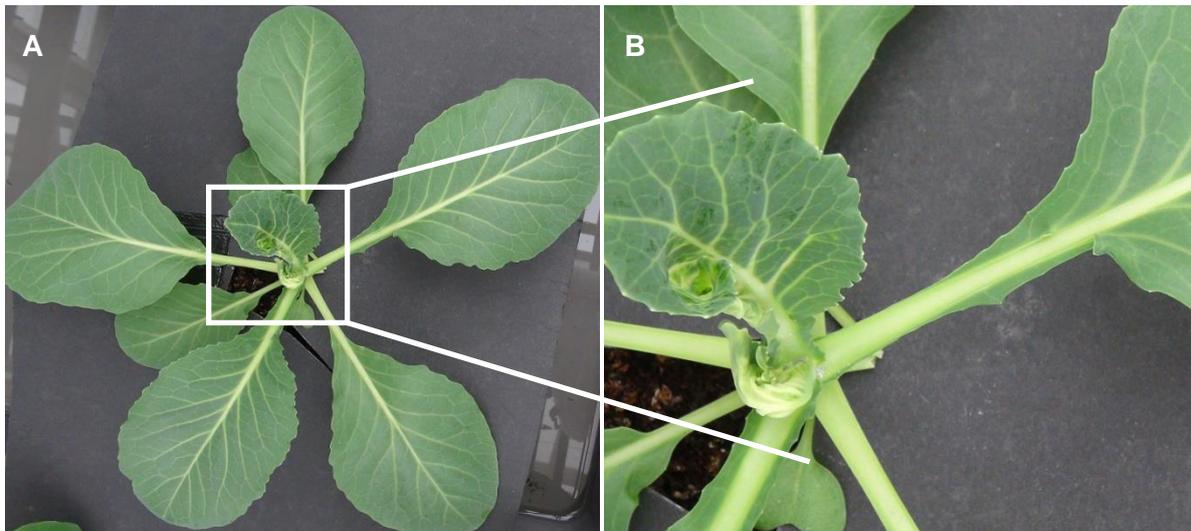


Abbildung 26: Weißkohlpflanze, die durch die Mehligke Kohlblattlaus verursachte Pflanzenschäden aufweist. Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet

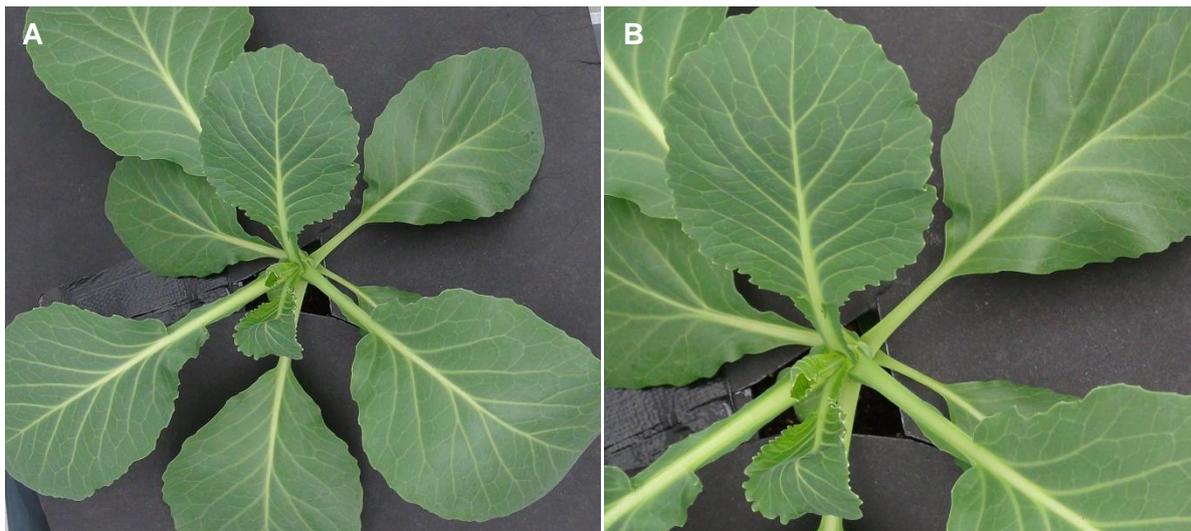


Abbildung 27: Weißkohlpflanze ohne Schadsymptome. Die Kamera war HDR-CX730E (Sony, Japan) und war senkrecht im 90° Winkel zum Boden ausgerichtet in einer Höhe von (A) 70 cm bzw. (B) 40 cm ausgerichtet

3.1.2 Graubildkamera

Hierbei wurde die Eignung einer Graubildkamera am Beispiel der monochromen Matrixkamera HXG20NIR von Baumer (Deutschland) mit einem Objektiv RICOH FL-CC3516-2M (Pentax, Japan) im Zusammenhang mit unterschiedlichen Fremdlichtquellen zur Erfassung von Schadinsekten sowie der durch diese verursachten Schäden geprüft. Die Aufnahmen der ganzen Pflanzen mit einem festen Abstand von 70 cm waren mit dieser Kamera nicht möglich. Die Schärfentiefe reichte nicht aus, um die Pflanzen vollständig scharf auf einem Bild darzustellen. Zur Auswertung wurden ausschließlich Bilder verwendet, bei

3. Ergebnisse

denen die Kamera in einer Höhe von 40 cm senkrecht im 90° Winkel zu dem Beförderungsband ausgerichtet war. Somit wurden die spektralen Informationen von den Teilabschnitten der Pflanze mit Schadinsekten sowie Schadsymptomen bewertet (Abbildung 28; Abbildung 29). Die Kohlmottenlarven hatten eine Größe zwischen 0,6 und 1 cm.

Die spektralen Informationen der Graubildkamera mit emittierter Fremdlichtquelle des sichtbaren roten Wellenbereiches war im Zusammenhang mit der Bildanalyse zur Detektion von Larven auf der Blattoberseite am besten geeignet. Mit der spektralen Information, die mittels der Graubildkamera und zwei anderen Fremdlichtquellen (welche den Halogenlampenbereich und den Nahinfrarot-Bereich emittiert haben) aufgenommen wurde, konnte der Larvenbesatz nicht detektiert werden (Abbildung 28).

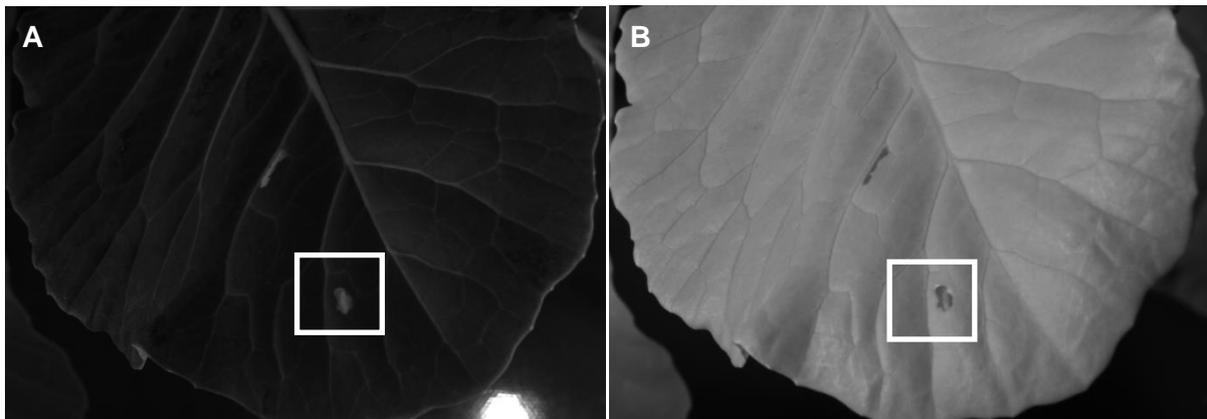


Abbildung 28: Bilder, die mittels Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR; Baumer, Deutschland) und Fremdlichtquelle, die (A) den sichtbaren roten Wellenbereich bzw. (B) Halogenlampenbereich emittierte, erstellt wurden. Die Kamera war in einer Höhe von 40 cm senkrecht im 90° Winkel zum Beförderungsband ausgerichtet. Der Bereich mit Larve ist weiß markiert

Keine der digitalen spektralen Informationen der Graubildkamera mit Fremdlichtquellen konnte zur Erfassung der kleinen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus mit bis zu 15 Individuen verwendet werden. Die spektralen Informationen des Schädlings ähnelten zu sehr denen einer Pflanze, wodurch die Erkennung des Insekts mittels Graubildkamera nicht möglich war (Abbildung 29; Tabelle 34). Die meisten Mehligen Kohlblattläuse befanden sich auf der kameraabgewandten Bereichen wie der Blattunterseite (Tabelle 16) oder im Herzbereich der Pflanzen und konnten nicht erfasst werden.

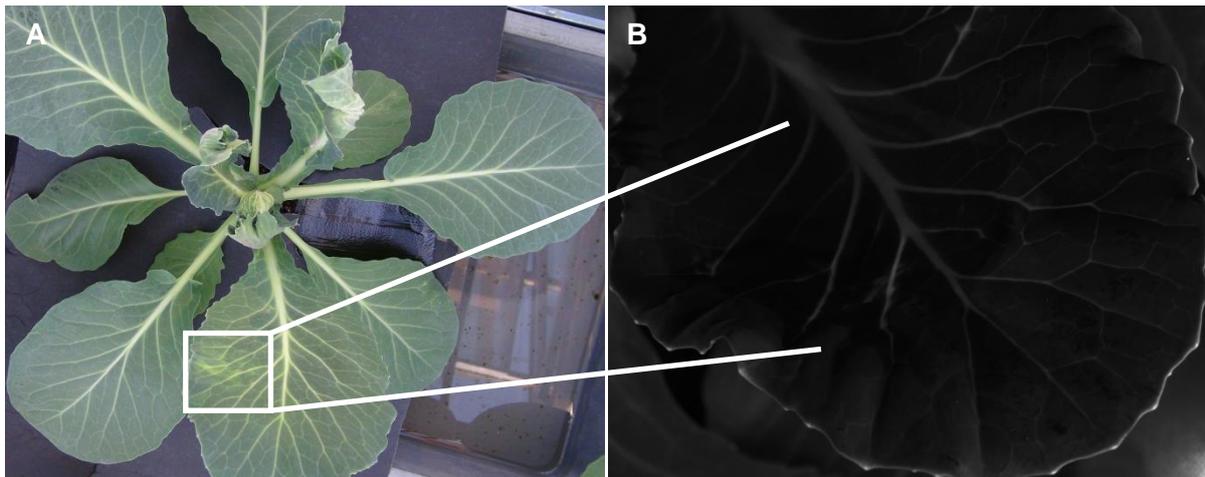


Abbildung 29: Farbbildfoto mit Kamera HDR-CX730E (Sony, Japan) aufgenommen (A) sowie ein Graubild von einem Teilabschnitt der selben Pflanze, der mit der Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR; Baumer, Deutschland) und einer Fremdlichtquelle, die den sichtbaren roten Wellenbereich emittiert hat (B). Beide Bilder zeigen eine Pflanze mit Schäden der Mehlig Kohlblattlaus

Des Weiteren wurde untersucht, inwieweit die unterschiedlichen spektralen Informationen zur Detektion von Insektenschäden genutzt werden können. Die spektralen Informationen der durch Schmetterlingslarven verursachten Schäden waren - wie bei der Farbkamera - durch Blattüberlappungen (s. 3.1.1) gestört. Zur Auswertung mittels konventioneller Bildbearbeitungsalgorithmen der durch Kohlmottenlarven verursachten Schäden eigneten sich am besten die spektralen Informationen, die mit der Graubildkamera und der Fremdlichtquelle, die den roten Wellenlängenbereich und Halogenlampenbereich emittiert haben, aufgenommen wurden.

Die Auswertung der spektralen Information von Schäden, die durch die Mehlig Kohlblattlaus verursacht wurden, war mittels Bildverarbeitung mit keiner der aufgenommenen spektralen Informationen möglich (Abbildung 29; Tabelle 34). Die Erkennung von Schäden war nicht möglich, da die spektralen Informationen des Schädling (Mehlig Kohlblattlaus) denen der Pflanze zu sehr ähnelten.

Tabelle 34: Effekt der Graubildkamera (monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer, Deutschland) mit einem Objektiv RICOH FL-CC3516-2M (Pentax, Japan)) und eines Fremdlichtquellentyps auf die Bildanalyse zur Erkennung von Insekten bzw. durch Schadinsekten verursachte Schäden. (+ = spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. Schäden benutzt werden konnten; - = spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. Schäden nicht verwendet werden konnten; NIR = Nahinfrarotwellenbereich)

Schädlingsart	Fremdlichteinfluss zur Detektion von Schadinsekten			Fremdlichteinfluss zur Detektion von Insektenschäden		
	Sichtbarer roter Wellenbereich (625 nm)	Halogenlampenbereich (780 nm)	NIR (940 nm)	Sichtbarer roter Wellenbereich (625 nm)	Halogenlampenbereich (780 nm)	NIR (940 nm)
Kohlmotten-Larve	+	-	-	+	+	-
Mehlig Kohlblattlaus	-	-	-	-	-	-

3.1.3 Chlorophyllfluoreszenz-basierte Bildanalyse

Die mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) gemessene Grundfluoreszenz (F_0) und maximale Fluoreszenz (F_m) wurde angewandt, um die variable

3. Ergebnisse

Fluoreszenz ($F_v = F_m - F_0$) und den F_v/F_m -Parameter zu berechnen. Hiermit sollten die Schadinsekten (Kohlmottenlarven bzw. Mehliges Kohlblattlaus) sowie durch diese verursachten Schäden auf einer Brokkolipflanze detektiert werden. Da der Umbau des Systems nicht einfach war und die Kamera bei dem Aufbau maximal in einer Höhe von 40 cm platziert werden konnte, konnten ganze Pflanzen ausschließlich von der Seite erfasst werden (Abbildung 30). Genau wie bei dem Versuch mit der Farbkamera (3.1.1) erwies sich dies von Nachteil. Allgemein war die gute Ausleuchtung von Blättern aufgrund der anderen vorhandenen Blätter und die damit verbundene Reduzierung des Aufnahmebereichs schwierig (Abbildung 30). Dadurch war die gezielte gute Ausleuchtung im Blattdickicht erschwert. Die in der Untersuchung erfassten F_v/F_m -Werte, die die Intaktheit des Photosyntheseapparates widerspiegeln, betragen entweder 0 oder 0,8. Die Flächen mit gestörter Photosynthese ergaben einen F_v/F_m -Wert von 0. Bei intakter Photosynthese lag der F_v/F_m -Wert bei 0,8.

Die F_v/F_m -Werte der befallenen Brokkoliblätter unterschieden sich nicht signifikant ($p = 1,000$) von den befallsfreien Kontrollpflanzen bei den Aufnahmen aus der seitlichen Sicht. Die F_v/F_m -Werte der Blätter lagen bei 0,8 (Abbildung 30). Somit konnten anhand der seitlichen Aufnahmen keine Unterschiede zwischen den befallenen und schädlingfreien Brokkoliblättern festgestellt werden.

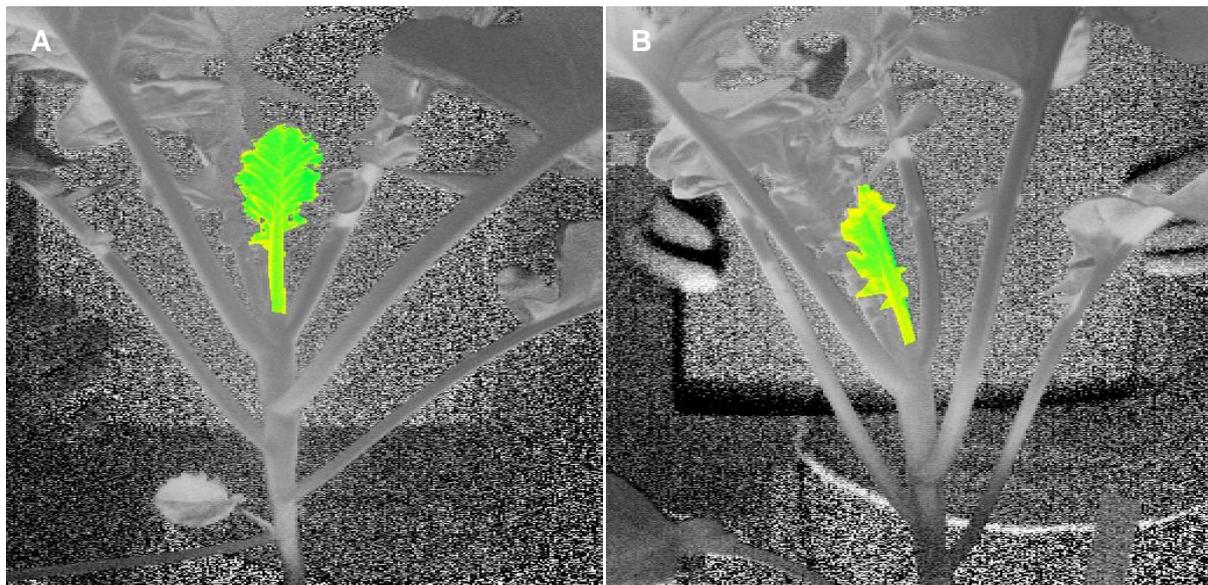


Abbildung 30: Falschfarbenbilder von zwei Brokkolipflanzen (A) ohne Blattlausbefall und (B) mit Blattlausbefall. Die F_v/F_m -Werte von Blättern ohne Blattlausbefall (A) und mit Blattlausbefall (B) auf einer Pflanze wurden nach einer Aufnahme mit FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) und Bildbearbeitung mittels FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) visualisiert. Die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) sind hellgrün und F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) sind gelb dargestellt

Um die Eignung des Systems zur Detektion der Kohlmottenlarven bzw. der Mehliges Kohlblattlaus zu überprüfen, wurden die Blätter von einer Brokkolipflanze abgeschnitten und aufgenommen. Die Ausrichtung der Kamera war senkrecht im 90° Winkel zum Boden. Die Kohlmottenlarven auf den Blättern hatten eine Größe zwischen 0,6 und 1 cm. Die F_v/F_m -Werte der Larven unterschieden sich signifikant ($p < 0,0001$) von den Werten ohne Larven (0,8). Somit konnten mit dem System Larven erfasst werden (Abbildung 31).

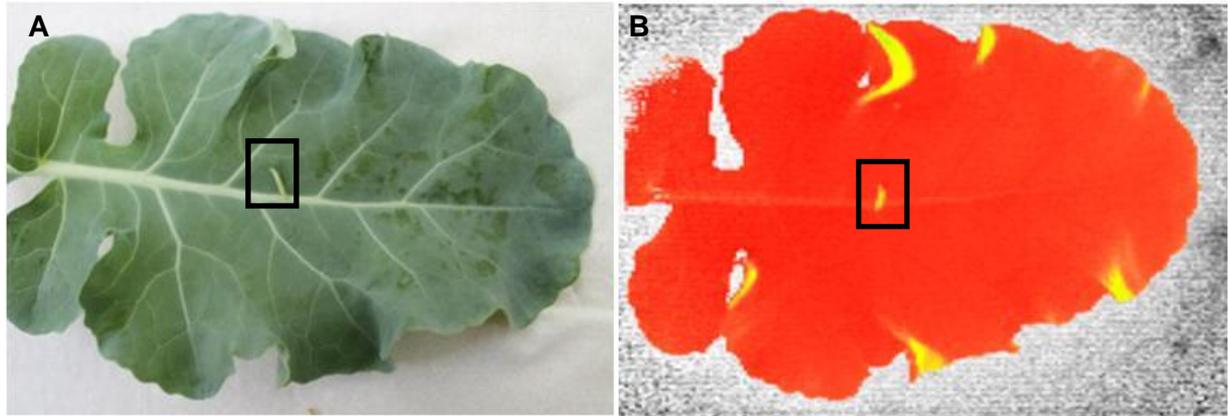


Abbildung 31: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines abgetrennten Brokkoliblattes (A) mit einer Kohlmottenlarve sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Die Larve wurde auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar

Bei der Beurteilung zur Detektion von Mehligen Kohlblattläusen wurde unterschieden zwischen großen und kleinen Kolonien. Kleine Kolonien bestanden aus bis zu 15 Mehligen Kohlblattläusen, große Kolonien wiesen über 200 Individuen auf. Die Mehligen Kohlblattläuse in kleinen Kolonien konnten mit dem modularen System FluorCAM 700MF nicht erfasst werden, denn die F_v/F_m -Werte der kleinen Kolonien unterschieden sich nicht signifikant ($p = 1,000$) von den Bereichen ohne Befall. Die Detektion der großen Kolonien mit über 200 Individuen war mit dem System möglich (Abbildung 32), die F_v/F_m -Werte der Bereiche mit einer Kolonie mit über 200 Individuen (0) unterschieden sich von den Werten ohne Mehligen Kohlblattläusebesatz (0,8) signifikant ($p < 0,0001$).

Die F_v/F_m -Werte zwischen den Larven (0) und großen Kolonien (0) der Mehligen Kohlblattlaus unterschieden sich nicht signifikant ($p = 1,000$).

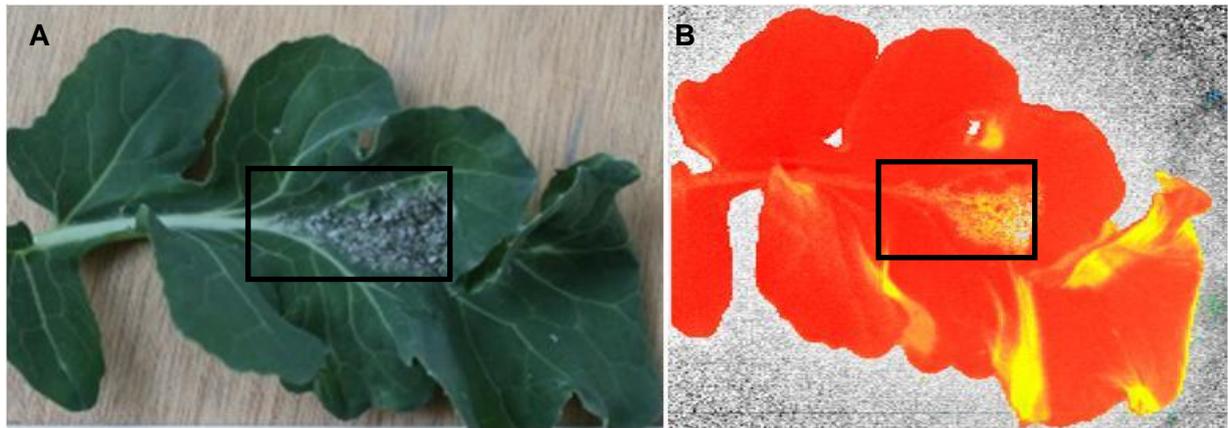


Abbildung 32: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines Brokkoliblattes (A) mit einer großen Mehligen Kohlblattlauskolonie mit 200 Individuen sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Die Mehlige Kohlblattlauskolonie wurde auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar

Des Weiteren wurde untersucht, ob mit dem FluorCAM 700MF-System die spektrale 2D-Information von den durch die Insekten verursachten Schäden erfasst und ausgewertet werden können. Hierfür wurden, wie bereits beschrieben, die befallenen Blätter einer Brokkolipflanze abgeschnitten und mit dem System erfasst. Die Ausrichtung der Kamera war senkrecht im 90° Winkel zum Boden. Die F_v/F_m -Werte von den ungeschädigten Bereichen (0,8) unterscheiden sich signifikant ($p < 0,0001$) von den geschädigten Bereichen (0), welche durch Raupen verursacht wurden (Abbildung 32). Somit konnten die Kohlmottenlarvenschäden mit dem System detektiert werden.

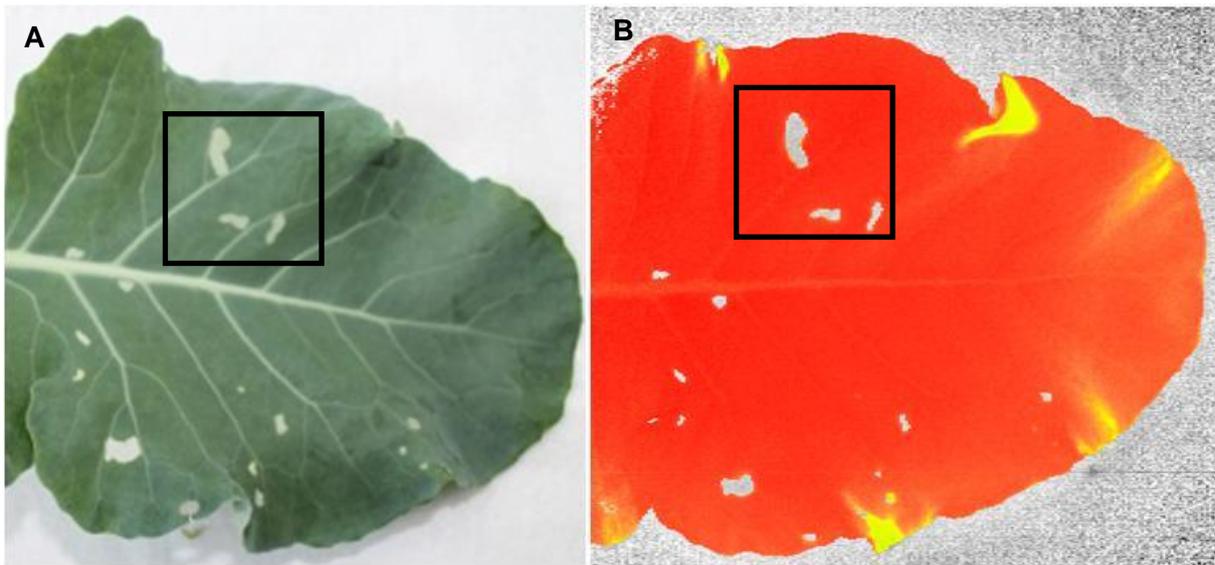


Abbildung 33: Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) eines (A) Brokkoliblattes mit den Schäden einer Kohlmotten-Larve sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen und mittels Bildbearbeitung FlourCAM 6-Software (PSI, Tschechien) bearbeitet wurde. Einige Fraßschäden wurden auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die F_v/F_m -Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die F_v/F_m -Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar

Die durch eine große Blattlauskolonie über 200 Individuen verursachten Blattschäden waren im Gegensatz zu denen von kleinen Blattlauskolonien mit dem System bildanalytisch erkennbar. Die F_v/F_m -Werte von den befallsfreien Bereichen unterschieden sich signifikant ($p < 0,0001$) von den geschädigten Blattbereichen (Abbildung 33). Die F_v/F_m -Werte der durch große Kolonien der Mehligen Kohlblattläuse verursachten Blattschäden unterschieden sich nicht signifikant von den F_v/F_m -Werten von Blattbereichen mit Larvenschäden.

Weiterhin wurde an den Rändern der abgetrennten Blätter (Abbildung 31 bis Abbildung 34) sowie den Rändern der Blätter an der Pflanze mit und ohne Schadinsekten (Abbildung 30) festgestellt, dass die F_v/F_m -Werte zwischen 0,8 (intakte Photosynthese) und 0 (gestörte Photosynthese) variierten. Die F_v/F_m -Werte von null in einigen Blattränderbereichen, können nicht auf eine bestimmte Ursache zurückgeführt werden.

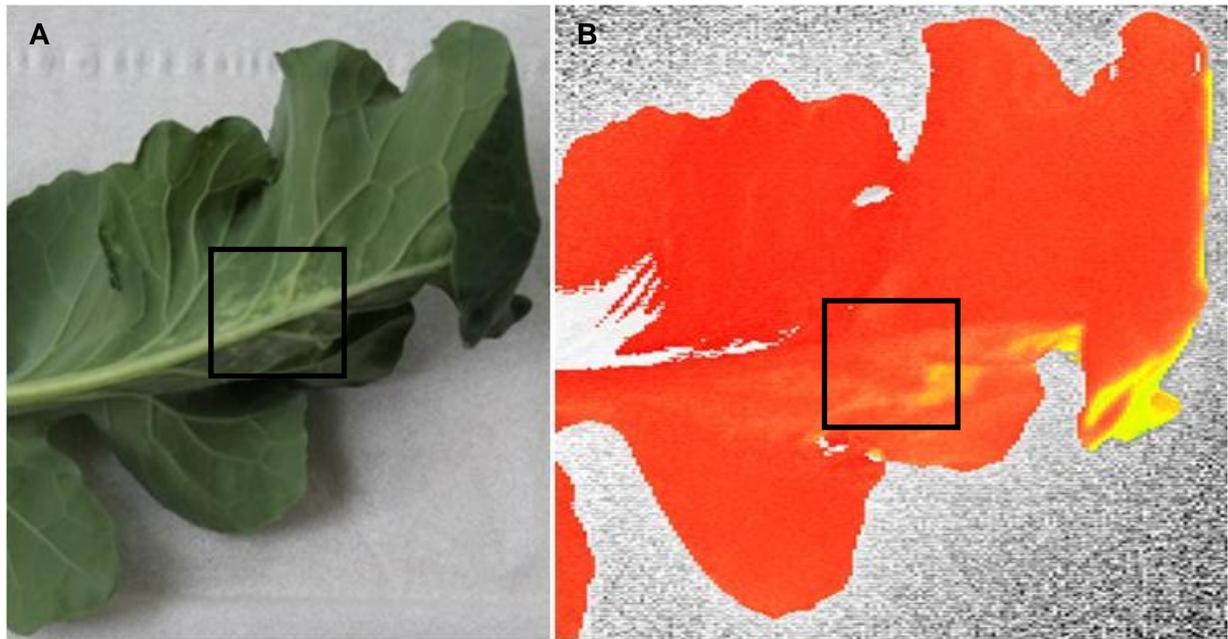


Abbildung 34: Farbbild eines Brokkoliblattes mit den Schäden, die durch (A) eine große Kolonie der Mehligen Kohlblattlaus mit 200 Individuen verursacht wurden sowie (B) ein Falschfarbenbild des gleichen Blattes, welches mit dem modularen System FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien) aufgenommen wurde. Die Schäden wurden auf beiden Bildern mit einem schwarzen Viereck hervorgehoben. Die roten Bereiche des Falschfarbenbildes stellen die Fv/Fm-Werte von 0,8 (intakte Photosynthese) und die gelben Bereiche die Fv/Fm-Werte von 0 (gestörte Photosynthese) dar

3.1.4 Bolometerkamera

Anhand des Versuches wurde geprüft, ob eine Bolometerkamera i7 (FLIR systems Inc., USA), mit der die Oberflächentemperatur von Objekten gemessen wird, zur Detektion von Schadinsekten bzw. Insektenschäden eingesetzt werden kann. Im Feld bei 6 °C waren die Larven des Kleinen Kohlweißlings und des Kohlzünzlers sowie einer Blattlauskolonie mit über 300 Individuen im Fokus der Untersuchung. Unter kontrollierten Bedingungen wurde überprüft, ob die Larven der Kohlmotten sowie eine Blattlauskolonie mit 50 Individuen und eine Blattlauskolonie auf einer weiteren Pflanze mit über 300 Individuen mit der Kamera bei 20 °C erfasst werden können.

Die Pflanzentemperatur von Weißkohlpflanzen mit Befall von Schadinsekten sowie der Weißkohlpflanzen ohne Schadinsekten im Feld variierte je nach Blattbereich und Blattpositionierung zwischen 7 und 10,8 °C (Abbildung 35A; Abbildung 36B). Die Temperatur der Insekten sowie durch diese verursachten Gewebeschäden variierte wie die Temperatur der Pflanzen zwischen 6,7 und 10,6 °C. Die Temperaturunterschiede zwischen den befallsfreien Bereichen und den geschädigten Bereichen bzw. Bereichen mit Schadinsekten unterschieden sich nicht signifikant (Abbildung 35A). Die Temperaturunterschiede zwischen den Schmetterlingslarven und der Mehligen Kohlblattlaus waren nicht signifikant. Sowohl Schadinsekten als auch durch diese verursachten Gewebeschäden hoben sich auf den Thermogrammen durch niedrigere bzw. höhere Temperaturen nicht hervor. Es waren keine Konturen von Insekten bzw. von durch diese verursachten Schäden auf den

Thermogramme erkennbar. Aus den genannten Gründen wurden keine weiteren Daten dazu erhoben.

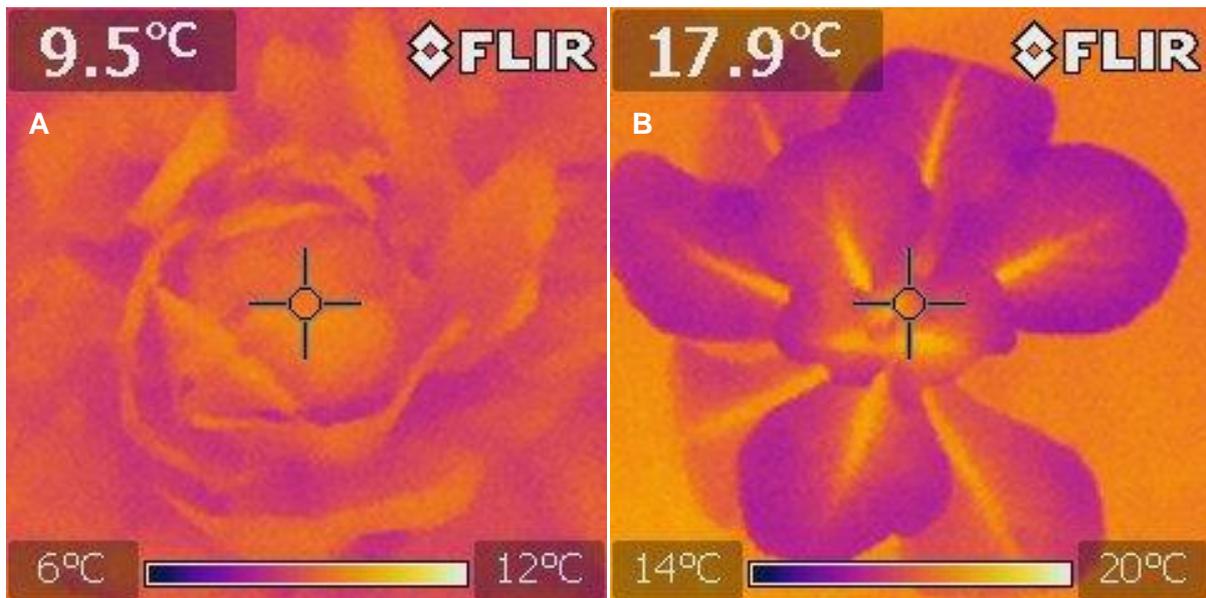


Abbildung 35: Thermogramme von Weißkohlpflanzen mit Mehligler Kohlblattlaus, die entweder (A) im Feld oder (B) unter kontrollierten Bedingungen mit i7 (FLIR systems Inc., USA) erfasst wurden

Die Pflanzentemperatur der Weißkohlpflanzen ohne Blattläuse unter kontrollierten Bedingungen bei 20 °C variierte je nach Blatt- und Pflanzenbereich zwischen 16,3 und 18,5 °C (Abbildung 35B).

Zwischen den Temperaturen der Schmetterlingslarven und Mehligler Kohlblattläusen bestanden keine signifikanten Unterschiede. Die Temperatur der Schadinsekten auf den Pflanzen sowie Gewebeschädigungen variierten zwischen 16,3 und 19 °C. Es waren keine Konturen von Insekten bzw. von durch Insekten verursachten Gewebeschäden auf den Thermogrammen erkennbar (Abbildung 36).

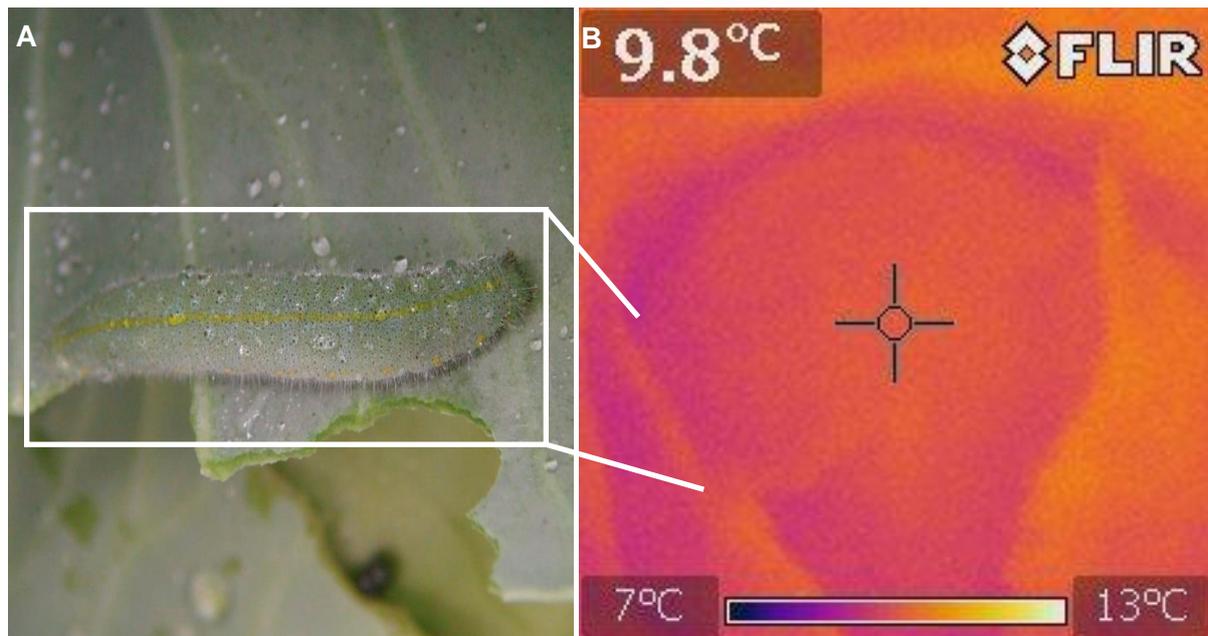


Abbildung 36: A) Farbbild (Kamera: HDR-CX730E, Sony, Japan) einer Larve des Kleinen Kohlweißlings sowie (B) dazu entsprechendes Thermogramm erfasst mit i7 (FLIR systems Inc., USA)

Mit der eingesetzten i7-Bolometerkamera war es nicht möglich Schadinsekten, wie Schadschmetterlingslarven oder die Mehligke Kohlblattlaus, und durch diese verursachten Schäden sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch im Feld zu detektieren (Abbildung 35; Abbildung 36). Die Temperatur der Insekten sowie durch diese verursachten Schäden unterschieden sich unabhängig von der Außentemperatur, der Größe des Insekts bzw. der Kolonie nicht signifikant von der Temperatur einer Weißkohlpflanze ohne Schadsymptome.

3.1.5 3D-Kamerasysteme

Die Rückstreuungseigenschaften von Schadinsekten auf einer Pflanze und von Schadsymptomen wurden durch Lasertriangulation mit dem Gocator 2350-Kamerasystem (LMI technologies, Canada) sowie Pulslaufzeitverfahren mit O3D 201PMD 3D Time-Of-Flight (TOF)-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland) untersucht. Es konnten mit keiner der 3D-Kamerasysteme anhand der Bildverarbeitung der erfassten spektralen Informationen die Kohlmottenlarven, Mehligke Kohlblattläuse oder durch Mehligke Kohlblattläuse verursachte Schäden detektiert werden (Tabelle 35).

Tabelle 35: Effekt der zwei 3D-Kamerasystemtypen Gocator 2350 (LMI technologies, Canada) und O3D 201PMD 3D TOF-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland) auf die Bildanalyse zur Erkennung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden (+ = Spektrale Informationen, die zur Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden benutzt werden konnten; - = Spektrale Informationen, die zur Detektion von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden nicht verwendet werden konnten)

Schädlingsart	3D-Kamerasystemtyp	Messmethode	Detektion von Schadinsekten	Detektion von Schadinsektenschäden
Kohlmottenlarven	Gocator 2350	Lasertriangulation	-	+
	O3D 201PMD	Pulslaufzeitverfahren	-	-
Mehligke Kohlblattlaus	Gocator 2350	Lasertriangulation	-	-
	O3D 201PMD 3D	Pulslaufzeitverfahren	-	-

Es konnten ausschließlich die spektralen 2D-Informationen der Schäden der Kohlmottenlarven auf dem Farbhöhenschemabild, welches durch Lasertriangulation erfasst wurde, mittels Bildverarbeitung ausgewertet werden (Abbildung 37).

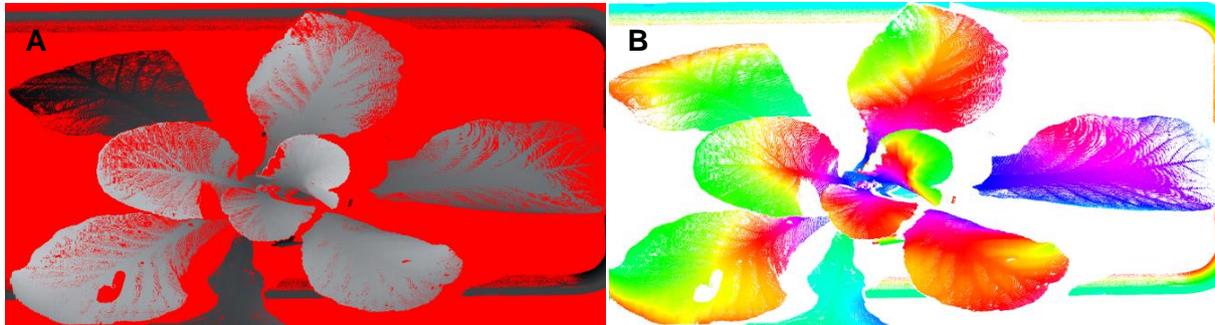


Abbildung 37: Darstellung einer Pflanze mit Kohlmottenlarven und durch diese verursachten Schäden als (A) Intensitätsbild- und (B) Farbhöhenschemabild durch Gocator 2350 (LMI technologies, Canada)

Mit der O3D 201PMD 3D Time-Of-Flight (TOF)-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland) konnten sowohl Schadinsekten als auch deren Schäden nicht detektiert werden. Das Sensorsystem erreichte zwar eine sehr hohe Reichweite, jedoch war die Auflösung mit 64x48 Bildpunkten zu gering (Abbildung 38).

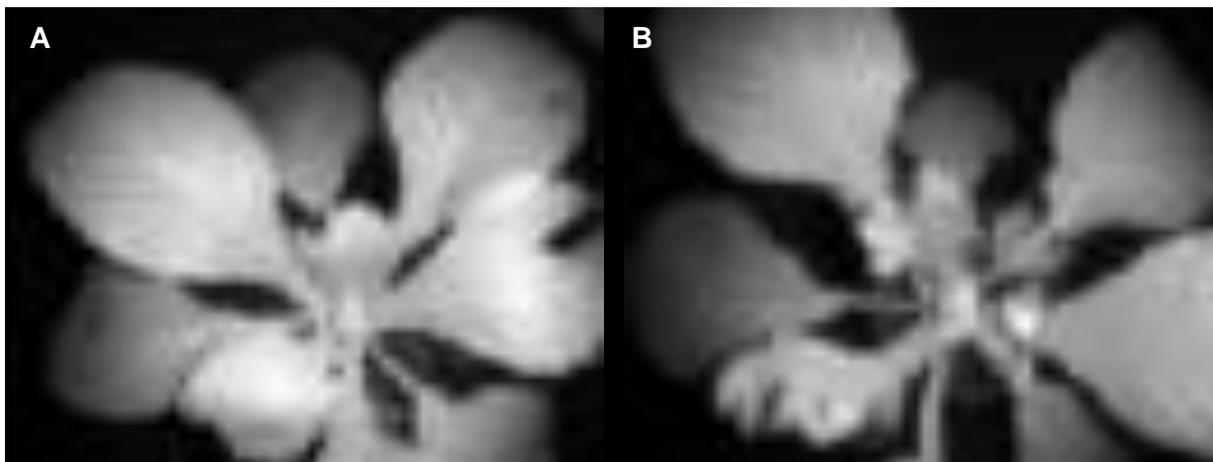


Abbildung 38: Distanzbilder einer Pflanze (A) mit Kohlmottenlarven und durch diese verursachten Schäden sowie einer Pflanze (B) mit Mehligiger Kohlblattlaus sowie durch diese verursachten Schäden, aufgenommen mit der O3D 201PMD 3D TOF-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland)

3.1.6 Vergleich der optoelektronischen Sensorsysteme zur Detektion der mobilen oberirdischen, ungeflügelten und pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze sowie durch diese verursachten Schäden unter kontrollierten Bedingungen

Um einen Überblick über die untersuchten Sensorsysteme zur Erfassung von mobilen oberirdischen, ungeflügelten und pflanzenschädigenden Insektenstadien direkt auf einer Pflanze zu bekommen, wurden die erzielten Ergebnisse aus den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.5 wie folgt zusammengefasst (Tabelle 36). Die Top Shot Perspektive erwies sich bei allen

optoelektronischen Systemen von Vorteil. Aufgrund der Zwischenergebnisse und technischen Eigenschaften konnten nicht alle Systeme senkrecht zum Boden in einem einheitlichen Höhenabstand getestet werden. Der Systemabstand variierte zwischen 30 und 70 cm über dem Boden. Am kostengünstigsten (zw. 200 und 800 €) waren die digitalen Farbkameras (Tabelle 36). Am teuersten (10.000 €) war das optoelektronische Sensorsystem FluorCAM 700MF (PSI, Tschechien).

Die durch Farbkamera, Graubildkamera und CFBA erfasste spektrale 2D-Information von Schadinsekten konnte grundsätzlich mit Bildverarbeitung zur Detektion von Kohlmotten- und Kohleulenlarven verwendet werden. Die Auswertung der Daten mit Schadinsekten, die aus einer Höhe von 70 cm erfasst wurden, war komplizierter im Vergleich zu den Daten die aus 30 bis 40 cm Höhe aufgenommen wurden. Zur Detektion von älteren Larvenstadien der Kohleule auf einer Kohlpflanze konnten die spektralen Informationen der drei Kamerasysteme (Farb- und Graubildkamera sowie CFBA) verwendet werden. Zur Detektion von Kohlmottenlarven auf einem Blatt erwiesen sich die spektralen Informationen, die anhand von Aufnahmen mit der Graubildkamera in Kombination mit Fremdlichtquelle (mit emittiertem sichtbarem rotem Wellenbereich) bzw. mit Chlorophyllfluoreszenz basierter Bildanalyse erfasst wurden, als vielversprechend. Keines der Insekten konnte mit den Systemen, die Rückstrahleigenschaften erfassten, detektiert werden.

Die Auswertung der Daten von Schäden der Schadschmetterlingslarven, die aus einer Höhe von 70 cm gewonnen wurden, war im Vergleich zu Daten aus einer Höhe von 30 bis 40 cm, komplizierter. Bei der Auswertung der digitalen Spektralinformationen der durch eine Schmetterlingslarve verursachten Schäden, die mit der Farb- und Graubildkamera bzw. Chlorophyllfluoreszenz basierten Bildanalyse erfolgten, war nur dann möglich, wenn sich kein photosynthetisch aktives Gewebe direkt unter dem untersuchten Bereich befand. Die Erfassung von Larvenschäden, welche sich ober- oder unterhalb der photosynthetisch intakten Fläche befanden, war mittels konventioneller Bildverarbeitung nicht möglich. Die Blattüberlappungen am Stamm haben die Komplexität der Auswertung erhöht. Des Weiteren konnten die spektralen 2D-Informationen der Lasertriangulation zur Erfassung des Schmetterlingsschadens einer Pflanze verwendet werden (Tabelle 36).

Keine der erfassten Spektralinformationen der getesteten Sensorsysteme konnte zur Detektion einer kleinen Kolonie (bis zu 15 Individuen) der Mehligen Kohlblattlaus sowie durch diese verursachten Schäden verwendet werden. Signifikante Unterschiede zwischen den F_v/F_m -Werten von Blattbereichen ohne Symptome und von Blattbereichen mit Blattlauskolonien über 200 Individuen gab es bei Auswertungen der spektralen Informationen mit Chlorophyllfluoreszenz basierter Bildanalyse. Mit der Chlorophyllfluoreszenz basierten Bildanalyse konnten sowohl die großen Blattlauskolonien (über 200 Individuen) sowie durch diese verursachten Schäden an abgetrennten Blättern erfasst werden (Tabelle 36).

Die Spektralinformationen des Thermografieverfahrens mit einem Bolometerkamerasystem sowie der O3D 201PMD 3D TOF-Kamera konnten nicht zur Erfassung der Mehligen Kohlblattlaus sowie Kohleulen- bzw. Kohlmottenlarven oder zur Erfassung der entsprechenden Schäden verwendet werden.

Tabelle 36: Getestete optoelektronische Systeme zur Detektion von spektralen Informationen von Schadschmetterlingsraupen und Mehliger Kohlblattläuse sowie durch diese verursachten Schäden (ja = mit dem System und anschließender konventioneller Bildverarbeitung konnte die Erfassung erfolgen; nein = die Methode war nicht erfolgreich; - = es gab keine Untersuchungen dazu; rot = Fremdlichtquelle mit emittiertem sichtbaren roten Wellenbereich 625 nm; Halogen = Fremdlichtquelle mit emittiertem Halogenlampenwellenbereich 780 nm; NIR = Fremdlichtquelle mit emittiertem nahinfraroten Wellenbereich 940 nm)

Optoelektronische Sensorsystemart	Systemtyp	Verfahren	Kosten (€)	Systemabstand in senkrechter Position zum Boden (cm)	Schädlingsart	Detektion des Schädlings		Detektion des Schadens	
						Auf einem Teilbereich der Pflanze	Auf einer ganzen Pflanze	Auf einem Teilbereich der Pflanze	Auf einer ganzen Pflanze
Farbkamera	PowerShot G2 (Cannon) Olympus-E1 (Olympus) HDR-CX730E (Sony)	Farbinformationen der RGB-Kanäle	60-800	40; 70	Schmetterlingslarven	ja/nein	ja/nein	ja/nein	ja/nein
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	nein	nein	nein
Graubildkamera mit Rotlichtzusatzbeleuchtung	monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer)	Grauwerte	2200	40	Schmetterlingslarven	ja	-	ja	-
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	-	nein	-
Graubildkamera mit Halogenzusatzbeleuchtung	monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer)	Grauwerte	2200		Schmetterlingslarven	nein	-	nein	-
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	-	nein	-
Graubildkamera mit NIR-Zusatzbeleuchtung	monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer)	Grauwerte	2200		Schmetterlingslarven	nein	-	nein	nein
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	-	nein	-
Chlorophyllfluoreszenzbasierte Bildanalyse	FluorCAM 700MF (PSI)	Fluoreszenzinformation	10000	30	Schmetterlingslarven	ja	-	ja	-
					Mehlige Kohlblattlaus	ja/nein	-	ja/nein	-
Bolometerkamera	FLIR I7	Thermokonduktivität	2500	30; 35	Schmetterlingslarven	nein	nein	nein	nein
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	nein	nein	nein
3D-Kamerasystem	Gocator 2350 (LMI technologies)	Lasertriangulationsdaten	7000	70	Schmetterlingslarven	nein	nein	ja	ja
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	nein	nein	nein
3D-Kamerasystem	PMD3d TOF-Kamera (IFM Elektronik)	Laufzeitverfahrensdaten	1140	70	Schmetterlingslarven	nein	nein	nein	nein
					Mehlige Kohlblattlaus	nein	nein	nein	nein

3.2 Charakterisierung des Arbeitsbereichs für die digitale Erfassung von Schaderregern im Bestand

Um die optoelektronischen Systeme für den praktischen Einsatz bewerten zu können, wurde der Anwendungsbereich für optoelektronische Systeme im Vergleich zu konventionellen Überwachungsmethoden überprüft sowie Versuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Hierfür fanden auf zwei JKI-Versuchsflächen (s. 2.4.1) mit Kohlgemüse (s. 2.1) Bonituren in regelmäßigen Zeitabständen (s. 2.4) statt. Des Weiteren wurde die Attraktivität eines kommerziell verfügbaren Pheromons auf die männlichen Kohleulen in einem Versuch unter kontrollierten Bedingungen überprüft. Im Fokus der Untersuchungen der optoelektronischen Sensorsysteme standen die wichtigsten in der Praxis vorkommenden Schädlinge wie Mehliges Kohlblattläuse, Schadschmetterlinge, Kleine Kohlfliege und Kohldrehherz gallmücke. Je nach Schädlingsordnung bzw. Schädlingsart und Schädlingsstadium unterschieden sich die Ergebnisse und werden in den folgenden Abschnitten dementsprechend dargestellt.

3.2.1 Untersuchungen zur Mehliges Kohlblattlaus im Bestand

Durch die Freilandversuche dieser Arbeit wurde festgestellt, dass aus der Familie der Röhrenblattläuse die Mehliges Kohlblattlaus und die Grüne Pfirsichblattlaus (*Myzus persicae* Sulz.) auf dem Kohlgemüse vertreten waren. Jedoch kam die Grüne Pfirsichblattlaus im Vergleich zur Mehliges Kohlblattlaus seltener und in kleinerer Anzahl (maximal zehn Grüne Pfirsichblattläuse pro Pflanze zur gleichen Zeit) vor (s. 7.2.1; Tabelle 60). Die Dauer des Befalls durch die Grüne Pfirsichblattlaus begrenzte sich auf maximal sechs Wochen und führte zu keinen erkennbaren Schäden, daher wurde diese Blattlausart nicht weiter in der Arbeit aufgeführt.

Zur Erfassung der Mehliges Kohlblattlaus bzw. durch diese verursachten Schäden mittels optoelektronischen Systemen eigneten sich bestimmte Systemaufbauten mit bestimmten Stellungen (s. 3.1). Um die untersuchten optoelektronischen Systeme abschließend bewerten zu können, war es erforderlich die Saugorte und somit die Verteilung der Mehliges Kohlblattläuse im Feldbestand zu ermitteln. Daher wurde wöchentlich die Anzahl der Insekten auf unterschiedlichen horizontalen Pflanzenzonen (Herz-, Um- und Außenblätter; Tabelle 20) sowie unterschiedlichen Blattseiten (Unter- und Oberseite; Tabelle 16) in einem Weißkohlbestand erfasst.

3.2.1.1 Häufigkeiten und Abundanzen

Die Besiedlung der jungen Weißkohlbestände durch die Mehliges Kohlblattlaus begann je nach Jahr und Ort Anfang bzw. Mitte Juni (Abbildung 39). Im Jahr 2014 wurden erste ungeflügelte Mehliges Kohlblattläuse in Hötzum in der KW 25 (18.06.2014) und in Braunschweig in der KW 23 (03.06.2014) festgestellt. Im Jahr 2015 traten diese im

Weißkohlbestand sowohl in Hötzum als auch in Braunschweig in der KW 25 (15.06.2015) auf. Die höchsten Befallsdichten im Weißkohlbestand waren in den beiden Jahren Anfang Juli in der KW 28 in Hötzum mit durchschnittlich 17 ungeflügelten Mehligten Kohlblattläusen pro Pflanze (826 pro 50 Pflanzen am 07.07.2014) bzw. mit durchschnittlich 18 ungeflügelten Mehligten Kohlblattläusen pro Pflanze (906 pro 50 Pflanzen am 06.07.2015). In der KW 36 in 2014 (02.09.2014) bzw. 37 in 2015 (07.09.2015) kam es in Hötzum zu einem zweiten Befallshöhepunkt. Die Befallsdichte in Braunschweig war in beiden Jahren im Vergleich zu Hötzum deutlich geringer. Im Gegensatz zu Hötzum wurde in Braunschweig kein eindeutiger Befallshöhepunkt Anfang Juli festgestellt. Die maximale durchschnittliche Anzahl an Mehligten Kohlblattläusen pro Pflanze betrug im Jahr 2014 in der KW 32 elf (563 pro 50 Pflanzen am 05.08.2014) und im Jahr 2015 in der KW 40 fünf (258 pro 50 Pflanzen am 28.09.2015). In beiden Jahren wurde sowohl in Hötzum als auch in Braunschweig keine Ablage von Wintereiern bis zum Ende der Bonitur in der KW 40 (01.10.2014 bzw. 28.09.2015) beobachtet. Die Wintereier der Mehligten Kohlblattlaus traten Ende November (27.11.2014 bzw. 30.11.2015) in beiden Jahren auf dem Rosenkohl auf.

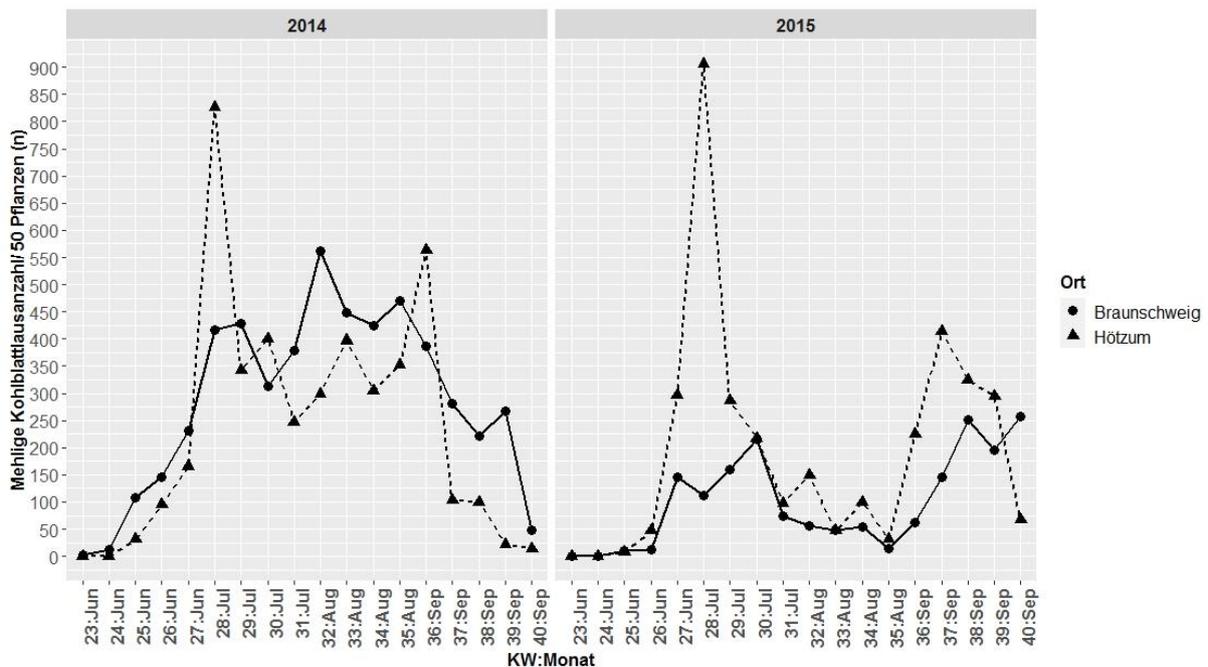


Abbildung 39: Absolute Häufigkeiten der ungeflügelten Mehligten Kohlblattläuse je 50 Pflanzen zu verschiedenen Boniturterminen im Jahr 2014 und 2015 für die Standorte Braunschweig und Hötzum. Die Boniturtermine sind durch Kalenderwochen (KW) und Monat gekennzeichnet

3.2.1.2 Untersuchungen zur vertikalen Verteilung der Schädlingsart auf Weißkohlpflanzen im Bestand

Mit den Versuchen wurde überprüft, ob die Mehligte Kohlblattlaus im Feld bestimmte Pflanzenbereiche bevorzugt. Die erhobenen Daten wurden zur Evaluierung von optoelektronischen Systemen für die Praxis verwendet (s. 3.2.1). Grundsätzlich lagen die Akkumulationsorte der Mehligten Kohlblattlaus sowohl im Jahr 2014 als auch in 2015 an beiden Standorten vorwiegend auf den Außenblättern (Abbildung 40; Tabelle 37). An beiden

3. Ergebnisse

Orten (Hötzum bzw. Braunschweig) im Jahr 2014 sowie 2015 über die 17 Termine sowie bei allen Entwicklungsstadien war überwiegend die absolute Anzahl an Mehligen Kohlblattläusen auf den Außenblättern signifikant höher im Vergleich zu der Anzahl an Mehligen Kohlblattläusen auf den Herzblättern ($p < 0,0001$ Braunschweig 2014 und Hötzum 2014 und 2015; $p = 0,006$ Braunschweig 2015) bzw. Umblättern ($p < 0,0001$ Braunschweig 2014; $p = 0,0018$ Hötzum 2014; $p = 0,0192$ Hötzum 2015).

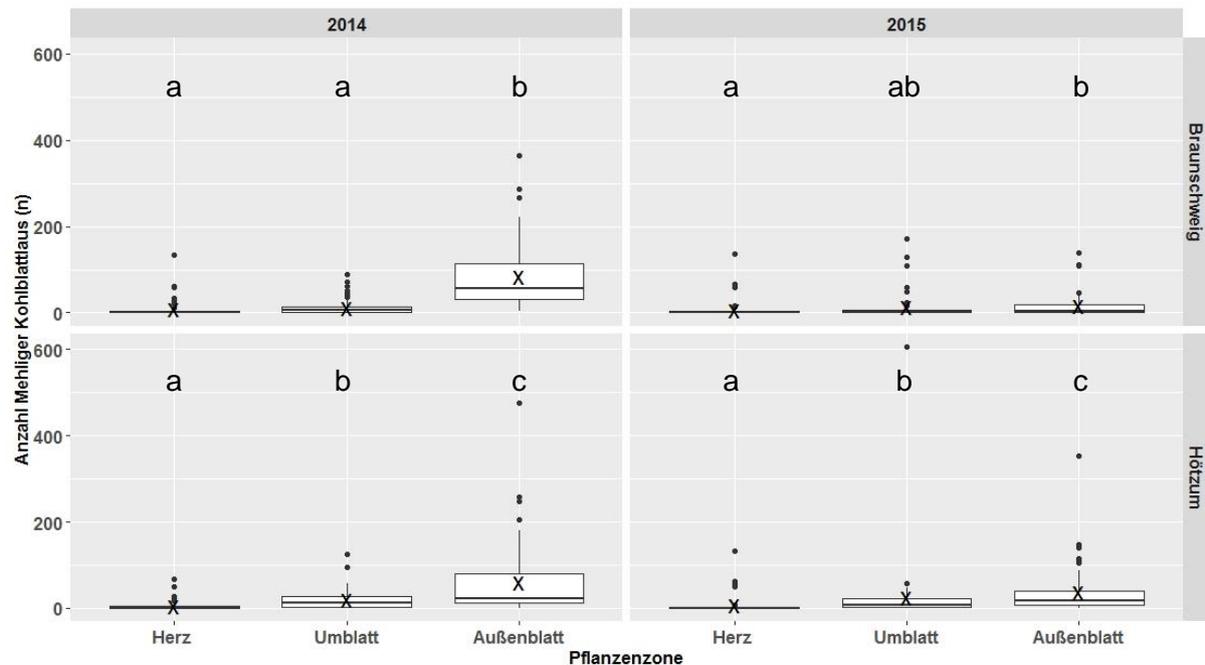


Abbildung 40: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an drei vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort (Braunschweig oben und Hötzum unten). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

Die relative Häufigkeit der Mehligen Kohlblattlaus (Tabelle 37) auf den Außenblättern unterschied sich je nach Jahr und Ort zwischen 60 % (2014, Braunschweig) und 12 % (2015, Braunschweig) im Vergleich zur relativen Häufigkeit der zwei anderen vertikalen Zonen (Herz und Umblätter). In Hötzum war in beiden Jahren zudem die absolute Anzahl der Mehligen Kohlblattlaus auf den Umblättern signifikant höher im Vergleich zur Anzahl auf den Herzblättern ($p < 0,0001$). Es befanden sich je nach Jahr zwischen 17 % (2014) und 21 % (2015) mehr Mehligke Kohlblattläuse auf den Umblättern als auf den Herzblättern.

Tabelle 37: Relative Häufigkeit der Mehligen Kohlblattlaus an verschiedenen Pflanzenzonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (n=50).

Ort	Jahr	Pflanzenzone	Anteil der Mehligen Kohlblattläuse (%)
Braunschweig	2014	Herzbereich	8
		Umblattbereich	12
		Außenblattbereich	80
	2015	Herzbereich	15
		Umblattbereich	29
		Außenblattbereich	56
Hötzum	2014	Herzbereich	7
		Umblattbereich	23
		Außenblattbereich	70
	2015	Herzbereich	10
		Umblattbereich	31
		Außenblattbereich	59

Unter Berücksichtigung der Entwicklungsstadien der Weißkohlpflanzen wurde festgestellt, dass insbesondere ab dem Entwicklungsstadium BBCH 41-46 die Anzahl an Mehligen Kohlblattläusen auf den Außenblättern an beiden Standorten in beiden Jahren im Vergleich zu anderen Pflanzenzonen signifikant höher war ($p < 0,0001$ Braunschweig und Hötzum 2014; $p = 0,0216$ Herz- Außenblatt Braunschweig 2015; $p = 0,0039$ Um- Außenblatt Braunschweig 2015; $p < 0,0001$ Herz- Außenblatt Hötzum 2015) (Abbildung 41). In den Entwicklungsstadien BBCH 12-18 traten kaum Mehlig Kohlblattläuse auf den Blättern der drei Pflanzenzonen auf. Bei den Entwicklungsstadien BBCH 41-46 kamen in Hötzum in beiden Jahren vorwiegend signifikant mehr Mehlig Kohlblattläuse auf den Umblättern vor im Vergleich zu anderen vertikalen Pflanzenzonen wie Herz- ($p = 0,0096$ 2014; $p = 0,0008$ 2015) oder Außenblätter ($p < 0,0001$ 2014).

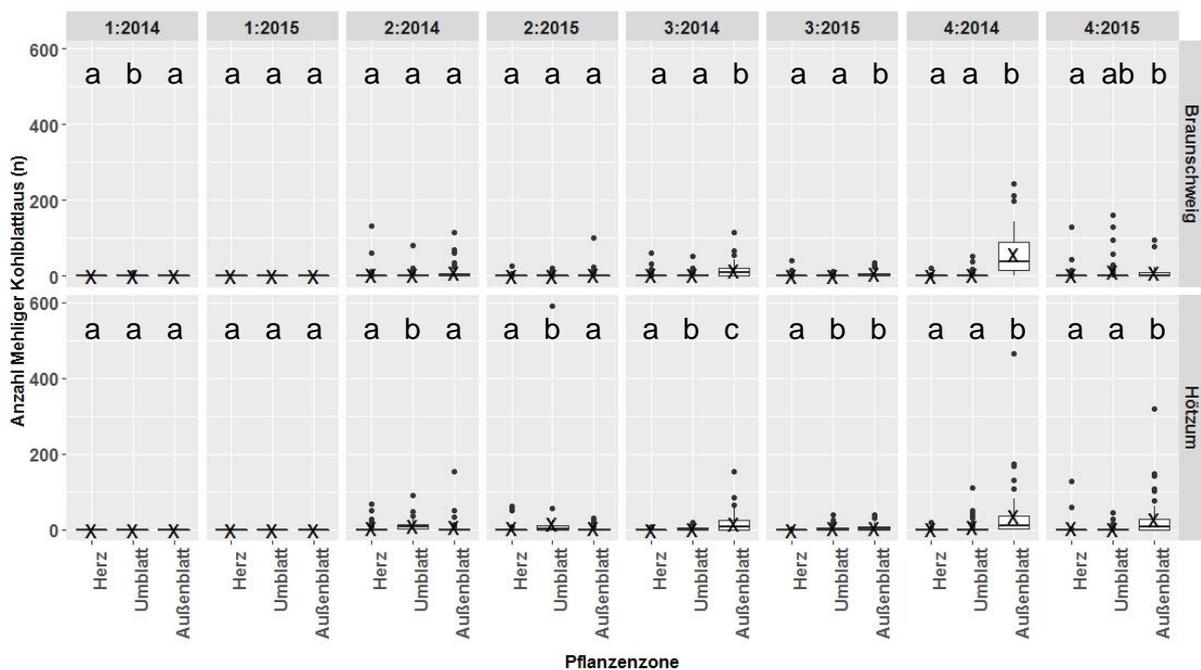


Abbildung 41: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Entwicklungsstadium (1 = BBCH 12-18, 2 = BBCH 19-40, 3 = BBCH 41-46, 4 = BBCH 47-49), Jahr und Ort (oben Braunschweig und unten Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=50$, LMER, LSMEANS; x = arithmetisches Mittel)

3.2.1.3 Untersuchungen zur Blattseitenpräferenz des Schädling auf einer Weißkohlpflanze im Bestand

Die Fragestellung dieser Untersuchung war, ob die Mehlig Kohlblattlaus mittels optoelektronischer Sensorsysteme, wie z. B. Kamerasystemen (s. 3.1), auf der Blattoberseite erfasst werden kann. Dazu war es wichtig zu überprüfen, auf welcher Blattseite die Mehlig Kohlblattlaus hauptsächlich im Feld zu finden war. Die präferierte Blattseite durch die Mehlig Kohlblattläuse in beiden Jahren (2014, 2015) und an beiden Standorten

3. Ergebnisse

(Braunschweig und Hötzum) war die Unterseite. An allen Standorten über die 17 Termine, allen Entwicklungsstadien sowie allen Pflanzenzonen (Abbildung 42) war die absolute Anzahl an Mehligten Kohlblattläusen auf der Blattunterseite signifikant höher als auf der Blattoberseite ($p < 0,0001$).

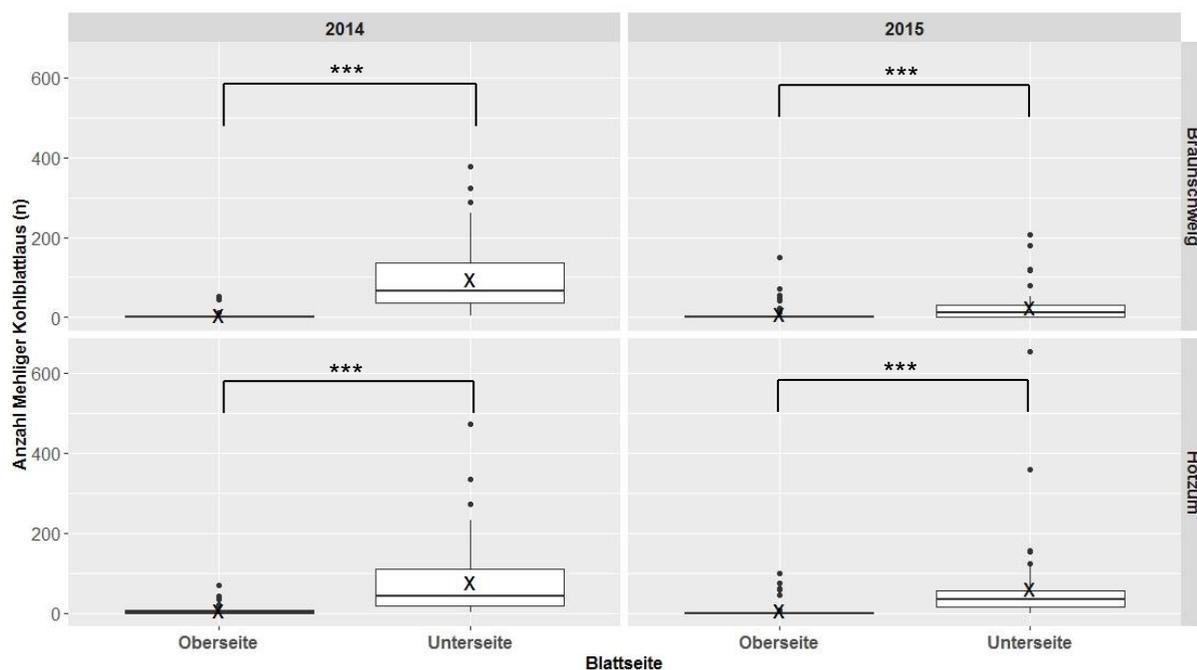


Abbildung 42: Absolute Verteilung der Mehligten Kohlblattläuse an der Blattoberseite bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine, Entwicklungsstadien sowie Pflanzenzonen akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '*' < 0,0001, x = arithmetisches Mittel)**

Die relative Häufigkeit der Mehligten Kohlblattläuse auf der Blattunterseite unterschied sich je nach Jahr und Ort mit 56 % (2014, Braunschweig) bzw. 88 % (2015, Braunschweig) von der relativen Häufigkeit auf der Blattoberseite (Tabelle 38).

Tabelle 38: Relative Häufigkeit der Mehligten Kohlblattläuse an verschiedenen Blattseiten einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (Stichprobenumfang; n=50).

Ort	Jahr	Blattseite	Anteil der Mehligten Kohlblattläuse (%)
Braunschweig	2014	Blattoberseite	6
		Blattunterseite	94
	2015	Blattoberseite	22
		Blattunterseite	78
Hötzum	2014	Blattoberseite	8
		Blattunterseite	92
	2015	Blattoberseite	10
		Blattunterseite	90

Wurden bei den statistischen Auswertungen auch die Pflanzenzonen berücksichtigt, so wurde festgestellt, dass die Anzahl an Mehligten Kohlblattläusen auf den Blattoberseiten und Blattunterseiten der Herzblätter sich nicht signifikant an beiden Standorten (Hötzum und Braunschweig) in beiden Jahren (2014 und 2015) unterschied. Auf Um- und Außenblättern war die Anzahl an Mehligten Kohlblattläusen auf der Blattunterseite signifikant höher als auf der Blattoberseite (Abbildung 43).

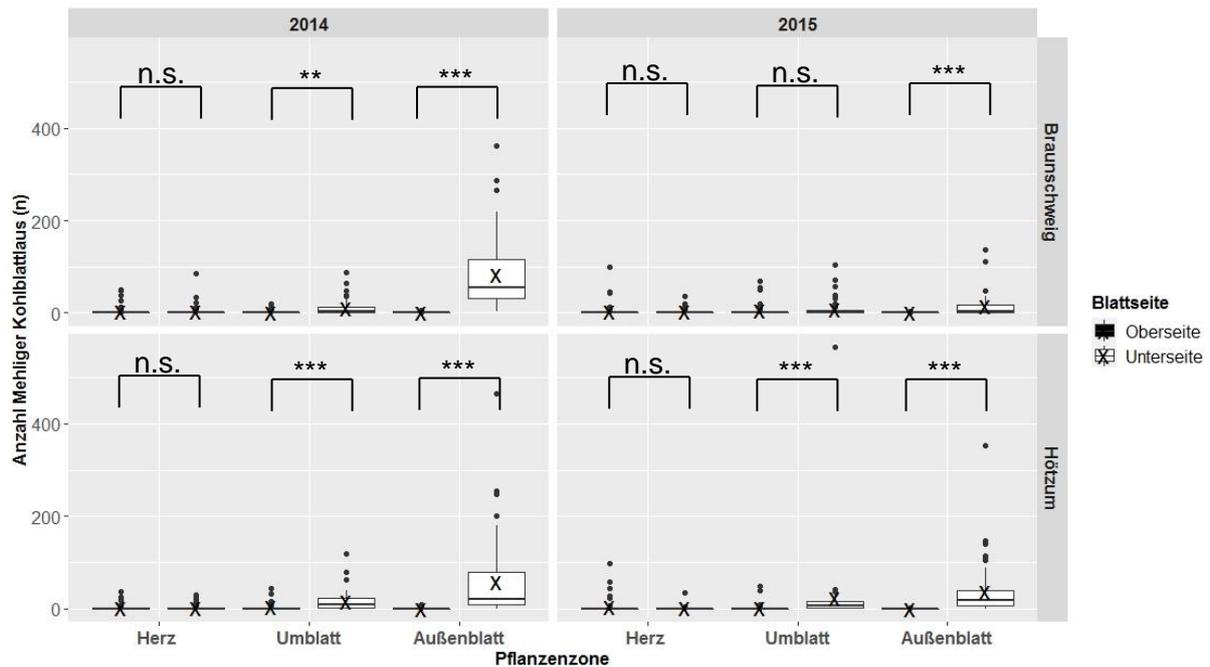


Abbildung 43: Absolute Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr und Ort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: ** < 0,001; *** < 0,01; ** < 0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)**

3.2.2 Untersuchungen zu Schadschmetterlingen

Die Schadschmetterlinge sind eine weitere bedeutende Schädlingsgruppe, weil deren Larven zu erheblichen Ertragseinbußen durch Fraßschäden führen können (s. 1.1.1). Genau wie im Kapitel davor (s. 3.2.1) war die Kenntnis zur Verteilung von Schmetterlingslarven bzw. der durch diese verursachten Schäden im Feldbestand auf einer Pflanze notwendig, um die untersuchten optoelektronischen Systeme abschließend bewerten zu können. Daher wurde, wie bei der Mehligen Kohlblattlaus, wöchentlich die Anzahl der Insekten auf unterschiedlichen horizontalen Pflanzenzonen (Abbildung 8; Tabelle 20) sowie unterschiedlichen Blattseiten (Tabelle 16) an zwei Versuchsstandorten (s. 2.4.1) in einem Weißkohlbestand, wie in 2.4.3.1 beschrieben, erfasst. Des Weiteren wurden die erhobenen Daten der Sexualpheromonlockstofffallen als Vergleichsparameter für die optoelektronischen Systeme verwendet.

3.2.2.1 Häufigkeitsverteilungen und Abundanzen

Es wurden die Häufigkeiten und Abundanzen der Schadschmetterlinge im Jahr 2014 und 2015 an zwei Versuchsstandorten (Hötzum und Braunschweig) erfasst. Dies war erforderlich, um die eingesetzten optoelektronischen Systeme bewerten und vergleichen zu können. Im Jahr 2014 kamen je nach Ort zwischen 27 % (Hötzum) und 65 % (Braunschweig) mehr Larven im Vergleich zum Jahr 2015 vor (Abbildung 44).

3. Ergebnisse

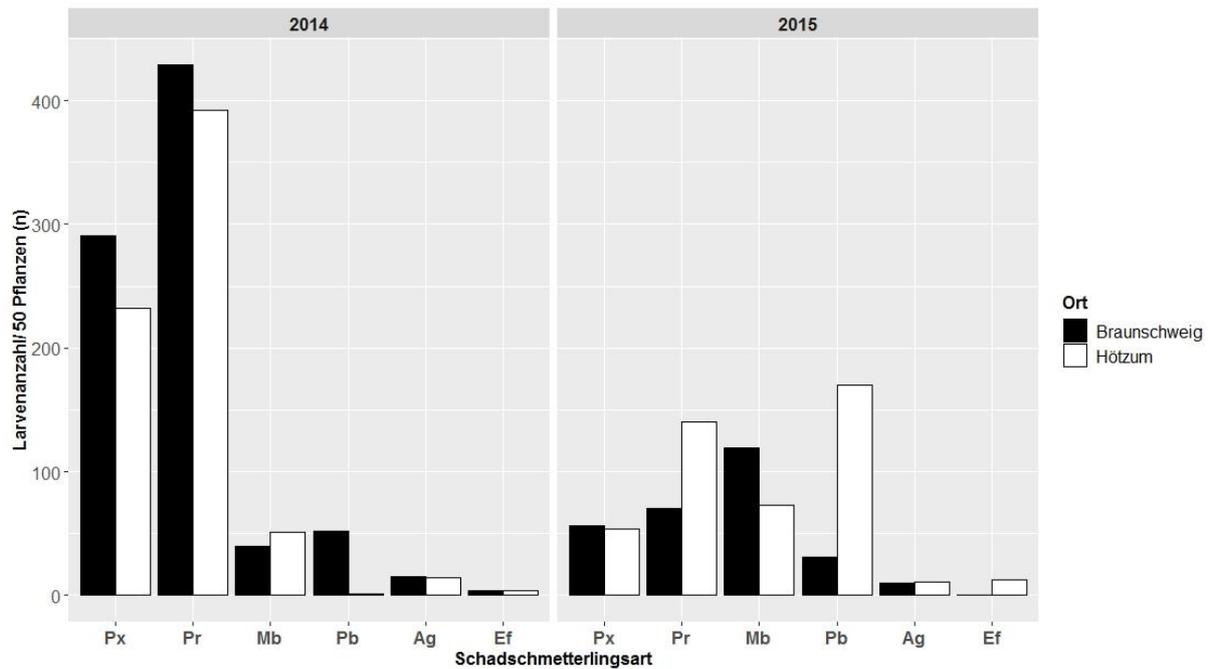


Abbildung 44: Absoluter Anteil der Schadschmetterlingsarten (Px=Kohlmotte, Pr=Kleiner Kohlweißling, Mb=Kohleule, Ag=Gammaeule, Pb=Großer Kohlweißling, Ef=Kohlzünzler) am Befall im Jahr 2014 und 2015 an beiden Standorten an insgesamt 17 Boniturterminen (n=850)

Die im Versuchszeitraum am häufigsten nachgewiesenen Schadschmetterlingsarten waren Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Kohleule und Großer Kohlweißling. Des Weiteren kamen auf den Versuchsflächen Gammaeulen und Kohlzünzler (Abbildung 44; Abbildung 45) vor.

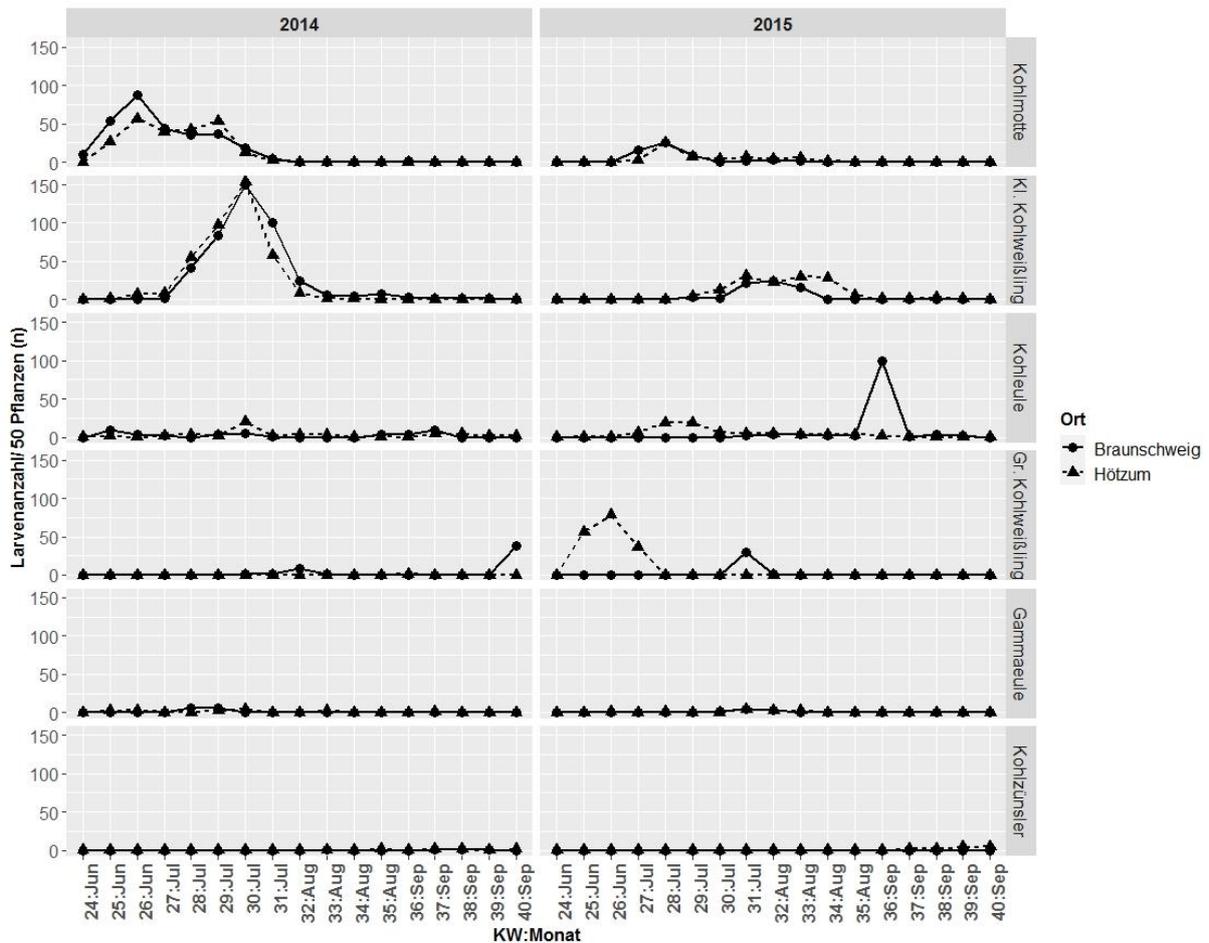


Abbildung 45: Absolute Häufigkeiten der sechs Schmetterlingsarten (Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Kohleule, Großer Kohlweißling, Gammaeule, Kohlzünzler) zu verschiedenen Boniturterminen im Jahr 2014 und 2015 für die Standorte Braunschweig und Hötzum.

Je nach Schmetterlingsart, Ort und Jahr unterschied sich das Vorkommen der Larven im Weißkohl im Verlauf der vollständigen Kulturperiode (von Pflanzung bis Erntereife). Im Zeitraum von Ende Juni (KW 26) bis Anfang August (KW 32) wurden die Befallsmaxima von Kohlmotte, Kleinem Kohlweißling, Kohleule, Gammaeule und Großem Kohlweißling bonitiert (Abbildung 45; Tabelle 39). Ab Anfang September (KW 36) bis Ende September (KW 40) wurden in der Kulturperiode die Befallsmaxima von Kohleule, Großem Kohlweißling und Kohlzünzler erfasst.

3. Ergebnisse

Tabelle 39: Zeitpunkt der Befallsmaxima der sechs Schmetterlingsarten innerhalb einer vollständigen Kulturperiode (Pflanzung bis Erntereife) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig; HO=Hötzum) und Jahr

Schmetterlingsart	Jahr	Ort	Vorkommen der Larven (KW)	Vorkommen der Larven (Datum)	Maximale Befallsdichte (KW)	Maximale Befallsdichte (Datum)
Kohlmotte	2014	BS und HO	24-32	09.06.2014-05.08.2014	26	23.06.2014
	2015	BS und HO	26-34	23.06.2015-19.08.2015	28	07.07.2015
Kleiner Kohlweißling	2014	BS und HO	26-36	23.06.2014-02.09.2014	30	21.07.2014
	2015	BS und HO	29-36	14.07.2015-02.09.2015	32	05.08.2015
Kohleule	2014	BS	24-26 + 35-38	09.06.2014-23.06.2014 + 26.08.2014-16.09.2014	25 + 37	16.06.2014 + 09.09.2014
		HO	24-31	09.06.2014-28.07.2014	30	21.07.2014
	2015	BS	30-39	21.07.2015-23.09.2015	36	02.09.2015
		HO	26-37	23.06.2015-09.09.2015	29	14.07.2015
Gammaeule	2014	BS	26-30	23.06.2014-21.07.2014	28	07.07.2014
		HO	24-27 + 28-31	09.06.2014-30.06.2014 + 07.07.2014-28.07.2014	25 + 29	16.06.2014 + 14.07.2014
	2015	BS	29-34	14.07.2014-19.08.2014	31	28.07.2014
		HO	25-27 + 30-34	16.06.2014-30.06.2014 + 21.07.2014-19.08.2014	26 + 31	23.06.2014 + 28.07.2014
Großer Kohlweißling	2014	BS	30-34 + 39-40	21.07.2014-19.08.2014 + 23.09.2014-30.09.2014	32 + 40	05.08.2014-30.09.2014
		HO	35-37	26.08.2014-09.09.2014	36	02.09.2014
	2015	BS	30-32	21.07.2014-05.08.2014	31	28.07.2014
		HO	24-28	09.06.2014-07.07.2014	26	23.06.2014
Kohlzünzler	2014	BS	32-38	05.08.2014-16.09.2014	33	12.08.2014
		HO	36-39	02.09.2014-23.09.2014	37	09.09.2014
	2015	HO	36-40	02.09.2014-30.09.2014	39	23.09.2014

3.2.2.2 Untersuchungen zur vertikalen Verteilung der Schmetterlingslarven auf Weißkohlpflanzen im Bestand

Mit dem Versuch wurde untersucht, welche Pflanzenbereiche von bestimmten Schmetterlingslarven im Feld bevorzugt werden. Die erhobenen Daten haben dazu beigetragen, den Einsatz von optoelektronischen Systemen zur Erfassung von Schmetterlingslarven im Feld zu evaluieren (s. 3.2.2). Anhand der akkumulierten Daten über 17 Termine, Schmetterlingsarten sowie allen Entwicklungsstadien konnte keine eindeutige Präferenz der Larven für eine bestimmte Weißkohlzone als Fraßort festgestellt werden (Abbildung 46). Die statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Pflanzenzonen variierten in Abhängigkeit von Jahr und Ort. Im Jahr 2014 kamen signifikant mehr Larven auf den Außenblättern als auf den Umblättern in Braunschweig vor ($p = 0,0035$). In Hötzum

hingegen kamen 2014 signifikant mehr Larven auf den Umblättern im Vergleich zu den Herzblättern ($p = 0,0035$) vor. 2015 wurden signifikant mehr Larven auf den Herzblättern im Vergleich zu Umblättern ($p = 0,0006$) in Braunschweig festgestellt. Im Hötzum kamen 2015 signifikant mehr Larven auf den Außenblättern im Vergleich zu Herz- ($p = 0,0066$) und Umblättern ($p = 0,0001$) vor.

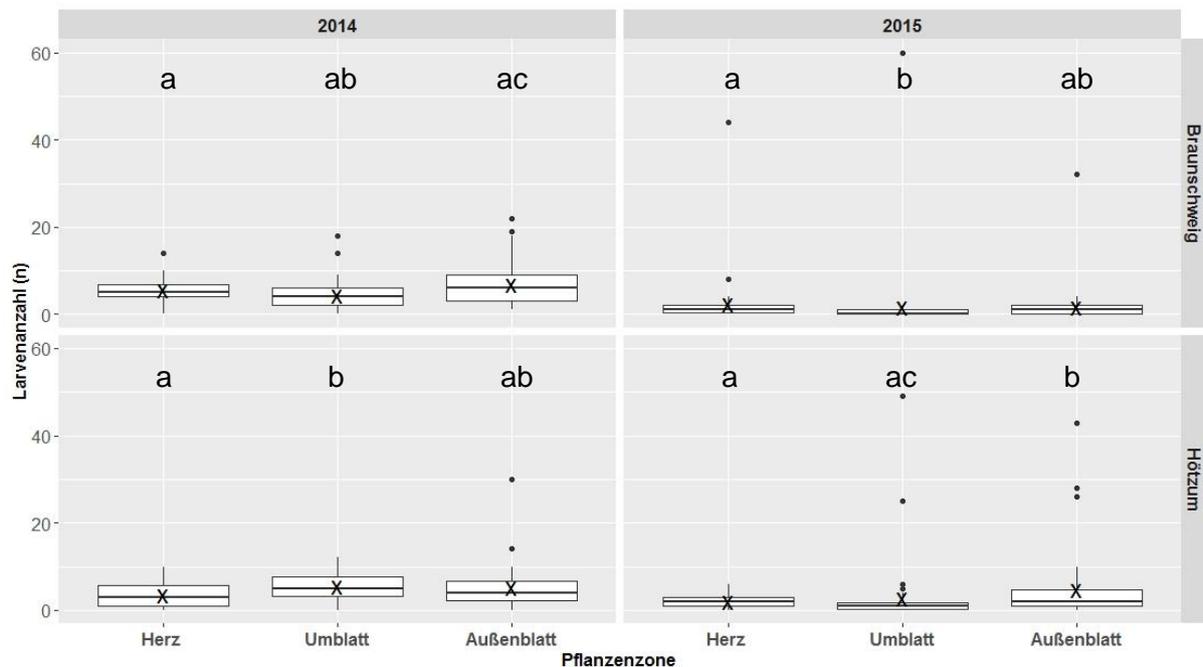


Abbildung 46: Absolute Verteilung der Larven an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr und Ort. Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=50$, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

Der Anteil an Schmetterlingslarven im Herzbereich lag zwischen 22 % und 43 %. Auf den Umblättern war der Anteil zwischen 26 % und 38 % und auf den Außenblättern wurde ein Anteil an Larven zwischen 27 % und 50 % festgestellt (Tabelle 40).

Tabelle 40: Relative Häufigkeit der Larven an verschiedenen Pflanzenzonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr ($n=50$)

Ort	Jahr	Pflanzenzone	Anteil der Schmetterlingslarven (%)
Braunschweig	2014	Herzbereich	33
		Umblattbereich	26
		Außenblattbereich	41
	2015	Herzbereich	43
		Umblattbereich	30
		Außenblattbereich	27
Hötzum	2014	Herzbereich	25
		Umblattbereich	38
		Außenblattbereich	37
	2015	Herzbereich	22
		Umblattbereich	29
		Außenblattbereich	50

Wurde bei der Auswertung der drei Pflanzenzonen die Entwicklungsstufe (Tabelle 32) nach Forster (1992) berücksichtigt, so wurde bei den statistischen Auswertungen festgestellt, dass insbesondere Entwicklungsstufe 2 und 3 den höchsten Besatz mit Schadschmetterlingen aufwiesen. Hierbei konnte keine bestimmte Präferenz für eine bestimmte Pflanzenzone

3. Ergebnisse

festgestellt werden, diese variierte je nach Entwicklungsstufe, Jahr und Versuchsfläche (Abbildung 47).

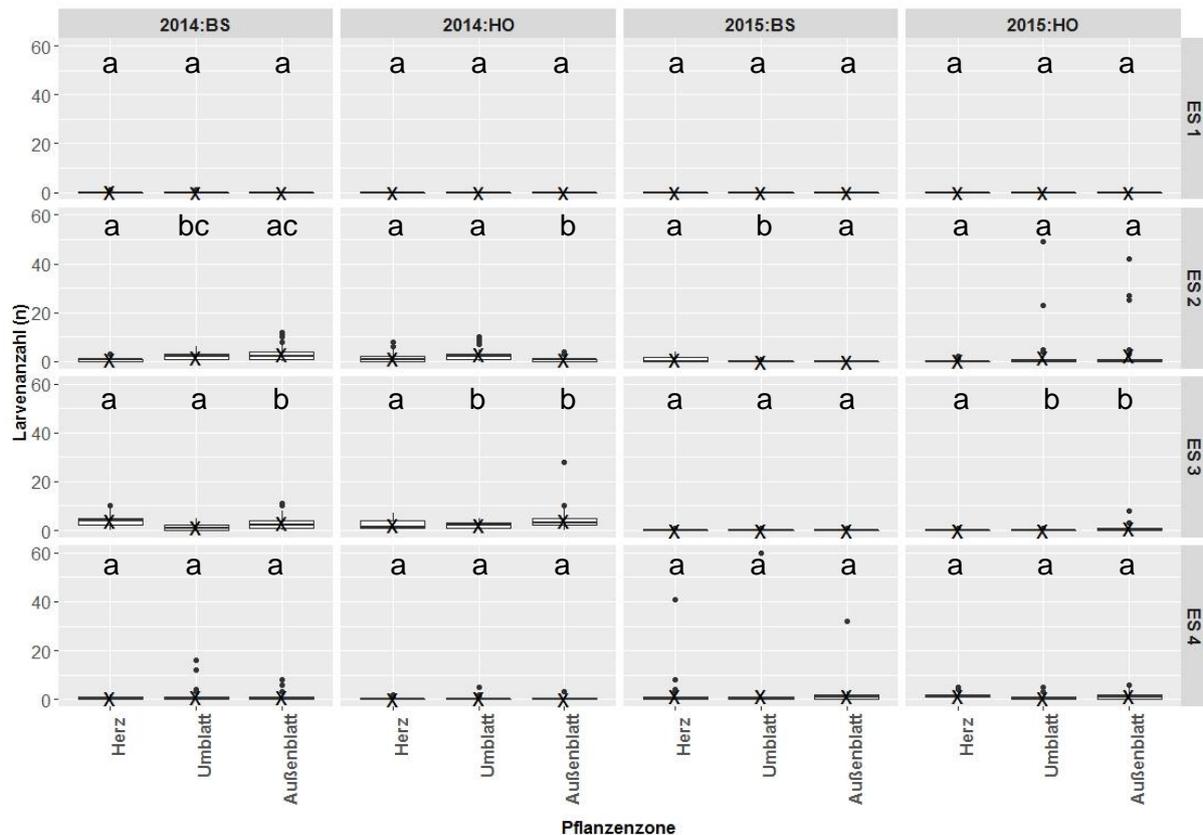


Abbildung 47: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49), Jahr und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

Statistisch konnten ausschließlich bei den Kohlmotten- und den Kleinen Kohlweißlinglarven signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Pflanzenzonen festgestellt werden (Abbildung 48; Abbildung 49). Bei Kohleule, Gammaeule, Großem Kohlweißling und Kohlzünzler gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Besatz der unterschiedlichen Pflanzenzonen durch Larven.

Die Präferenz der Kohlmottenlarven für eine bestimmte Pflanzenzone unterschied sich je nach Entwicklungsstufe, Jahr und Versuchsfläche (Abbildung 48). Statistisch signifikante Unterschiede wurden ausschließlich bei den Weißkohlpflanzen in den Entwicklungsstufen 2 und 3 festgestellt. Im Jahr 2014 kamen bei der Entwicklungsstufe 2 in Braunschweig signifikant mehr Larven der Kohlmotte auf den Um- ($p = 0,0340$) und Außenblättern ($p = 0,0143$) im Vergleich zu den Herzblättern (Abbildung 48) vor. Im Jahr 2015 hingegen kamen am selben Ort derselben Entwicklungsstufe signifikant mehr Larven auf den Herzblättern im Vergleich zu Um- ($p = 0,0009$) und Außenblättern ($p < 0,0001$) vor. In Hötzum wurden im Jahr 2014 auf der Entwicklungsstufe 2 signifikant mehr Larven der Kohlmotte auf den Umblättern im Vergleich zu Außenblättern ($p < 0,0001$) bonitiert. Im Jahr

2015 gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Pflanzenzonen bei der Entwicklungsstufe 2. Die Anzahl an Larven auf den Außenblättern ($p = 0,0382$) in Braunschweig 2014 war signifikant höher im Vergleich zu den Umblättern der Weißkohlpflanzen in der Entwicklungsstufe 3. In Hötzum 2014 hingegen war die Anzahl an Larven auf den Herz- ($p = 0,0004$) und Umblättern ($p = 0,0001$) signifikant niedriger als auf den Außenblättern der Weißkohlpflanzen in der Entwicklungsstufe 3.

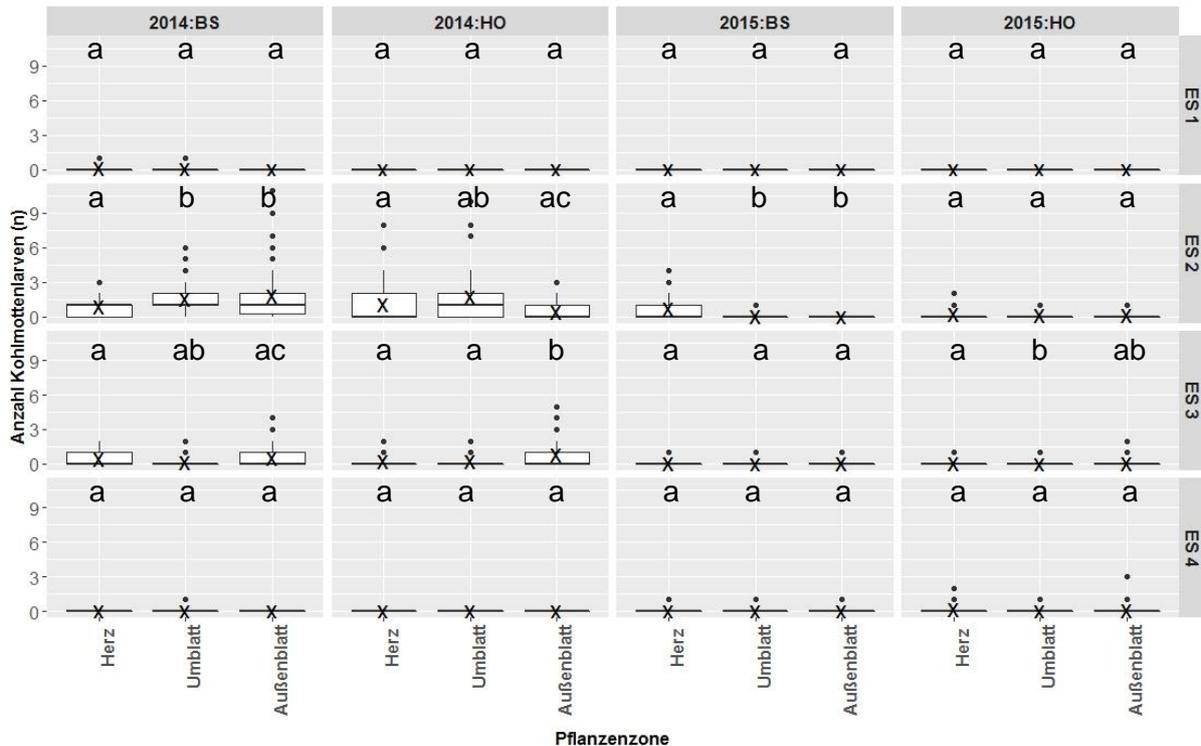


Abbildung 48: Absolute Verteilung der Larven der Kohlmotten an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangle BBCH 12-18, ES 2 \triangle BBCH 19-40, ES 3 \triangle BBCH 41-46, ES 4 \triangle BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=50$, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

Die Anzahl der Larven des Kleinen Kohlweißlings an den drei vertikalen Weißkohlpflanzenzonen variierte signifikant ausschließlich im Jahr 2014 an beiden Standorten (Abbildung 49). Im Jahr 2015 unterschied sich die Anzahl an Larven nicht signifikant an den unterschiedlichen Pflanzenzonen. Die Anzahl an Larven in Braunschweig war auf den Herz- ($p < 0,0001$) und Umblättern ($p = 0,0153$) signifikant niedriger im Vergleich zu den Außenblättern der Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 2. In Hötzum war die Anzahl an Larven auf den Umblättern signifikant höher im Vergleich zu den beiden anderen Pflanzenzonen der Weißkohlpflanzen im Entwicklungsstadium 2 (Herzblatt: $p = 0,0135$; Außenblatt: $p < 0,0001$). Des Weiteren war die Anzahl an Larven auf den Herzblättern signifikant niedriger im Vergleich zu den Umblättern ($p < 0,0001$) der Weißkohlpflanzen im Entwicklungsstadium 2. Auf den Herzblättern der Weißkohlpflanzen im Entwicklungsstadium 3 in Braunschweig waren 2014 signifikant mehr Larven im Vergleich zu den Um- ($p < 0,0001$) und Außenblättern ($p = 0,0004$).

3. Ergebnisse

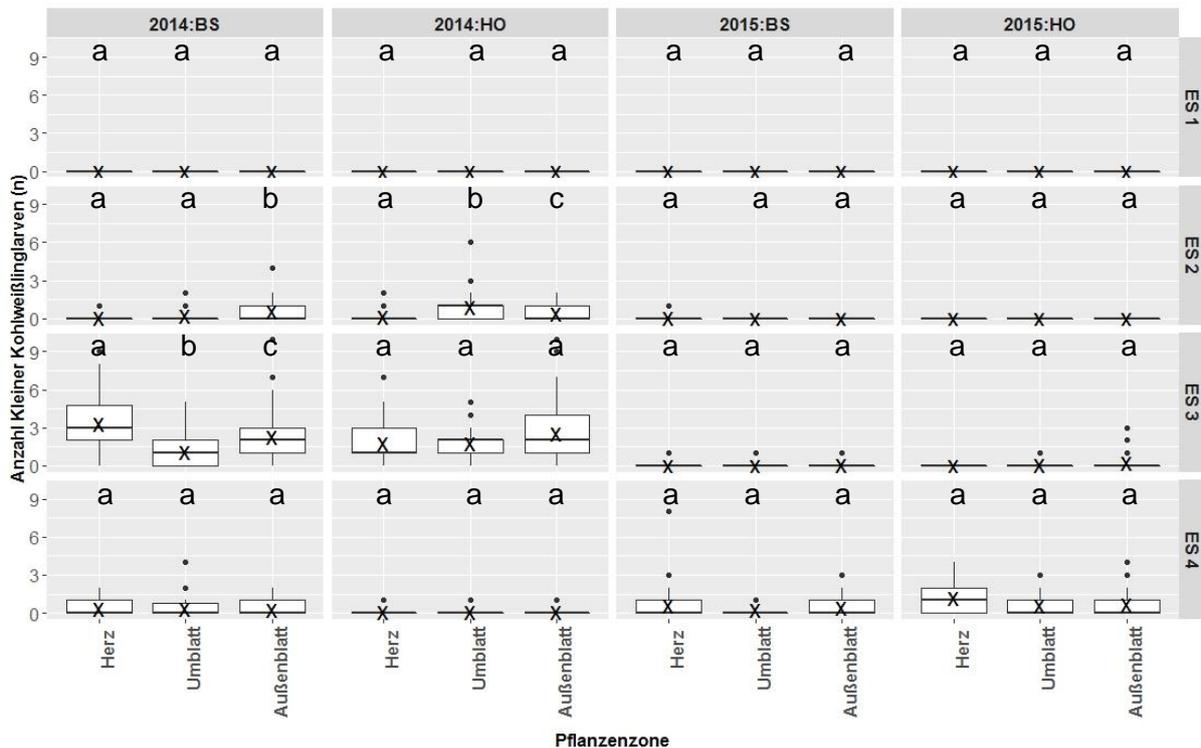


Abbildung 49: Absolute Verteilung der Larven des Kleinen Kohlweißlings an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

3.2.2.3 Untersuchungen zur Blattseitenpräferenz der Schmetterlingslarven auf einer Weißkohlpflanze im Bestand

Die Fragestellung der Untersuchung war, ob die Schmetterlingslarven sich eher auf der Blattoberseite aufhielten und so mittels optoelektronischer Systeme, wie z. B. Kamerasystemen (s. 3.1), erfasst werden können, oder auf der Blattunterseite. Hierbei wurden an beiden Orten über die 17 Termine, in allen Entwicklungsstadien und allen Pflanzenzonen im Jahr 2014 bis zu 56 % und im Jahr 2015 bis zu 60 % mehr Schmetterlingslarven auf den Blattunterseiten festgestellt (Tabelle 41).

Tabelle 41: Relative Häufigkeit der Schmetterlingslarven an verschiedenen Blattseiten einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Ort und Jahr (n=50)

Ort	Jahr	Blattseite	Anzahl der Schmetterlingslarven	Anteil der Schmetterlingslarven (%)
Braunschweig	2014	Blattoberseite	222	27
		Blattunterseite	609	73
	2015	Blattoberseite	127	44
		Blattunterseite	161	56
Hötzum	2014	Blattoberseite	150	22
		Blattunterseite	544	78
	2015	Blattoberseite	95	20
		Blattunterseite	370	80

Die Präferenz der Larven für eine bestimmte Blattseite unterschied sich je nach vertikaler Pflanzenzone (Abbildung 50). Im Herzbereich wurden in beiden Jahren an beiden

Standorten bei den akkumulierten Daten über 17 Termine sowie alle Entwicklungsstadien keine signifikanten Unterschiede zwischen der Anzahl an Larven auf der Blattunterseite und Blattoberseite festgestellt. Auch die Anzahl an Larven auf der Blattober- und Blattunterseite der Umblätter an beiden Standorten im Jahr 2015 unterschied sich nicht signifikant. Auf den Umblättern im Jahr 2014 an beiden Standorten sowie auf den Außenblättern in beiden Jahren an beiden Standorten war die Anzahl an Larven auf den Blattunterseiten signifikant ($p > 0,0001$) höher.

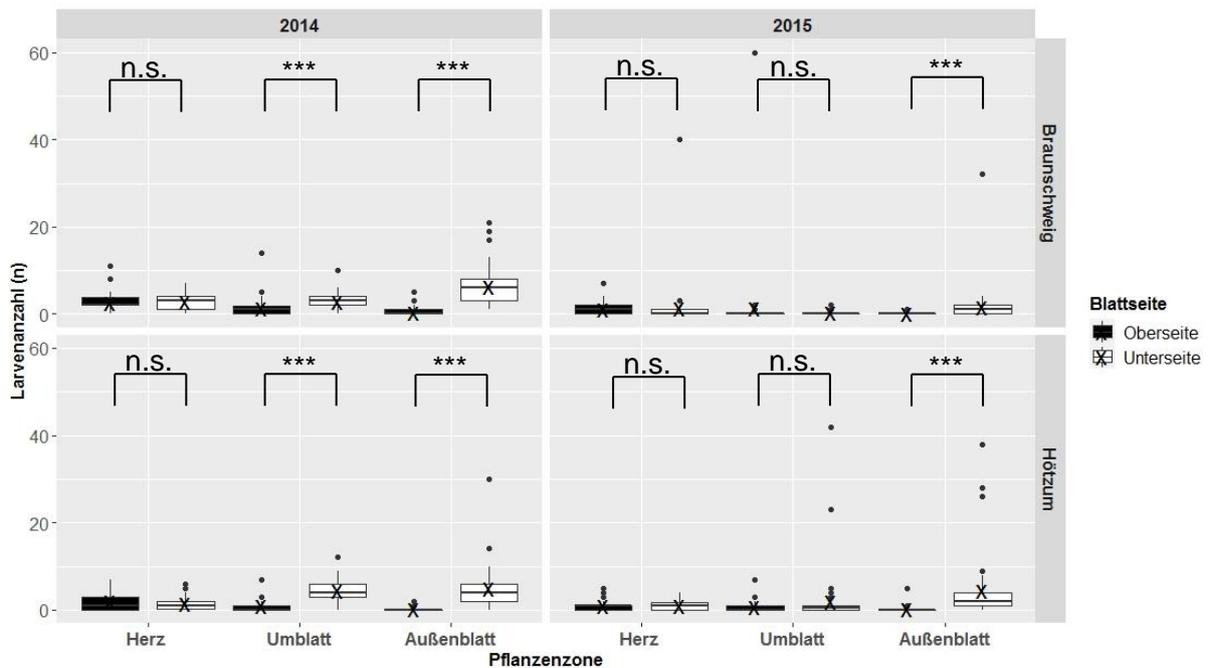


Abbildung 50: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit der vertikalen Pflanzenzonen, Jahr und Versuchsstandort. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine sowie die sechs unterschiedlichen Schmetterlingsarten und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: ** < 0,001; *** < 0,01; ** < 0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)**

Signifikante Unterschiede bei der Anzahl an Larven zwischen der Blattunter- und Blattoberseite über 17 Termine, vertikale Pflanzenzonen sowie allen Entwicklungsstadien wurden bei den Kohlmotten-, Kleinen Kohlweißling-, Kohleulen- und Gammaeulenlarven festgestellt. Die Anzahl an Kohlmottenlarven im Jahr 2014 an beiden Standorten sowie die Anzahl an Kleinen Kohlweißlinglarven an beiden Standorten in beiden Jahren auf der Blattunterseite war signifikant höher im Vergleich zur Anzahl an Larven auf der Blattoberseite. Die Anzahl an Larven auf der Blattunterseite und Blattoberseite vom Großen Kohlweißling und Kohlzünzler in beiden Jahren an beiden Standorten sowie die Anzahl an Kohlmotten- und Gammaeulenlarven in Braunschweig unterschieden sich nicht signifikant (Abbildung 51). In 2015 wurden in Hötzum signifikant mehr Kohleulen- und Gammaeulenlarven auf der Blattunterseite festgestellt.

3. Ergebnisse

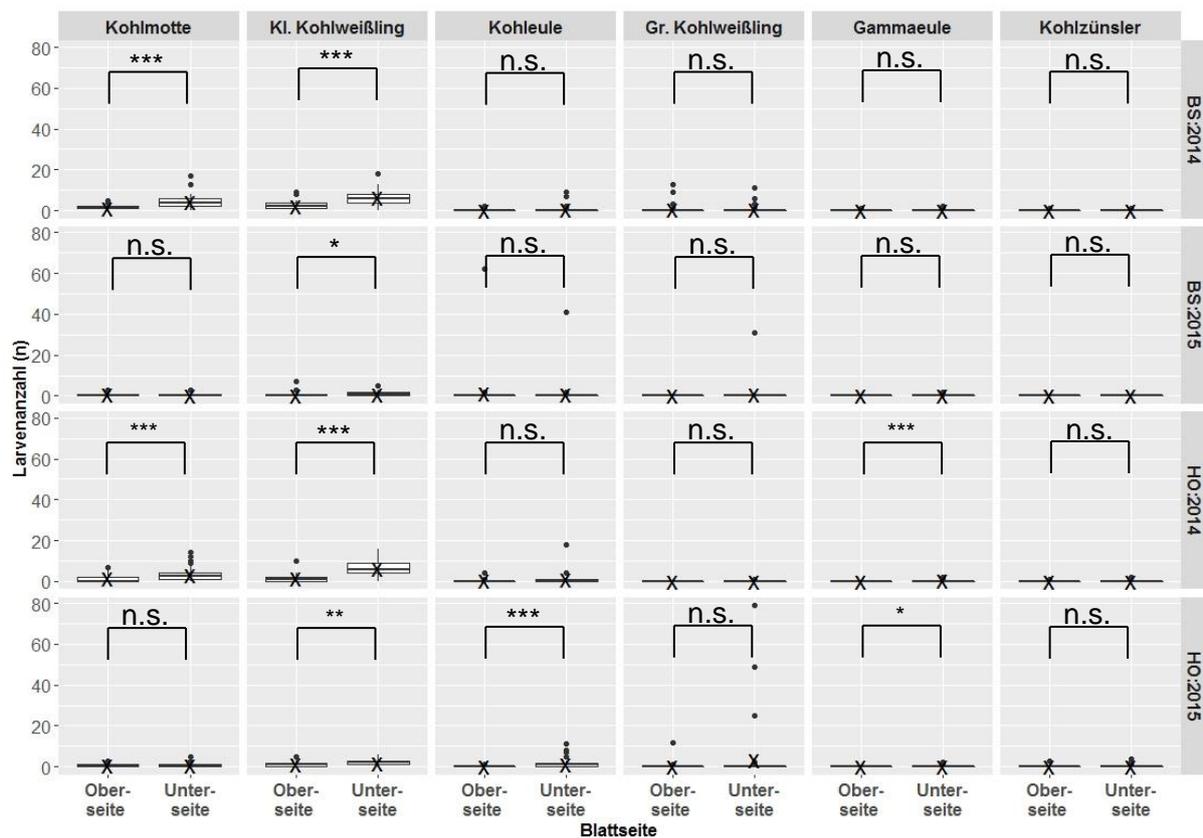


Abbildung 51: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Schmetterlingsart, Jahr und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Die Daten wurden für die Statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine sowie die vertikalen Pflanzenzonen und Entwicklungsstadien akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '**' < 0,001; '***' <0,01; '**' <0,05; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)**

Die Präferenz für eine bestimmte Blattseite einer Larve variierte je nach Schmetterlingsart und Entwicklungsstufe der Pflanze. Die Larven der Kohlmotten kamen gehäuft auf dem Weißkohl in Entwicklungsstufe 2 und 3 vor. Die Weißkohlpflanzen in Entwicklungsstufe 1 und 4 wiesen kaum Larven des Schädling auf (Abbildung 52). Bei der Pflanzenzone Herz befanden sich signifikant mehr Larven auf der Blattoberseite im Vergleich zur Blattunterseite. Bei den Pflanzenzonen Umblatt und Außenblatt der Weißkohlpflanzen befanden sich signifikant mehr Larven auf der Blattunterseite.

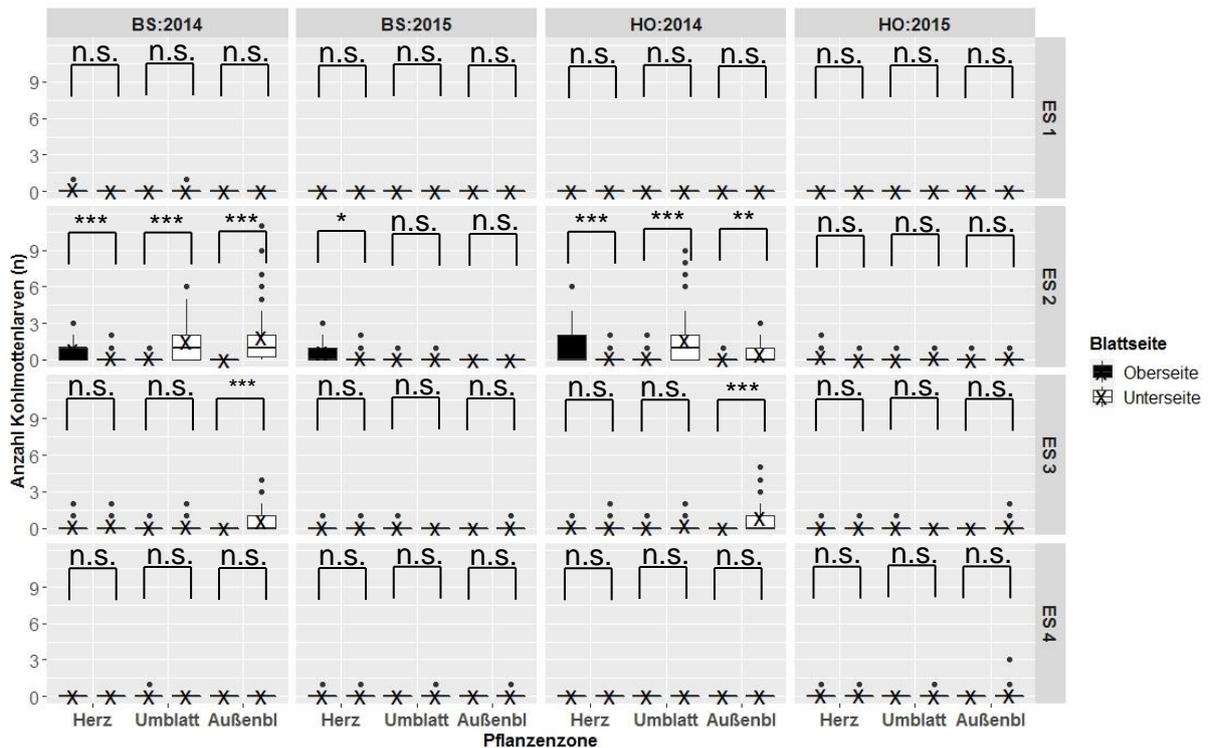


Abbildung 52: Absolute Verteilung der Kohlmottenlarven an Blattober- bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr, Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49). Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '**' <math>< 0,001</math>; '***' <math>< 0,01</math>; '**' <math>< 0,05</math>; n.s. = nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)**

Die Larven des Kleinen Kohlweißlings kamen gehäuft auf den Weißkohlpflanzen in den Entwicklungsstufen 2, 3 und 4 vor. Die Weißkohlpflanzen in Entwicklungsstufe 1 wiesen keine Larven des Kleinen Kohlweißlings auf (Abbildung 53). Bei signifikanten Unterschieden zwischen den unterschiedlichen Blattseiten der Herz-, Um- und Außenblättern kamen signifikant mehr Larven des Kleinen Kohlweißlings auf der Blattunterseite im Vergleich zur Blattoberseite vor.

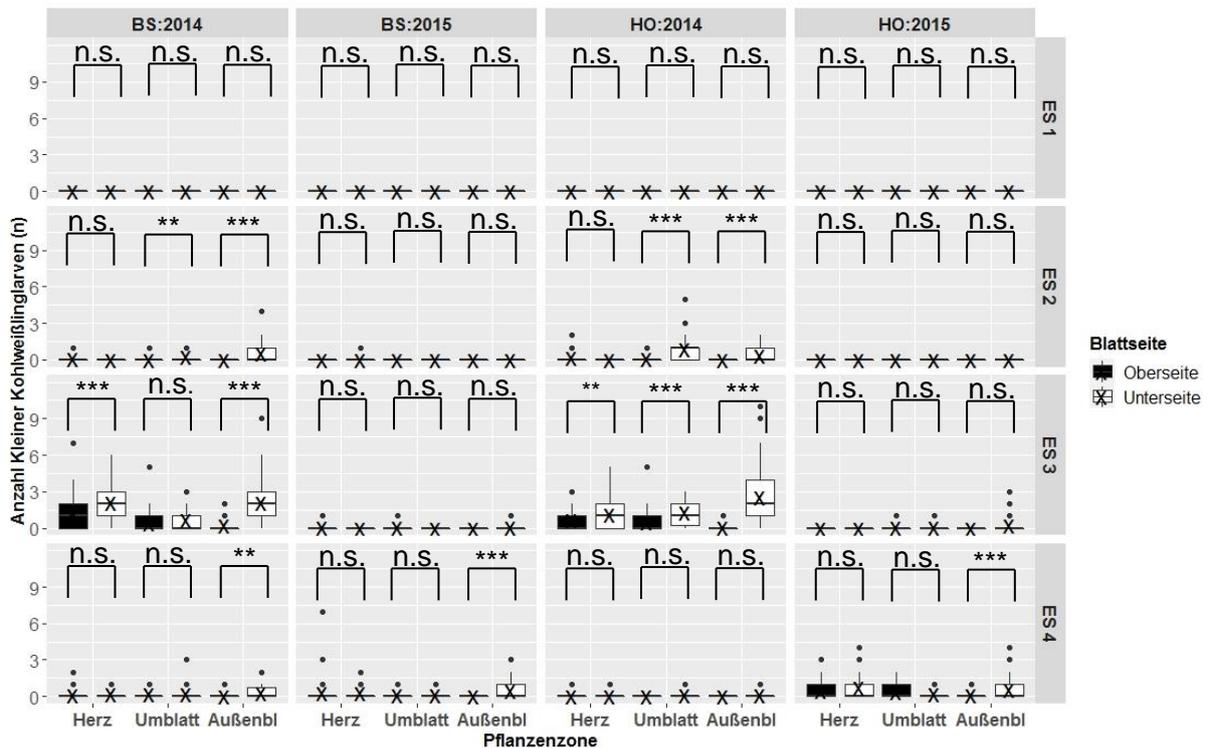


Abbildung 53: Absolute Verteilung der Kleinen Kohlweißlinglarven an Blattoberseite bzw. Blattunterseite einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von vertikalen Pflanzenzonen, Jahr, Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49). Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert (n=50, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: ** <math>< 0,001</math>; *** <math>< 0,01</math>; ** <math>< 0,05</math>; n.s.=nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)**

Bei den vier anderen Schmetterlingsarten (Kohleule, Gammaeule, Großer Kohlweißling bzw. Kohlzünsler) war die Anzahl an Larven relativ gering. Dies führte dazu, dass bei der Modellentwicklung der bedingte R^2 -Wert sehr niedrig war. Die Daten wurden dennoch statistisch ausgewertet (s. Anhang Tabelle 64; Abbildung 77 bis Abbildung 79). Hierbei konnten nur signifikante Blattbereichspräferenzen der Larven hauptsächlich auf den Außenblättern der Pflanzen im 2., 3. und 4. Entwicklungsstadium festgestellt werden. Auf den anderen Pflanzenzonen kamen die Schädlinge kaum vor. Bei den statisch signifikanten Vergleichen der Positionierung der Kohleulen-, Gammaeulen-, Großer Kohlweißling- bzw. Kohlzünslerlarven wurden signifikant mehr Schadinsekten auf der Blattunterseite der Außenblätter festgestellt.

3.2.2.4 Untersuchungen zur Erfassung der Schadschmetterlinge mittels konventioneller Pheromonlockstofffallen im Freiland

Ein wichtiger Bestandteil der Arbeit waren die technisch modifizierten Sexualpheromonlockstofffallen. Daher wurde zunächst untersucht, inwieweit die Anzahl an Adulten in den konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen mit der Anzahl an Kohlmotten- bzw. Kohleulenlarven sowie der Anzahl der Eigelege der Kohleulen im Bestand tatsächlich korrelierten. Hierfür fanden Versuche in den Jahren 2013, 2014 und 2015 in einem Weißkohlbestand auf zwei JKI-Versuchsflächen (s. 2.4.1) statt. Es wurde die Larvenanzahl

mittels Bestandskontrolle (s. 2.4.3.1) geschätzt und die Populationsdynamik der adulten Schadschmetterlinge anhand der entsprechenden konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen wie der Delta-Falle für die Kohlmotte sowie die Trichter-Falle für die Kohleule (s. 2.4.3.2) erfasst. Im Jahr 2013 fanden die Vorversuche in der KW 28 (09.07.2013) bis KW 40 (30.09.2013) statt. Pro Fläche wurde eine konventionelle Delta-Sexualpheromonlockstofffalle bzw. eine konventionelle Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle aufgestellt. Im Jahr 2014 und 2015 erfolgten die Versuche über einen längeren Zeitraum, von der KW 23 (02.06.2014 bzw. 01.06.2015) bis KW 40 (02.10.2014 bzw. 01.10.2015), mit zwei konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen und vier konventionellen Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen pro Fläche.

Im Jahr 2013 wurde in Braunschweig eine positive signifikante Korrelation zwischen der Anzahl an Kohlmottenlarven sowie der Anzahl an adulten Kohlmotten in den Delta-Sexualpheromonlockstofffallen festgestellt (Tabelle 42). In den Jahren 2014 und 2015 gab es statistisch zwischen der Zielvariablen (Larvenanzahl) und den Erklärungsvariablen (Jahr, Versuchsort sowie der Anzahl an Adulten) signifikante Unterschiede. Daher mussten die Daten von Braunschweig und Hötzum sowie für die Jahre 2014 und 2015 bei der Auswertung der Spearman-Rangkorrelation voneinander getrennt werden. In beiden Jahren an beiden Standorten wurde eine positive signifikante Korrelation zwischen der Larvenanzahl und der Anzahl an adulten Kohlmotten festgestellt. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman lag je nach Jahr und Ort zwischen 0,8214 (2014, Braunschweig) und 0,6339 (2015, Braunschweig). Das bedeutet, dass mit zunehmender Anzahl an Kohlmotten die Larvenanzahl anstieg (Tabelle 42). In den Delta-Sexualpheromonlockstofffallen kamen hauptsächlich Kohlmotten als Schadschmetterlinge vor.

Tabelle 42: Errechnete Korrelations-Koeffizienten sowie p-Werte nach Spearman (Signifikanzcodes: ** < 0,001; *** <0,01; ** <0,05; n.s.=nicht signifikant) zwischen der Larvenanzahl und männlichen Kohlmotten in den Jahren 2014 und 2015 an den Versuchsstandorten Braunschweig und Hötzum**

Ort	Jahr	Spearman-Koeffizient	p-Wert	Signifikanz
Braunschweig	2013	0,5775	0,01915	*
	2014	0,8214	9,01e-06	***
	2015	0,6339	0,002686	**
Hötzum	2013	0,4292	0,09708	n.s.
	2014	0,8051	1,853e-05	***
	2015	0,7946	2,857e-05	***

Im Jahr 2013 waren die Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen 50 cm über dem Gemüsebestand platziert. In diesem Jahr kamen im Gegensatz zu den Kohleulenlarven auf den Weißkohlpflanzen im Feld (Abbildung 45; Tabelle 39) keine adulten Kohleulen in den Sexualpheromonlockstofffallen vor, daher konnten die erhobenen Daten nicht statistisch ausgewertet werden.

In den darauffolgenden Jahren 2014 und 2015 wurden die Sexualpheromonlockstofffallen in einer Höhe von 1,2 m über dem Boden positioniert. Es wurden in beiden Jahren an beiden Versuchsflächen insgesamt 66 Kohleulen gefangen. Davon kamen in beiden Jahren 26 Kohleulenmännchen in Braunschweig und 40 Kohleulenmännchen in Hötzum vor. Des Weiteren wurden in beiden Jahren an beiden Versuchsflächen 28 Wespen, 4 Bienen,

3. Ergebnisse

5 Wiesenschnacken, 14 Große Grassbüscheleulen, 360 Hellrandige Erdeulen, 31 Meldenflureulen und zwei Feldmäuse als Beifang erfasst.

In den Jahren 2014 und 2015 gab es statistisch zwischen der Zielvariablen (Larvenanzahl bzw. Eigelegeanzahl) und den Erklärungsvariablen (Jahr, Versuchsort und der Anzahl an Adulten) signifikante Unterschiede. Daher mussten die Daten von Braunschweig und Hötzum sowie für die Jahre 2014 und 2015 bei der Auswertung der Korrelation voneinander getrennt werden. Bei der Auswertung der erhobenen Daten wurde mit der Spearman-Rangkorrelation ausschließlich im Jahr 2015 in Braunschweig eine positive signifikante Korrelation (Tabelle 43) zwischen der Larvenanzahl der Kohleulen und der Anzahl an männlichen Kohleulen festgestellt. Das bedeutet, dass mit zunehmender Anzahl an Kohleulen die Larvenanzahl anstieg. Alle anderen Korrelationsvergleiche waren nicht signifikant.

Tabelle 43: Errechnete Korrelations-Koeffizienten sowie p-Werte nach Spearman (Signifikanzcodes: ** < 0,001; *** <0,01; ** <0,05; n.s.=nicht signifikant) zwischen der Larvenanzahl bzw. Eigelegeanzahl der Kohleule und männlichen Kohleulen in den Jahren 2014 und 2015 an den Versuchsstandorten Braunschweig und Hötzum**

Ort	Jahr	Vergleich	Spearman-Koeffizient	p-Wert	Signifikanz
Braunschweig	2014	Raupen vs. Adulten	0,1697	0,4745	n.s.
	2014	Eigelege vs. Adulten	-0,2839	0,225	n.s.
	2015	Raupen vs. Adulten	0,5112	0,02123	*
	2015	Eigelege vs. Adulte	0,2281	0,3335	n.s.
Hötzum	2014	Raupen vs. Adulten	0,1296	0,5861	n.s.
	2014	Eigelege vs. Adulten	0,2689	0,2515	n.s.
	2015	Raupen vs. Adulten	-0,3520	0,128	n.s.
	2015	Eigelege vs. Adulte	-0,0989	0,6783	n.s.

Des Weiteren wurden die Abhängigkeit der Raupenanzahl der Kohleule zu männlichen Kohleulen sowie die Abhängigkeit der Eigelegeanzahl der Kohleulen zu männlichen Kohleulen im Zeitverlauf mit einer Kreuzkorrelation untersucht (s. Anhang Abbildung 80 bis Abbildung 83). Die Daten von Braunschweig und Hötzum sowie für die Jahre 2014 und 2015 wurden wegen der oben genannten Gründe bei der Auswertung der Korrelation getrennt voneinander ausgewertet.

Die zeitlich verzögerte Kreuzkorrelation wurde in 2015 in Braunschweig und 2014 und 2015 in Hötzum festgestellt (Tabelle 44). Die Anzahl der Eigelege korrelierte signifikant mit der Anzahl männlicher Kohleulen mit einer Zeitverzögerung je nach Jahr und Standort zwischen einer und sieben Wochen. 2015 in Braunschweig und 2014 in Hötzum stieg die Anzahl der Eigelege der Kohleule eine Woche nachdem die männlichen Kohlmotten vorkamen. 2015 in Hötzum stieg zunächst die Anzahl an Kohleulen-Eigelegen und sieben Wochen später stieg die Anzahl an männlichen Kohleulen.

Die Anzahl an Larven korrelierte signifikant mit der Anzahl männlicher Kohleulen mit einer Zeitverzögerung je nach Jahr und Standort zwischen drei und vier Wochen. 2015 in Braunschweig stieg die Anzahl der männlichen Kohleulen und drei bis vier Wochen später nahm die Anzahl an Larven zu. 2014 in Hötzum hingegen nahm die Anzahl an Kohleulenlarven zu und 3 Wochen später stieg die Anzahl an männlichen Kohleulen.

Tabelle 44: Ergebnisse des Kreuzkorrelationstests (ccf). Die Absolutwerte > 0,433 (Signifikanzwert) für bestimmte Zeitabschnitte wurden als signifikant (+) und < 0,433 als nicht signifikant (-) in Anhängigkeit von Versuchsjahr sowie Versuchsstandort bewertet. Erfasst wurden ausschließlich signifikante Korrelationen sowie die entsprechenden wöchentlichen Verzögerungen. Je höher die Differenz zwischen dem Absolut- und dem Signifikanzwert war, desto stärker war die Korrelation

Ort	Jahr	Vergleich	Signifikante Kreuzkorrelation	Korrelationswert	Zeitliche Verzögerung der Korrelation (Wochen)
Braunschweig	2014	Eigelege vs. Adulten	-	-	-
	2014	Raupen vs. Adulten	-	-	-
	2015	Eigelege vs. Adulte	+	0,883	1
	2015	Raupen vs. Adulten	+	0,618 - 0,632	3-4
Hötzum	2014	Eigelege vs. Adulten	+	0,448	1
	2014	Raupen vs. Adulten	+	0,632	3
	2015	Eigelege vs. Adulte	+	0,608	7
	2015	Raupen vs. Adulten	-	-	-

3.2.2.5 Untersuchungen zur Erfassung der Kohleulen mittels konventioneller Pheromonfallen unter kontrollierten Bedingungen

Im Jahr 2013 waren in den konventionellen Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen (Andermatt Biocontrol, Schweiz) unter Freilandbedingungen keine Kohleulen vorzufinden. Bei den Pflanzenbonituren wurden jedoch in der gesamten Anbausaison vom 03.06.2013 bis 28.10.2013 in Braunschweig 24 Eigelege sowie 240 Larven der Kohleulen im Weißkohl vorgefunden. Daher wurde in dem Zeitraum vom 01.12.2013 bis zum 19.03.2014 ein Versuch unter kontrollierten Bedingungen zur Fängigkeit der Trichter-Fallen von Andermatt Biocontrol sowie Csalomon mit den entsprechenden Pheromondispensern der jeweiligen Firma durchgeführt (s. 2.4.3.2).

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fallen sowie dem Reaktionsverhalten der Kohleulenmännchen auf den Sexualpheromondispensern der beiden Anbieter. Mittels der Csalomon Trichter-Falle wurde lediglich eine Kohleule mehr (Tabelle 45) in der Falle erfasst im Vergleich zu Andermatt Biocontrol.

Tabelle 45: Ergebnisse des Versuchs zur Fängigkeit der Trichter-Fallen und entsprechenden Pheromonen von dem Anbietern Andermatt Biocontrol (Schweiz) sowie Csalomon (Ungarn)

Wiederholung	Trichter-Fallen und Pheromon Anbieter	Gesamte Anzahl an freigelassenen Kohleulen	Gesamte Anzahl an Kohleulen in der Falle nach drei Wochen
1	Andermatt Biocontrol, Schweiz	12	0
2		20	1
1	Csalomon (Ungarn)	12	1
2		20	1

Mittels eines Camcorders wurde das Verhalten von insgesamt sechs Kohleulen (drei Kohleulen auf der Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle von Andermatt Biocontrol sowie drei Falter auf der Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle von Csalomon) dokumentiert. Das Verhalten der Falter auf der Csalomon Trichter-Falle ähnelte dem Verhalten der Falter auf der Andermatt Biocontrol Trichter-Falle. Nachdem das Licht ausgeschaltet wurde, landete jeweils ein Falter zielgerichtet auf einer Pheromon-Halterung im Fallendach und fing an, sich auf der Halterung hin und her zu bewegen (Abbildung 54). Die sechs Männchen hielten sich zwischen zwei und zu sechs Stunden auf der Pheromonhalterung auf (Abbildung 54). Keiner der mit Camcorder dokumentierten Falter ging bis nach unten in das Fangkörbchen der Falle

hinein. Innerhalb einer Nacht hielt sich höchstens ein Männchen pro Falle auf einer Pheromonhalterung auf. Dies entspricht den Befunden bei den Untersuchungen mit Z-Trap unter kontrollierten Bedingungen (3.3.1.2). Hierbei wurde auch festgestellt, dass die Männchen nicht direkt zu dem Pheromondispenser flogen, sondern sich neben dem Pheromondispenser mit schwirrenden und um die eigene Achse drehenden Bewegungen auf der Falle aufhielten (Abbildung 54).

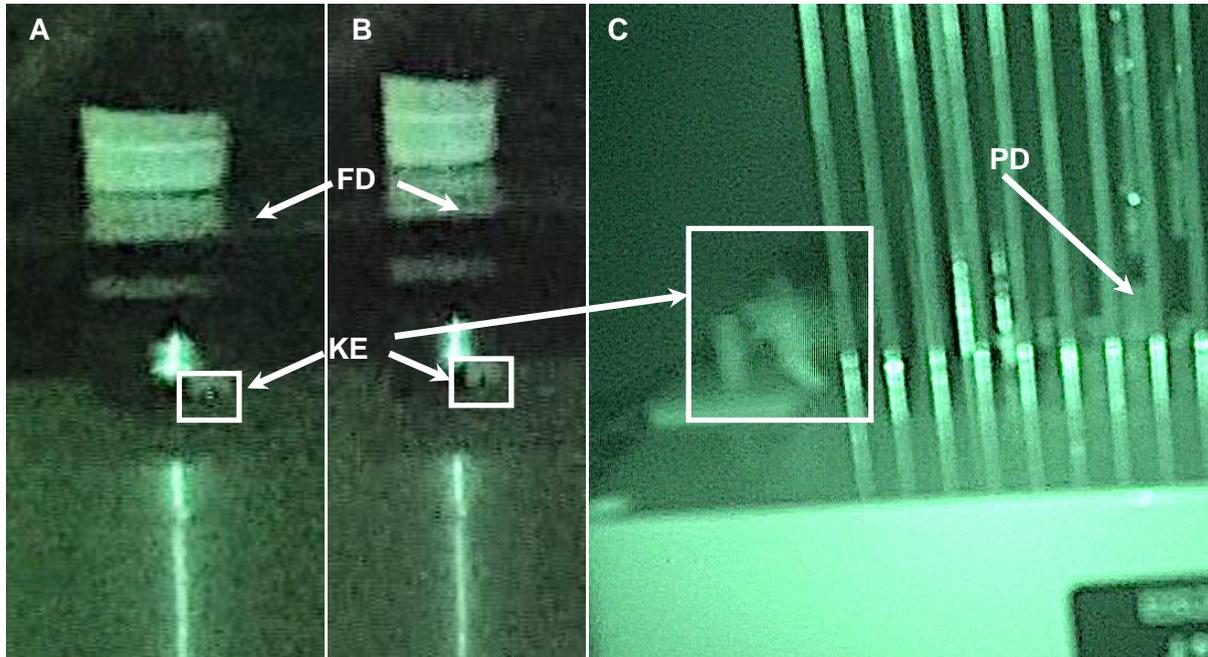


Abbildung 54: Falschfarbenbilder der Pheromonfallen mit Kohleulen (KE), welche mit einem Camcorder (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus mit deaktiviertem Infrarot-Sperrfilter erfasst wurden. Auf dem Bild (A) sind Kopf und die Augen und auf dem Bild (B) ein Bein einer Kohleule auf einer Pheromonhalterung am Fallendach (FD) der Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen von Csalomon durch weiße viereckige Umrandung hervorgehoben. Auf dem Bild (C) ist eine Kohleule mit schwirrenden und um die eigene Achse drehenden Bewegungen auf einem Z-Trap-Fallensystem (s. 3.3.1.2) neben einem Pheromondispenser (PD) durch weiße viereckige Umrandung hervorgehoben

3.2.3 Erfassung der Eiablage der Kleinen Kohlflye mittels Eimanschetten in der Anbausaison

Um den Einsatz der optoelektronischen Systeme auf einen bestimmten Zeitraum begrenzen zu können und um die Systeme zur richtigen Zeit testen zu können, wurde die Aktivität der Kleinen Kohlflye mittels Eiablagezahlen in den Eimanschetten (2.4.4) erfasst. In den Jahren 2013, 2014 und 2015 traten drei Generationen der Kleinen Kohlflye an beiden Standorten auf (Abbildung 55). Die Eiablage der Kleinen Kohlflye begann an beiden Standorten in den Jahren 2013, 2014 und 2015 Anfang bzw. Mitte April und dauerte bis etwa Anfang November an. Im Jahr 2013 kam es in der Kalenderwoche 21 zu Hochwasser auf beiden Versuchsfeldern.

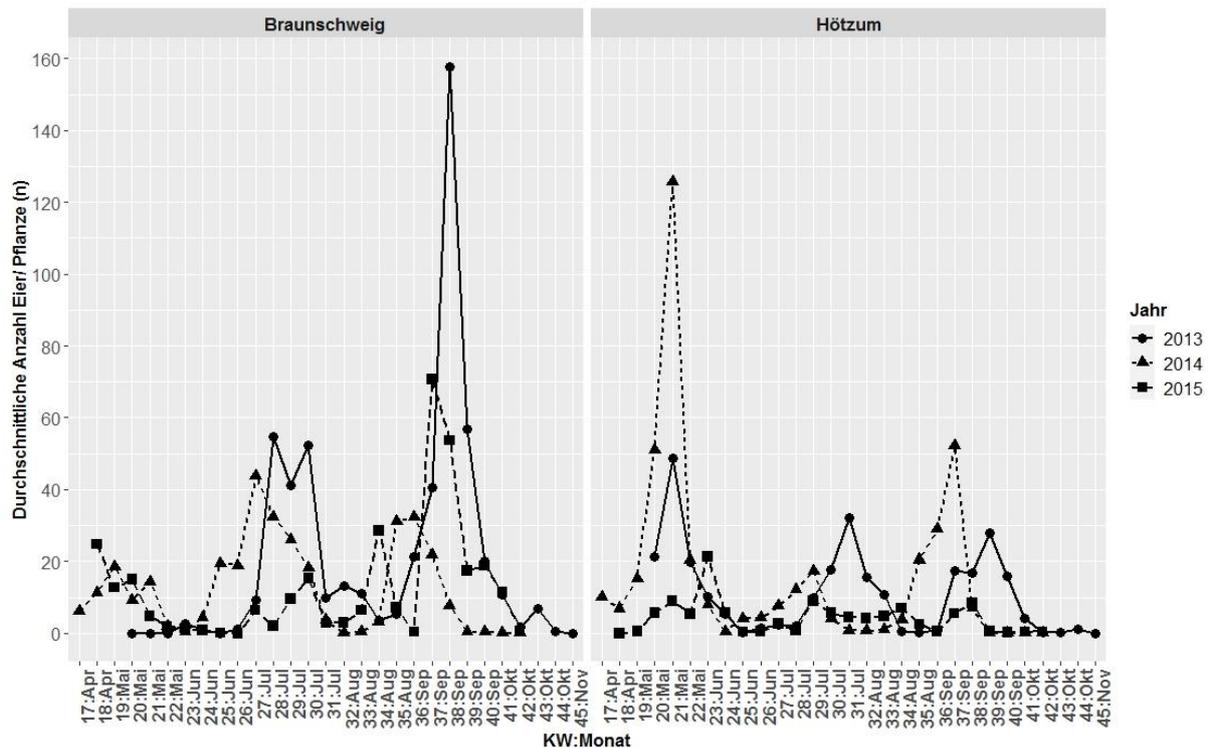


Abbildung 55: Kohlflegeneiablage in Eimanschetten an den Standorten Braunschweig und Hötzum in den Jahren 2013, 2014 und 2015

Der Zeitpunkt für die höchste Anzahl der Eier pro Saison unterschied sich je nach Jahr und Standort (Tabelle 46). Im Jahr 2013 wurden die meisten Eier der Kleinen Kohlflye in KW 38 (Mitte September) in Braunschweig, in 2014 in KW 21 (Mitte Mai) in Hötzum und in 2015 in KW 37 (Anfang September) in Braunschweig festgestellt. In Braunschweig wurden je nach Jahr entweder Anfang Juli oder Mitte September die meisten Eier abgelegt. In Hötzum hingegen wurden die meisten Eier der Saison Mitte Mai (KW 21) bzw. Anfang Juni (KW 23) erfasst.

Tabelle 46: Maximale mittlere Anzahl abgelegter Eier in einer Saison in Abhängigkeit von Ort und Jahr

Ort	Jahr	Zeitpunkt der Eiablage	KW	Durchschnittliche Anzahl Eier pro Pflanze
Braunschweig	2013	16.09	38	158
	2014	01.07	27	44
	2015	09.09	37	71
Hötzum	2013	19.05	21	49
	2014	19.05	21	126
	2015	02.06	23	21

3.2.3.1 Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye im Tagesablauf

Um Speicherplatz zu sparen und den Energieverbrauch der optoelektronischen Systeme zu reduzieren, sollten die entwickelten Systeme zu einer bestimmten Uhrzeit aktiviert bzw. deaktiviert werden. Nach Literatur (Hawkes 1974; Zohren 1968) werden die meisten Eier zur einer bestimmten Uhrzeit am Tag abgelegt. Jedoch schwankt die Uhrzeit mit höchster Eiablageaktivität je nach Literatur zwischen Vormittag und Abend. Daher wurde bei der Arbeit die Oviposition der Kleinen Kohlflye im Tagesverlauf mittels Eimanschetten im zweistündigen Abstand überprüft. Die Versuche fanden 2013 und 2014 statt. 2013 wurde die

3. Ergebnisse

Anzahl der Kleinen Kohlflegeneier an vier Terminen erfasst, 2014 wurde die Anzahl der Eier an zwei Terminen gezählt. Zwischen den Jahren und Tagen gab es statistisch signifikante Unterschiede, daher wurden diese getrennt voneinander statistisch ausgewertet. Die Uhrzeit des Sonnenaufgangs, des Sonnenuntergangs sowie die Tageslänge variierten je nach Datum (Tabelle 47).

Tabelle 47: Tagesspezifische Merkmale der sechs Boniturtermine, an denen das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye erfasst wurde

Datum	Tagesspezifische Zeiten (Stunden: Minuten)					
	16.07.2013	22.07.2013	12.09.2013	13.09.2013	02.09.2014	03.09.2014
Tagesdauer	16:16	16:01	12:52	12:48	13:33	13:29
Sonnenaufgang	5:18	5:26	6:50	6:52	6:33	6:35
Sonnenuntergang	21:28	21:27	19:42	19:40	20:06	20:04

Sowohl im Jahr 2013 als auch im Jahr 2014 wurden während der Dunkelphase (zwischen 20 und 6 Uhr) fast keine Eier abgelegt. Der Anteil an abgelegten Eiern betrug zu dieser Zeit höchstens 3 % (Tabelle 48). Des Weiteren wurde festgestellt, dass zwischen acht und zehn Uhr der Anteil an abgelegten Eiern geringer war als zu anderen Uhrzeiten. Dies war unabhängig von den spezifischen Tagesmerkmalen wie Tagesdauer, Sonnenaufgang oder Sonnenuntergang.

Tabelle 48: Anteil an abgelegten Eiern zu einem bestimmten Datum zu einem bestimmten Zeitpunkt auf dem Versuchsfeld in Braunschweig

Zeitabschnitt (h)	Anteil abgelegter Eier der Kleinen Kohlflyen zu einem bestimmten Termin (%)					
	16.07.2013	22.07.2013	12.09.2013	13.09.2013	02.09.2014	03.09.2014
20-6	0	0	0	0	3	0
6-8	11	5	0	0	1	2
8-10	12	8	2	1	7	2
10-12	36	3	5	12	27	7
12-14	4	6	16	29	4	8
14-16	2	4	35	34	17	24
16-18	27	1	35	17	23	25
18-20	8	74	8	6	19	31

In der Zeit zwischen acht und zehn Uhr betrug der Anteil der abgelegten Eier höchstens 12 %. An vier von den sechs Terminen wurden statistisch signifikant mehr Eier zwischen 14 und 20 Uhr im Vergleich zu dem allgemeinen Mittelwert des jeweiligen Tages festgestellt. Der Anteil an abgelegten Eiern in dem Zeitraum lag zwischen 57 % (13.09.2013) und 80 % (03.09.2013). Am 02.09.2014 wurden zwar keine statistischen Signifikanzen festgestellt, jedoch betrug der Anteil an abgelegten Eiern in dem Zeitraum zwischen 14 und 20 Uhr 59 %. Am 16.07.2013 wurden statistisch signifikant mehr Eier zwischen 10 und 12 Uhr festgestellt (Abbildung 56; Tabelle 48).

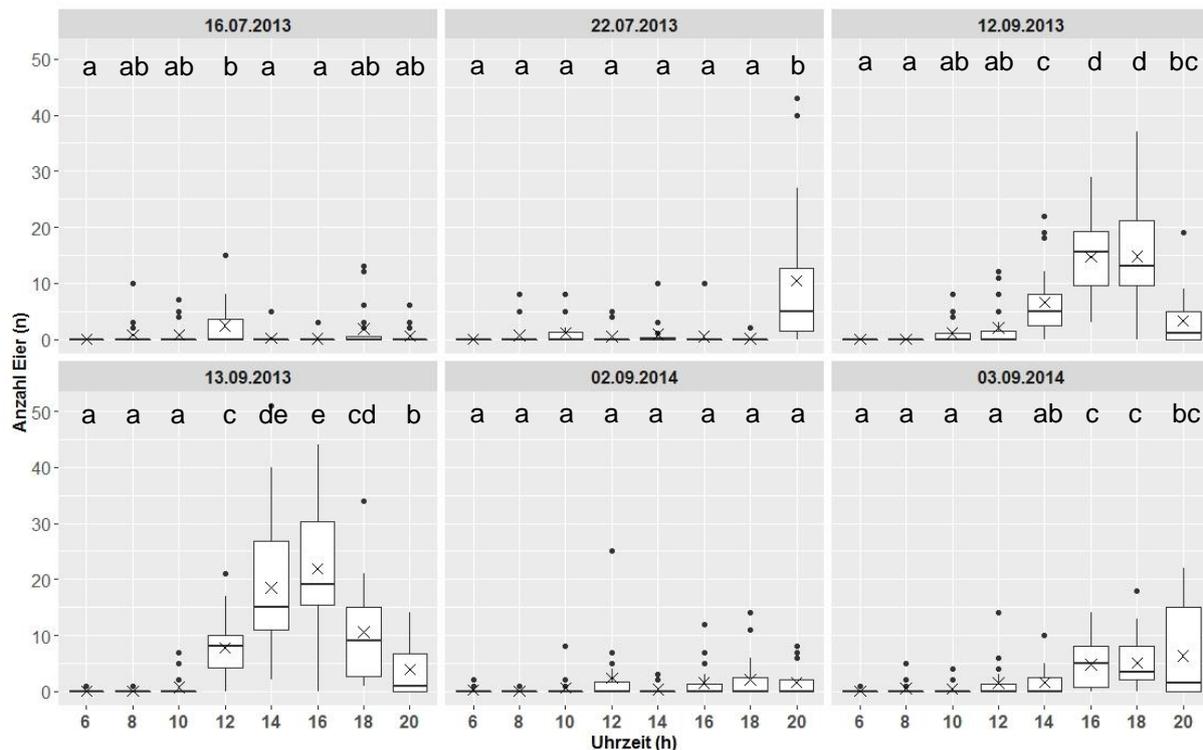


Abbildung 56: Einfluss der Uhrzeit auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye an vier Terminen in 2013 und zwei Terminen 2014 auf dem Versuchsfeld in Braunschweig. Die Bonitur der Eimanschetten erfolgte von 6 Uhr morgens bis 20 Uhr abends in zweistündigem Abstand. Zwischen 20 und 6 Uhr wurde nicht bonitiert. Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=20$, Imer, MCP, \bar{x} = arithmetisches Mittel)

3.2.4 Erfassung der Kohldrehherzgallmücke mittels konventioneller Sexualpheromonfallen

Ziel des Versuches war es, die Flugdynamik der Kohldrehherzgallmücken anhand der konventionellen Tetra-Sexualpheromonlockstofffallen auf den Versuchsflächen in Braunschweig und Hötzum zu erfassen. Die erfassten Daten fungierten als Referenzwerte für die untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme.

Anhand der erhobenen Daten wurde festgestellt, dass der Kohldrehherzgallmückenbefall je nach Jahr und Standort variierte (Abbildung 57). Im Jahr 2013 lag der Schädlingsbefall bei maximal 150 Kohldrehherzgallmücken pro Falle in Braunschweig und bei maximal 327 Kohldrehherzgallmücken pro Falle in Hötzum am 08.08.2013 (KW 32). Pro Jahr gab es bis zu vier Generationen. Von der ersten bis zur zweiten Generation dauerte es drei bis vier Wochen.

3. Ergebnisse

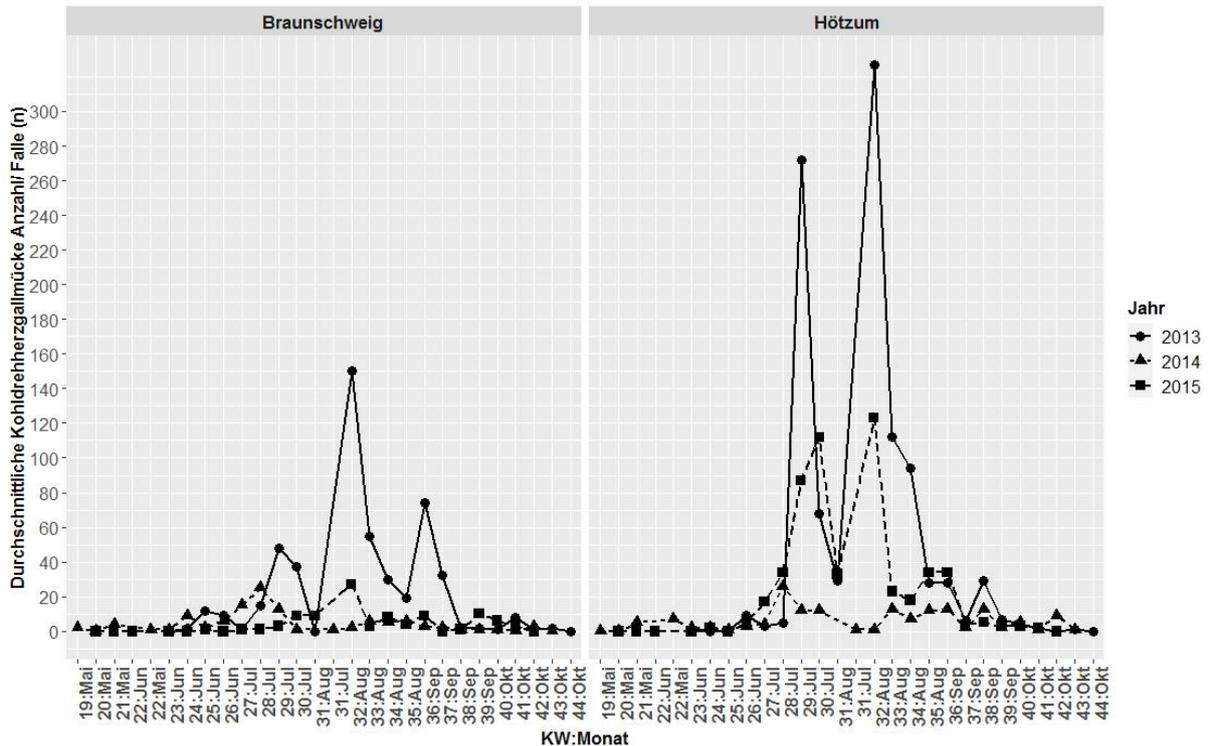


Abbildung 57: Anzahl der Kohldrehherzgallmücken in den Tetra-Fallen (Andermatt Biocontrol) an den Standorten Braunschweig und Hötzum in den Jahren 2013, 2014 und 2015

Die meisten Männchen der Kohldrehherzgallmücken wurden in dem Versuchszeitraum zwischen der KW 28 und KW 39 mit Sexualpheromonlockstofffallen erfasst (Tabelle 49). In Hötzum wurden im Jahr 2015 im Vergleich zu Braunschweig 92 % mehr Männchen in den Sexualpheromonlockstofffallen festgestellt.

Tabelle 49: Maximale mittlere Anzahl gefangener Kohldrehherzgallmücken pro Sexualpheromon-Falle einer Saison in Anhängigkeit vom Ort und Jahr

Ort	Jahr	Datum	KW	Durchschnittliche Anzahl Kohldrehherzgallmücken pro Pflanze
Braunschweig	2013	08.08	32	150
	2014	07.07	28	25
	2015	28.09	39	10
Hötzum	2013	08.08	32	327
	2014	07.07	28	26
	2015	10.08	32	123

Der erfasste Anteil an geschädigten Pflanzen in Hötzum unterschied sich je nach Kohlgemüsezüchtform. Der Anteil an Weißkohlpflanzen mit Kohldrehherzgallmückensymptomen betrug in den zwei Jahren (2014 und 2015) maximal 3 %, der Anteil an Brokkolipflanzen mit Symptomen variierte je nach Jahr und Brokkolisatz und lag zwischen 5 % und 91 % (Abbildung 58; Tabelle 50).

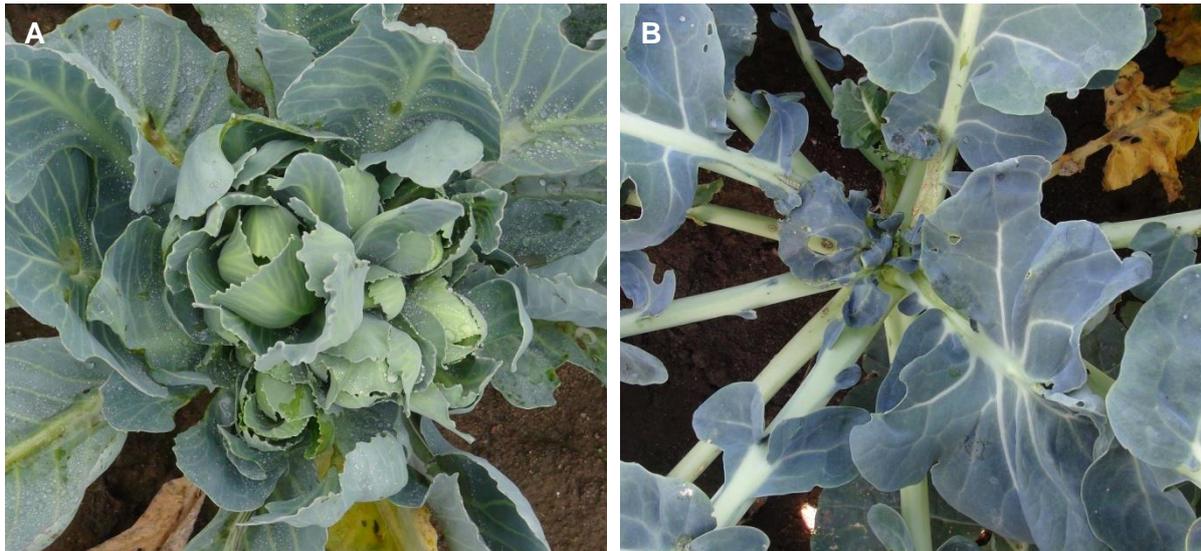


Abbildung 58: Schäden an (A) Weißkohlpflanzen und (B) Brokkolipflanzen, die durch Kohldrehherzgallmücken verursacht wurden

Besonders hoch war der Anteil an Brokkolipflanzen mit Kohldrehherzgallmückensymptomen in beiden Jahren an Pflanzen, die um den 23.06. (2014 und 2015) ausgepflanzt wurden (Tabelle 50; Tabelle 9).

Tabelle 50: Anteil an Brokkolipflanzen mit Kohldrehherzgallmückensymptomen in Hötzum in den Jahren 2014 und 2015 an Pflanzen, die zu unterschiedlichen Terminen ausgepflanzt wurden

Brokkolisatz	Anteil an Pflanzen mit Kohldrehherzgallmückensymptomen	
	2014	2015
3.	53	30
4.	63	91
5.	13	81
6.	5	28

3.2.5 Betriebswirtschaftliche Betrachtung der konventionellen Überwachungsmethoden

Um die optoelektronischen Methoden bewerten zu können, wurden der Zeitaufwand sowie die Materialkosten der drei gängigen konventionellen Überwachungsmethoden im Kohlanbau ermittelt (Tabelle 51). Bei den gängigen konventionellen Überwachungsmethoden im Kohlanbau handelte es sich um eine Bestandskontrolle, Sexualpheromonlockstofffallen und Eimanschetten. Da die Personalkosten schwer abschätzbar sind, werden diese in der Arbeit nicht berücksichtigt. Die Insektengröße (s. 1.1.1) variierte im Versuchszeitraum je nach Insektenart zwischen 1 mm (Kohldrehherzgallmücke) und 50 mm (Schadschmetterlinge). Je kleiner ein Schadinsekt war, desto aufwendiger war die Boniturmethode. Die genaue Anzahl von Kohldrehherzgallmücken auf einem Klebeboden einer Sexualpheromon Tetra-Falle wurde unter einem Stereomikroskop ermittelt. Die Auszählung von Schadschmetterlingslarven, Mehligen Kohlblattläusen, Schadschmetterlingen in den Sexualpheromonlockstofffallen und Kleinen Kohlfliegeneiern erfolgten auf dem Versuchsfeld. Je nach Überwachungsmethode dauerte die Kontrolle aller Pflanzen bzw. Fallen in einem Kohlgemüsebestand ohne Wartungsmaßnahmen durch eine Person innerhalb einer Woche ohne die Fahrt maximal 13 Stunden. Davon wurden vier Stunden für die Bestandskontrolle

(mit 50 Pflanzen), drei Stunden für die Eimanschettenkontrolle (zwei Mal in der Woche je 20 Stück) und drei Stunden für die Kontrolle aller Pheromonfallen (2 Delta-Fallen, 4 Trichter-Fallen und zwei Tetra-Fallen je zwei Mal in der Woche) in der Woche pro Feld benötigt.

Beim Einsatz von Fallen mussten diese wöchentlich kontrolliert und in bestimmten Zeitabständen gewartet werden, um repräsentative Werte zur Flugdynamik zu erhalten. Der Aufwand einer Fallenwartung pro Feld lag insgesamt bei maximal 2,5 Stunden. Der Wechsel der Eimanschetten betrug 1,5 Stunden (20 Stück) und eine Stunde wurde für die Wartung von acht Pheromonfallen benötigt.

Die Materialkosten variierten je nach Überwachungsmethode und Schädlingsart. Pro Anbausaison und Fläche lagen diese zwischen 0 € (Bestandskontrolle) und 475 € (Kohldrehherzgallmücke) (Tabelle 51). Das Intervall zwischen den Kontrollterminen der Fallen bzw. Pflanzen kann je nach Methode zwischen 4 Tagen (Pheromonfallen) und 14 Tagen (Bestandskontrolle) liegen.

Tabelle 51: Im Versuchszeitraum eingesetzte Überwachungsmethoden und der damit verbundene Zeitaufwand und Materialkosten (ÜM = Überwachungsmethoden, BSK = Bestandskontrolle, SPF = Sexualpheromonlockstofffallen, EM = Eimanschetten)

ÜM	Fallen-Typ	Schädlingsart	Dauer der Fallenkontrolle bei geringem – hohem Befall/Falle bzw. Pflanze (min)	Kontrollenanzahl der Methode/ 14 Tage	Art der Wartung	Dauer der Wartung/ Falle und Termin (min)	Anzahl bestimmter Wartungen/ Saison	Materialkosten/ Fallen-Typ (€)	Materialkosten/ Fallen {Fläche} pro Jahr (€)	Empfohlene Anzahl Fallen bzw. Pflanzen/ ha	Literatur
BSK	-	Mehlige Kohlblattlaus und Schadschmetterlinge	1-5	1-2	-	-	-	0	0	25 bis 50 Pflanzen	Forster et al. 1992 Freuler et al. 1991a
SPF	Delta-Falle	Kohlmotte	1-5	2-4	Pheromonwechsel (mit Anziehen der Handschuhe) Klebeboden Wechsel	5 2	6 9	3,90 (Falle) + 2,20 (Leimboden) + 1,60 (Pheromon Dispenser) = 8	33,30 {66,60}	2	Andermatt Biocontrol 2013; Freuler et al. 1991a
	Trichter-Falle	Kohleule	1-5	2-4	Pheromonwechsel (mit Anziehen der Handschuhe) Wechsel der Bänder zum Abtöten der Falter	5 2	6 3	5,50 (Falle) + 3 (Pheromon-Dispenser) + 3,50 (zum Abtöten der Falter) = 9	34 {68}	2	Andermatt Biocontrol 2013; Freuler et al. 1991a
	Tetra-Falle	Kohldrehherz-gallmücke	5-15 (ohne die Fahrt)	2-4 49	Pheromonwechsel (mit Anziehen der Handschuhe) Klebeboden Wechsel	5 2	6 49	5,50 (Falle) + 1 (Leimboden) + 24 (Pheromon Dispenser) = 30,50	237,50 {475}	2 2	Sauer und Fährndrich 2010
EM	Eimanschetten	Kleine Kohlflyge	1-5	2-4	Eimanschetten von der alten Pflanze abmachen und an einer jüngeren Pflanze anbringen	5	6	2,13	12,80 {255,60}	20-25	Ester 1993 Freuler et al. 1991a

3.3 Erprobung von optoelektronischen Sensoren zur Detektion der geflügelten adulten Kohlschädlinge

Eine der Möglichkeiten, den Befall eines Schadorganismus im Bestand schätzen zu können, ist die Erfassung von geflügelten Adulten und der damit verbundenen Flugdynamik (s. 1.1.2). Im Versuchszeitraum von 2013 bis 2015 wurde der Einsatz der optoelektronischen Sensorsysteme, die leicht zu handhaben waren und die entweder zum Teil oder ganz automatisiert waren, zur Erfassung von geflügelten Schadinsekten aus den Ordnungen Zweiflügler und Schmetterlinge untersucht. Sechs optoelektronische Sensorsysteme wurden entweder im Bestand auf dem Feld oder unter kontrollierten Bedingungen geprüft.

3.3.1 Digitale Pheromonfallensysteme

Im Versuchszeitraum wurde die Eignung der drei digitalen Sexualpheromonlockstofffallensysteme zur automatischen Erfassung der Kohleule, Kohlmotte und Kohldrehherzgallmücke untersucht. Im Folgenden wird zunächst auf die Ergebnisse mit dem TrapView-Fallensystem (Efos, Slowenien) eingegangen, dann auf das Z-Trap Fallensystem (Spensa Technologies by DTN, USA) und im Anschluss auf das Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück.

3.3.1.1 TrapView

Zum Zeitpunkt der Arbeit wurde das digitale TrapView-Fallensystem (Efos, Slowenien) im Obstbau zur Erfassung des Apfelwicklers (*Cydia pomonella* L.) eingesetzt. Da das Fallensystem eine andere Farbe und eine andere Bodenflächengröße hat, wurde zunächst überprüft, ob die TrapView zur Detektion der Kohleule, der Kohldrehherzgallmücke oder der Kohlmotte grundsätzlich eingesetzt werden konnte. Hierfür wurden die Fänge der konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen mit denen des TrapView-Fallensystems verglichen.

Die Detektion der Kohleule und der Kohldrehherzgallmücke funktionierte mit diesem Fallensystem nicht. Im Versuchszeitraum vom 03.06.2013 bis 25.07.2013 wurden keine Kohleulen in dem Fallensystem, jedoch zehn Eigelege und 154 Kohleulenlarven im Weißkohlbestand festgestellt. Im Fall der Kohldrehherzgallmücke wurden in dem Erprobungszeitraum vom 29.07.2013 bis 12.08.2013 in einer konventionellen Tetra-Falle bis zu 147 Mücken und in dem TrapView-Fallensystem nur eine Mücke festgestellt. Des Weiteren waren die Mücken auf dem Monitor schwer erkennbar. Die Kameraauflösung von 2 Mpx war zur Erkennung und Bestimmung des Schädlings auf dem Computermonitor nicht ausreichend. Daher fanden keine weiteren Versuche zur Erfassung der Kohleulen oder Kohldrehherzgallmücken mit dem Fallensystem statt.

Kohlmotten konnten hingegen mit dem TrapView-Fallensystem detektiert werden. Aus den oben genannten Gründen wurde die Falle in den Jahren 2014 und 2015 allein zur

Überwachung der Populationsdynamik der Kohlmotte eingesetzt. 2013 wurde beobachtet, wie sich die Kohlmotten nach einem Tag von einem mitgelieferten Klebeboden wieder befreit haben, da die Klebekraft der Klebeböden nicht ausreichend war. Daher wurde in dem Jahr und den folgenden Jahren die Klebestärke der Klebeböden durch einen zusätzlichen Aufstrich mit handelsüblichem Insektenleim verstärkt. Im Zeitraum von 05.05.2014 bis 10.10.2014 waren insgesamt zwei Fallen für die Versuche verfügbar. Im Zeitraum vom 04.05.2015 bis 09.10.2015 wurden insgesamt vier TrapView-Fallensysteme getestet. 2014 waren die zwei TrapView-Fallen 158 Tage in einem Kohlgemüsefeld aktiv. An zwei Tagen davon war die Übermittlung von Daten eines TrapView-Fallensystems gestört, sodass anstatt der möglichen 1264 Fotos nur 1256 Fotos ausgewertet wurden. Die Störung resultierte aus dem verbrauchten Datenvolumen. 2015 waren die vier Fallen 159 Tage in einem Kohlgemüsefeld aktiv. Es kam bei keiner der Fallen zu Störungen bei der Datenübertragung, so dass 2544 Fotos von dem System erfasst wurden. Sowohl im Jahr 2014 als auch 2015 wurden von dem System 0 % bis zu 75 % der Kohlmotten automatisch erkannt. Die Fehlerquote des Bildverarbeitungsprogramms von dem System variierte sehr stark. Anhand der Abbildung 59 bis Abbildung 61 ist zu sehen, wie sich die TrapView-Oberfläche des Accounts mit den Jahren verändert hat.



Abbildung 59: Vier TrapView Fotos aus 2013, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und manuell korrigiert wurden. Die Kohleulen sind durch grüne Vierecke hervorgehoben

Der Erfolg der automatischen Erkennung der Motten hing stark davon ab, ob viele andere Insektenarten auf dem Klebeboden vorkamen (Abbildung 60; Abbildung 61). Die Nachkorrektur der Ergebnisse erfolgte problemlos, da die Motten gut auf dem Monitor erkennbar waren. Die Position der nachkorrigierten Motten wurde von dem System gespeichert.

3. Ergebnisse

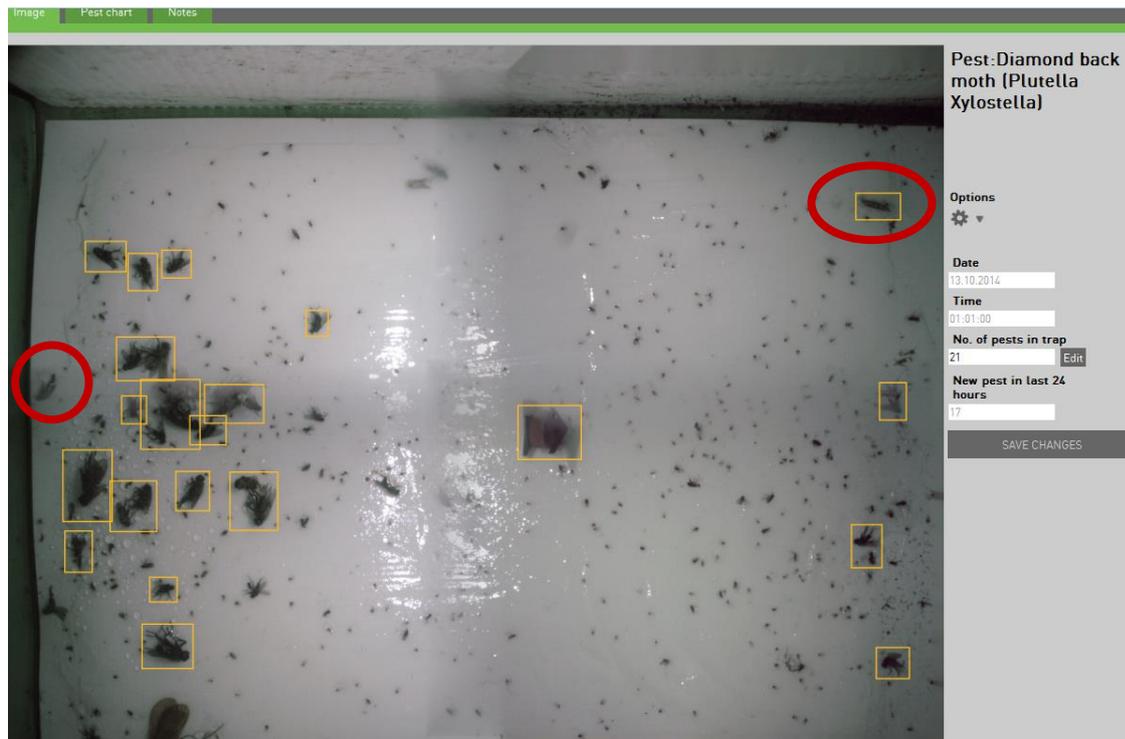


Abbildung 60: Vier TrapView Fotos aus 2014, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammgelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den 21 markierten Schädlingen wurden zwei Kohlmotten identifiziert (rot hervorgehoben). Eine Kohlmotte wurde von dem System richtig markiert. 20 Markierungen waren falsch



Abbildung 61: Vier TrapView Fotos aus 2015, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammgelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den vier Kohlmotten auf den Bildern wurden drei von dem System markiert. Eine Kohlmotte wurde von dem System nicht erkannt (rot hervorgehoben)

Die von dem System markierten Falter waren durch gelbe Vierecke hervorgehoben (Abbildung 62) nach der Korrektur färbten sich alle Vierecke auf den Bildern grün. Die Anzahl

an hervorgehobenen Flächen wurde von dem Programm, welches zu dem System gehört, gezählt.

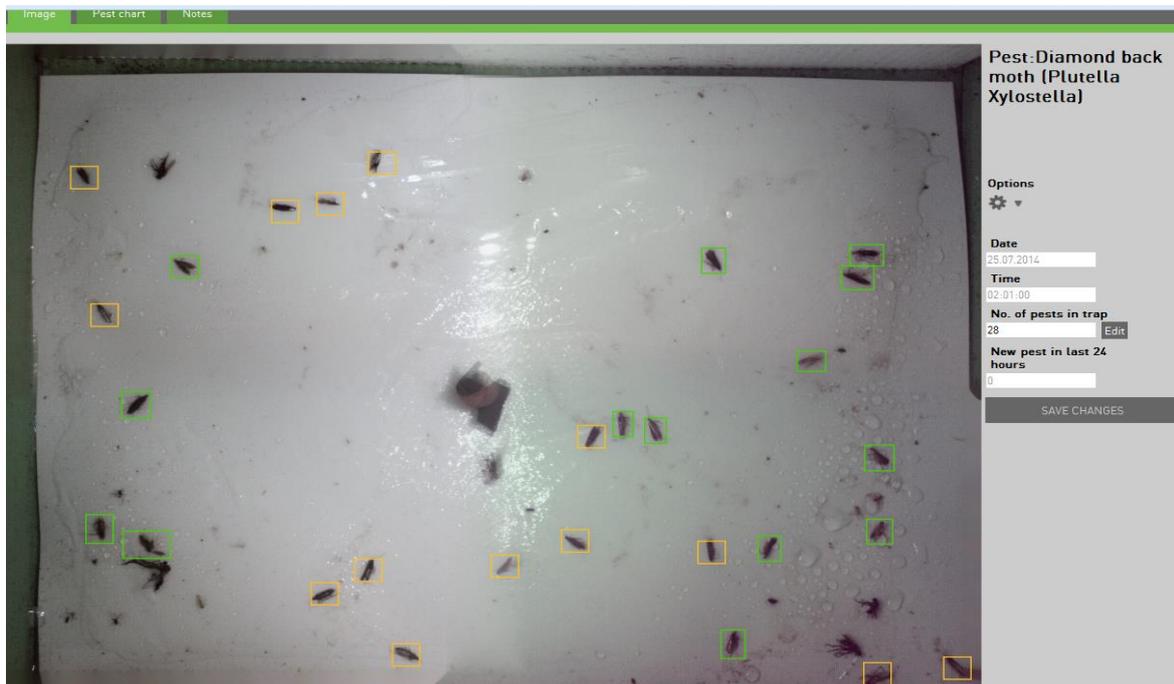


Abbildung 62: Vier TrapView Fotos aus 2014, die zu einem Bild durch die Efos Software zusammengelegt und ausgewertet wurden (gelbe Vierecke). Von den 28 markierten Schädlingen wurden 14 von dem System markiert. 14 Motten wurden von dem System nicht erkannt (grüne Vierecke)

Im zweiten Schritt wurde die Fängigkeit des TrapView-Fallensystems mit einer konventionellen Delta-Falle (Andermatt Biocontrol, Schweiz) verglichen. Die Daten wurden im Jahr 2014 und 2015 auf den Versuchsflächen in Braunschweig und Hötzum im Kohlgemüsebestand erfasst und unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die Anzahl der Kohlmotten in der Delta-Sexualpheromonlockstofffalle unterschieden sich nicht signifikant von denen im TrapView-Fallensystem (Abbildung 63).

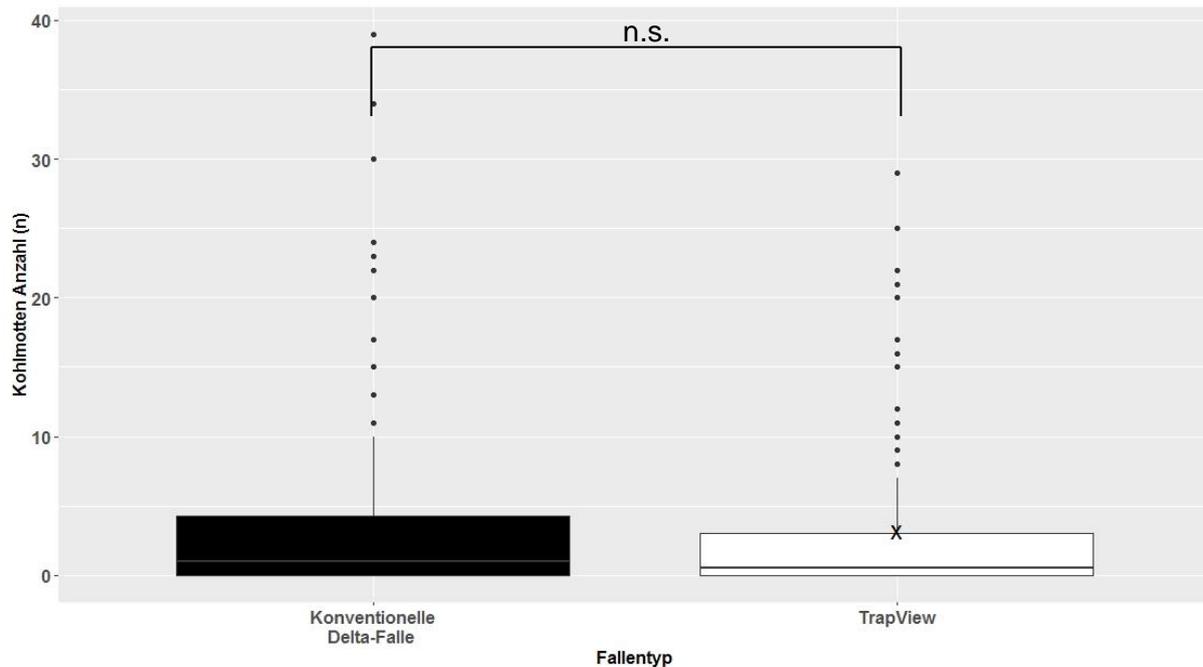


Abbildung 63: Anzahl an Kohlmotten, die entweder in den konventionellen Delta-Fallen (Andermatt Biocontrol, Schweiz) oder technisch modifizierten Fallen TrapView (Efos, Slowenien), auf den Klebeböden gefangen wurden. Die Fangzahlen wurden im Jahr 2014 und 2015 an zwei Standorten (Braunschweig und Hötzum) erfasst (n=136, Imer, Ismeans, \bar{x} = arithmetisches Mittel, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' < 0,01; '**' < 0,05; n.s.=nicht signifikant)

3.3.1.2 Z-Trap

Zur Zeit der Arbeit wurde das Z-Trap Fallensystem (spensa Technologies, USA) in den USA zur Erfassung des Apfelwicklers (*Cydia pomonella* L.) im Obstbau eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein digitales Trichter/Delta-Sexualpheromonlockstofffallensystem, welches die Schadinsekten durch einen elektronischen Impuls zählt (2.5.1.2). Das Z-Trap Fallensystem wurde im Zeitraum vom 01.05.2014 bis 16.06.2014 zur Erfassung der männlichen Kohleulen im Kohlgemüse-Bestand im Feld getestet. Als Vergleichsparameter diente hierbei eine konventionelle Trichter-Falle. Die Erfassung der Populationsdynamik der Kohleule war mit dem Z-Trap Fallensystem nicht möglich. Es wurden keine Kohleulen in dem System in dem Zeitraum festgestellt. Im Versuchszeitraum kam es bei dem Z-Trap Fallensystem zu Komplikationen bei der Signalübertragung. Es kamen in dem Versuchszeitraum in dem Z-Trap System 11 Hellrandige Erdeulen (*Ochropleura plecta* L.) vor, die vom System nicht erfasst wurden. Zwischen der Falle und der Basisstation kam es nicht zu einer Signalübertragung. In den folgenden Monaten wurden unter kontrollierten Bedingungen die Ursachen der Komplikationen bei der Signalübertragung untersucht.

Um Fehler bei der Stromversorgung ausschließen zu können, wurden die LiFePO4 Akkus (3,2 V und 12,8 Ah) ausgetauscht. Nach Austausch mit der Firma wurde festgestellt, dass die mitgeschickte Bedienungsanleitung fehlerhaft war und die Aktivierung des Systems daher nicht funktioniert hat und die Falle im Jahr 2014 nicht aktiv war. Nachdem die Aktivierung der Falle funktionierte, wurde im Zeitraum von 10.04.2015 bis 24.04.2015

überprüft, ob mit der Falle Kohlmotten bzw. Kohleulen unter kontrollierten Bedingungen erfasst werden können. Hierfür wurde die Z-Trap Einheit ohne die Trichter-Falle verwendet.

Bei den Versuchen unter kontrollierten Bedingungen zur Detektion der Kohleule im Zeitraum vom 14.04.2015 bis 20.04.2015 wurde mittels der Videodokumentation festgestellt, dass vier von fünf Faltern auf dem Plastikgehäuse der Z-Trap Falle landeten und bis zu drei Stunden um die Metallstäbe, zwischen denen sich der Sexuallockstoffdispenser befand (Abbildung 54C), mit schwirrenden Flügeln verbrachten. Nach etwa zwei Stunden landeten diese auf den unteren 1 cm-Abschnitten der Metallstäbe, wurden durch den elektrischen Impuls für eine Minute bewusstlos und flogen anschließend weg. In dem Versuchszeitraum wurden bis zu fünf Entladungen an den Stäben und somit bis zu fünf Falter erfasst (Abbildung 64). Anhand der Z-Trap-Fallensystemdaten kann keine Aussage getroffen werden, ob es sich dabei um den gleichen Falter handelte. Durch die Versuche konnten keine uhrzeitlichen Präferenzen der Falter für die Balzaktivitäten festgestellt werden.

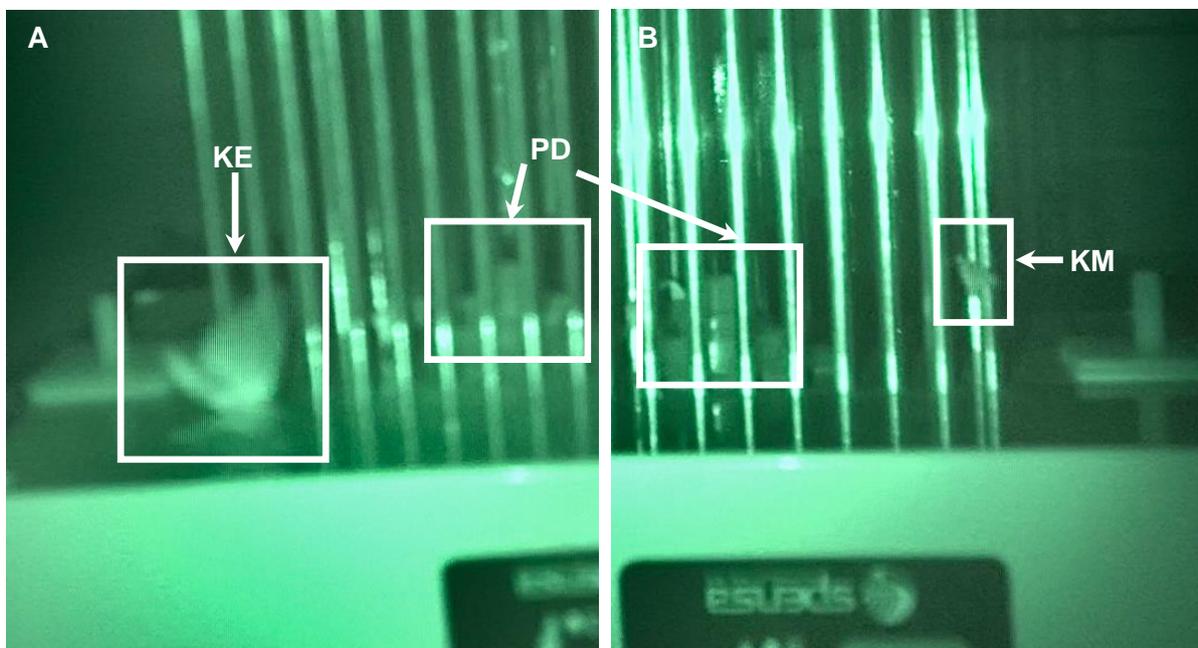


Abbildung 64: Falschfarbenbilder von dem Z-Trap-Fallensystem (A) mit Kohleule und (B) Kohlmotte, welche mit Camcorder (Sony HDR-CX730E, Japan) in einem Nightshot-Modus mit deaktiviertem Infrarot-Sperrfilter erfasst wurden. Auf den Bildern wird die Berührung der Schmetterlinge mit den Metallstäben des Fallensystems dargestellt. Die Schmetterlinge (KE=Kohleule; KM=Kohlmotte) und Pheromondispenser (PD) sind durch eine viereckige weiße Umrandung hervorgehoben

Anhand der Videodokumentation wurde festgestellt, dass das Balzverhalten der Kohlmottenmännchen sich von dem Balzverhalten der Kohleulenmännchen unterschied. Die Kohlmottenmännchen versuchen direkt zur Pheromonquelle zu fliegen ohne auf der Falle zwischenzulanden. Von den 15 Kohlmottenmännchen landeten vier direkt auf dem Pheromon ohne die Metallstäbe zu berühren, zwei Kohlmottenmännchen landeten auf dem unteren 2 cm-Abschnitt und weitere zwei landeten auf dem unteren 5 cm-Abschnitt der Stäbe mit Strom. Die Kohlmottenmännchen waren durch den Stromschlag für fünf Minuten bewusstlos. Ein Kohlmottenmännchen auf dem Pheromon wanderte nach 30 Minuten auf die Stäbe und wurde somit erfasst. Die andere drei berührten die Metallstäbe beim Rausfliegen nicht und wurden somit durch das Sensorsystem nicht erfasst. Im Zeitraum vom 20.04.2015

3. Ergebnisse

bis 24.04.2015 wurden insgesamt neun elektrische Impulse durch das System erfasst (Abbildung 65). Davon stammten fünf von einem Kohlmottenmännchen. Am 22.04.2015 wurde beobachtet, wie dieses auf den Stäben landete, bewusstlos wurde und nach Wiedererlangen des Bewusstseins wieder auf die Stäbe kletterte und erneut bewusstlos wurde. Das Kohlmottenmännchen hat insgesamt die Stäbe fünf Mal berührt und krabbelte zum Schluss zum Pheromon. Die Kohlmottenmännchen verweilen im Durchschnitt eine Stunde auf der Falle. Durch die Versuche konnte keine uhrzeitliche Präferenz der Falter für die Balzaktivitäten festgestellt werden.

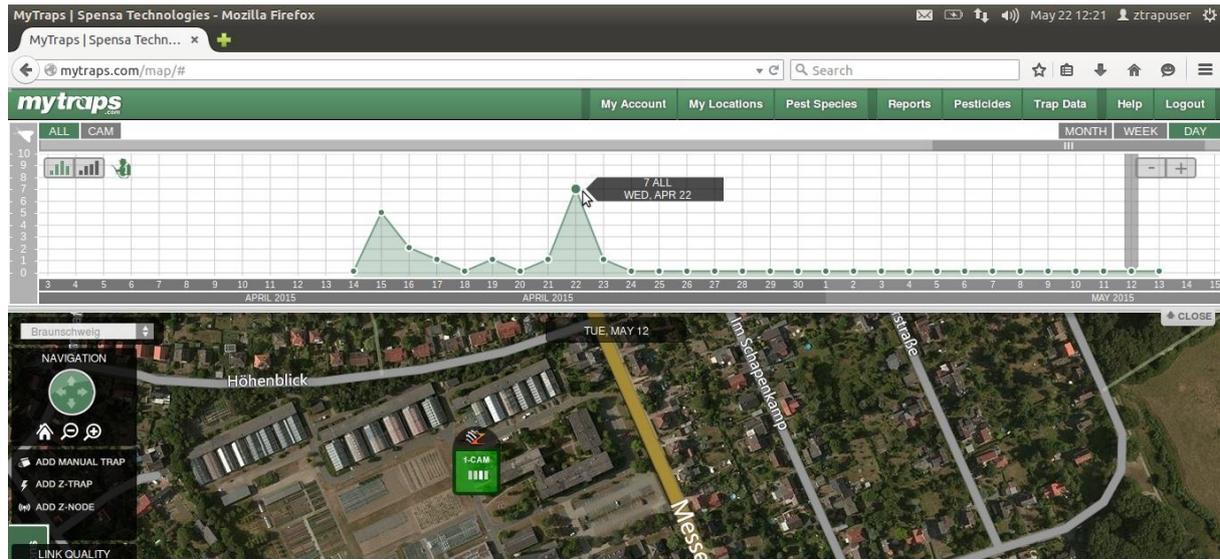


Abbildung 65: Ergebnisse der Z-Trap-Versuche unter kontrollierten Bedingungen. Im Zeitraum vom 14.04.2015 bis 20.04.2015 wurde die Falle mit dem Sexualpheromon der Kohleule und im Zeitraum vom 20.04.2015 bis 24.04.2015 die Falle mit dem Sexualpheromon der Kohlmotte getestet

Im Zeitraum vom 20.06.2015 bis 18.09.2015 wurde das Z-Trap Fallensystem zur Kohleulenerfassung eingesetzt. In dem Zeitraum wurden insgesamt 23 Impulse erfasst (Abbildung 66). In der Trichterfalle wurden 12 Hellrandige Erdeulen (*Ochropleura plecta* L.), drei Saateulen (*Agrotis segetum* L.) und drei Wiesenschnaken (*Tipula paludosa* Meigen) festgestellt. In dem Zeitraum kamen bei dem Z-Trap System keine Kohleulen vor, wohingegen die konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen in Braunschweig 20 Kohleulen fingen.

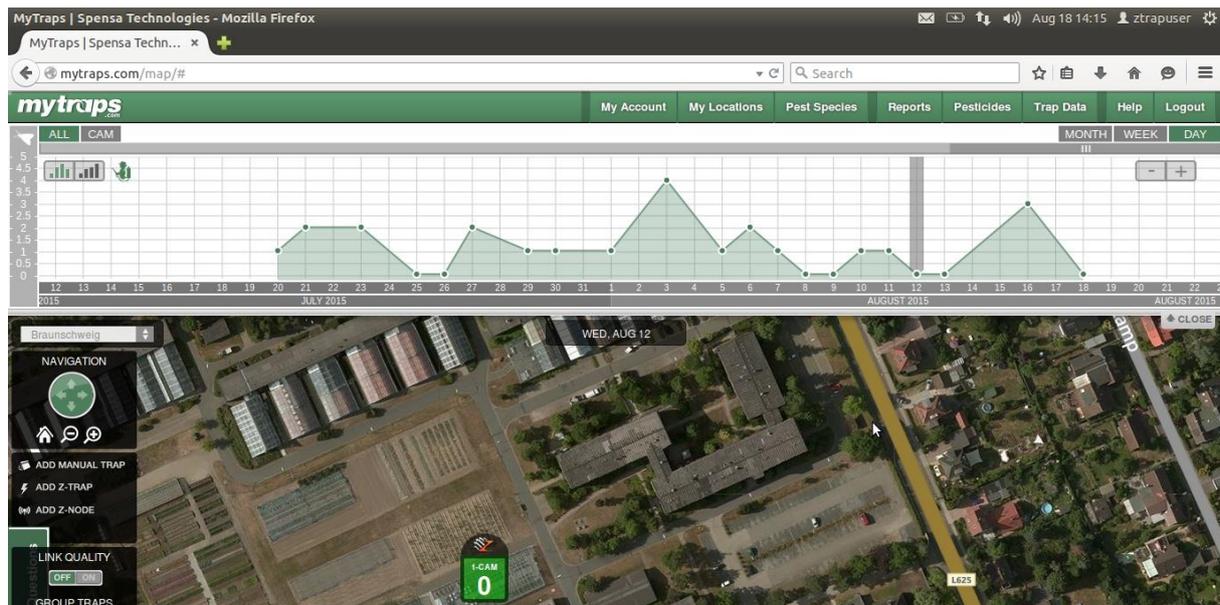


Abbildung 66: Ergebnisse der Z-Trap-Versuche im Kohlgemüsefeld. Die Versuche fanden im Zeitraum vom 20.06.2015 bis 18.09.2015 mit dem Sexualpheromon der Kohleule statt

3.3.1.3 Digitales Trichter-Fallensystem der Hochschule Osnabrück

Zur automatischen Erfassung der Kohlmotten- bzw. Kohleulenmännchen wurde das technisch modifizierte Trichter-Fallensystem der Hochschule Osnabrück im Kohlgemüsefeld in Braunschweig im Zeitraum vom 03.06.2013 bis 02.09.2013 überprüft. Bei dem technisch modifizierten Trichter-Fallensystem wurden Falter mit einem bestimmten Pheromon angelockt, in dem System durch ein Förderband mit einer klebenden Oberfläche gefangen und anhand der Algorithmen in einer Smart-Kamera (leanXcam, SCS AG, Schweiz) detektiert.

Im Zeitraum vom 03.06.2013 bis 29.07.2013 wurde das Fallensystem zusammen mit dem Sexualpheromon der Kohleule auf dem Weißkohlfeld in Braunschweig getestet. In dem Fallensystem wurden Saateulen statt Kohleulen festgestellt (Abbildung 67). Wenn ein Insekt mittels Algorithmen festgestellt wurde, wurde das aktuelle Foto (Abbildung 67A) auf der Kamera abgespeichert und direkt bearbeitet (Abbildung 67B; Abbildung 67C). In dem Versuchszeitraum kamen drei Saateulen und keine Kohleulen in dem technisch modifizierten Trichter-Fallensystem der Hochschule Osnabrück vor. Es wurden jedoch in dem Zeitraum zehn Eigelege und 154 Kohleulenlarven im Weißkohlbstand festgestellt.

Des Weiteren wurde das Fallensystem mit den Pheromonen der Kohlmotte im Zeitraum vom 30.07.2013 bis 26.08.2013 getestet. In dem Versuchszeitraum wurden bis zu 64 Kohlmotten mit der konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstoffalle und eine Motte in dem technisch modifizierten Fallensystem festgestellt. Die Kohlmotte befand sich nicht auf der Klebefläche, diese bewegte sich frei im Inneren des Fallensystems.

Somit war es mit dem Sensorsystem weder möglich die Kohleule noch die Kohlmotte im Feld zu erfassen.

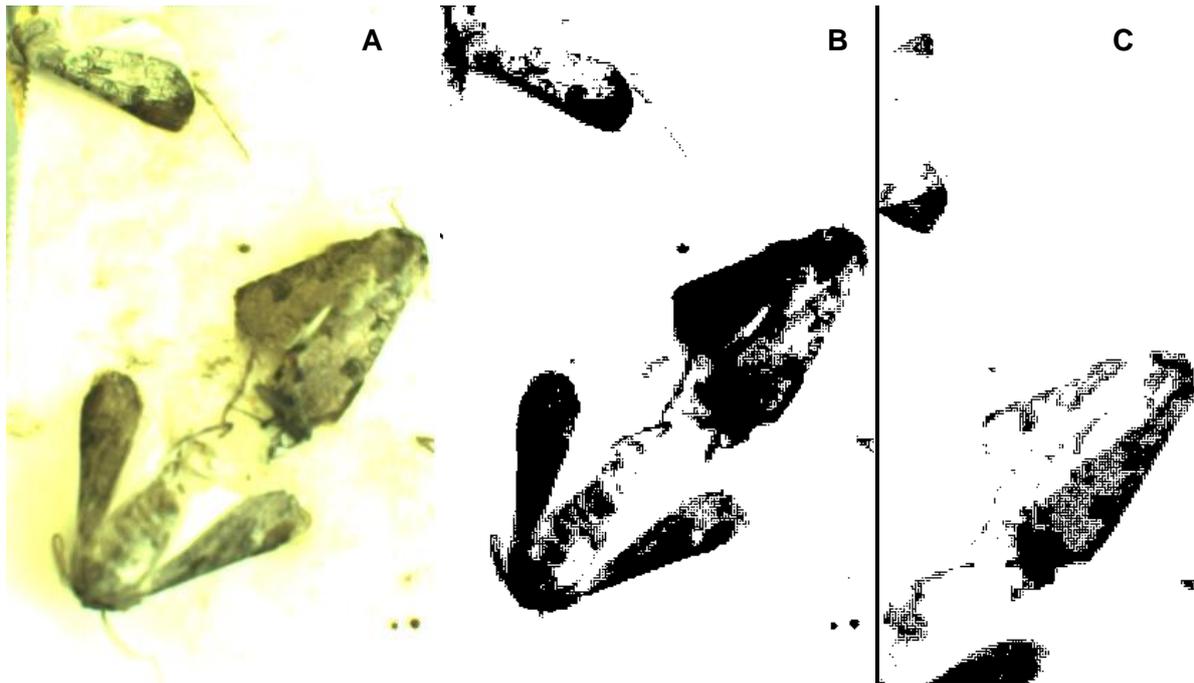


Abbildung 67: Ergebnisse des digitalen Trichterfallensystems der Hochschule Osnabrück. 2013 wurde die Falle mit dem Pheromon der Kohleule untersucht. (A) LeanXcam (leanXcam, SCS AG , Schweiz) Originalbild mit dem Beifang Saateule, (B) LeanXcam (leanXcam, SCS AG , Schweiz) Bild mit Saateule nach digitaler Bildverarbeitung, (C) LeanXcam (leanXcam, SCS AG , Schweiz) Bild mit Saateule nach einer weiteren digitalen Bildverarbeitung

3.3.2 Triangel-Camera-System (TCS)

Das TCS wurde in Kooperation mit der Hochschule Osnabrück zur automatischen Detektion der Kleinen Kohlflyge auf dem Feld entwickelt. Die Kleine Kohlflyge sollte mittels des bildgebenden Sensorsystems bei der Eiablage erfasst werden. Anhand der Versuche mit dem TCS wurden zwei Fragestellungen vom 02.07.2013 bis 30.10.2015 überprüft: 1) Ist es möglich, die Kleine Kohlflyge auf dem Feld mit dem TCS zu erfassen? und 2) Wie wirkt ein bildgebendes digitales Sensorsystem mit einem Rahmen grundsätzlich auf die Eiablage der Kleinen Kohlflyge im Feld aus? Somit war es möglich, sowohl das Anwendungspotential von dem TCS als auch den Einsatz von optoelektronischen digitalen Sensorsystemen zur Erfassung der Kleinen Kohlflyge auf einer Pflanze im Feld generell zu beurteilen.

3.3.2.1 Bildverarbeitungsprogramm des TCS

Zunächst wurde die Effektivität des Bildverarbeitungsprogramms im Feld in einem Brokkolibestand im Zeitraum vom 03.07.2013 bis 31.07.2013 getestet. Da die Webcams (Microsoft, USA) und der Laptop nicht witterungsfest waren, wurde das vorläufige System an regenfreien Tagen getestet. In der Versuchszeit wurden 7295 Bilder von dem System gespeichert. Auf 810 Bildern war der Bewegungsverlauf von insgesamt zehn Kleinen Kohlfiegen sichtbar. Von diesen wurden bei fünf Kleinen Kohlfiegen eine Eiablage mittels Eimanschetten nachgewiesen. Die Kleinen Kohlfiegen, welche Eier abgelegt hatten, hielten sich zwischen 7 bis 13 Minuten im unteren Pflanzenbereich auf. Die Kleine Kohlfiegen ohne

Eiablage verweilten zwischen 1 bis 4 Minuten auf der Pflanze. Somit konnte mit dem System die Anzahl an Kleinen Kohlfiegen, die Eier abgelegt haben, abgeleitet werden. Andere Insekten wie Blattläuse sowie Schlupfwespen wurden von dem System nicht als Kleine Kohlfiegen erfasst (Abbildung 68).

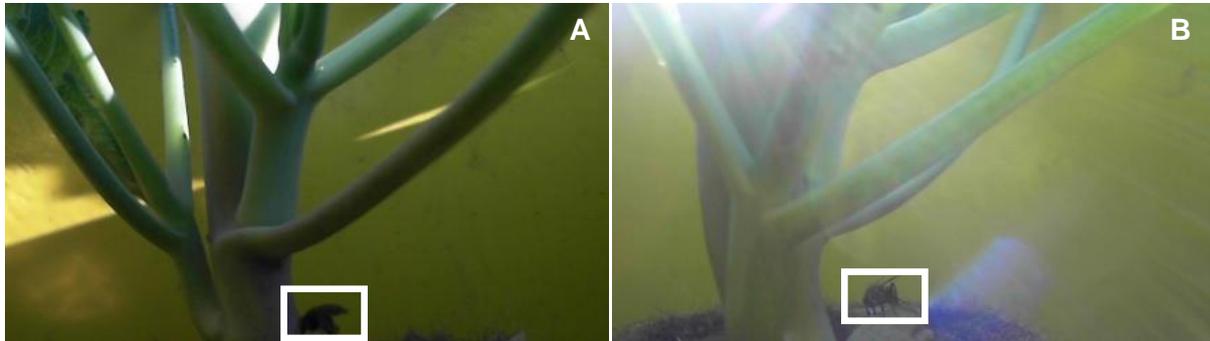


Abbildung 68: Kleine Kohlflye auf einer Brokkolipflanze, die durch zwei der drei Webcams (Microsoft, USA) des TCSs erfasst wurde. (A) Kleine Kohlflye bei der Eiablage, (B) Kleine Kohlflye beim Erkunden der Fläche (weiße Vierecke)

Beim Einsatz der TCS traten Messfehler auf. Ein Teil der Fehler entstand aufgrund der im Tagesverlauf entstehenden Schatten. Die entstehenden Schatten waren schwarz gefärbt und hatten eine Größe zwischen 15 und 70 Pixel, dies entsprach der Pixelgröße der Kleinen Kohlflye. Das führte dazu, dass neben der Kleinen Kohlflye auch andere schwarze Flächen gezählt wurden (Abbildung 69). Auf einer Pflanze kam zu einer bestimmten Zeit immer nur eine Fliege vor. Diese Fehlerart trat aufgrund der veränderten Lichtverhältnisse auf, welche sich je nach Webcam Positionierung, Witterung und Tagesverlauf änderten (Abbildung 68; Abbildung 69). Nach der Erfassung einer Kleinen Kohlflye durch eine Webcam wurde diese bei Aktivierung einer anderen Webcam erneut von dem System gezählt. Das System unterschied nicht zwischen neuer und bereits vorher erfasster Kleiner Kohlflye.

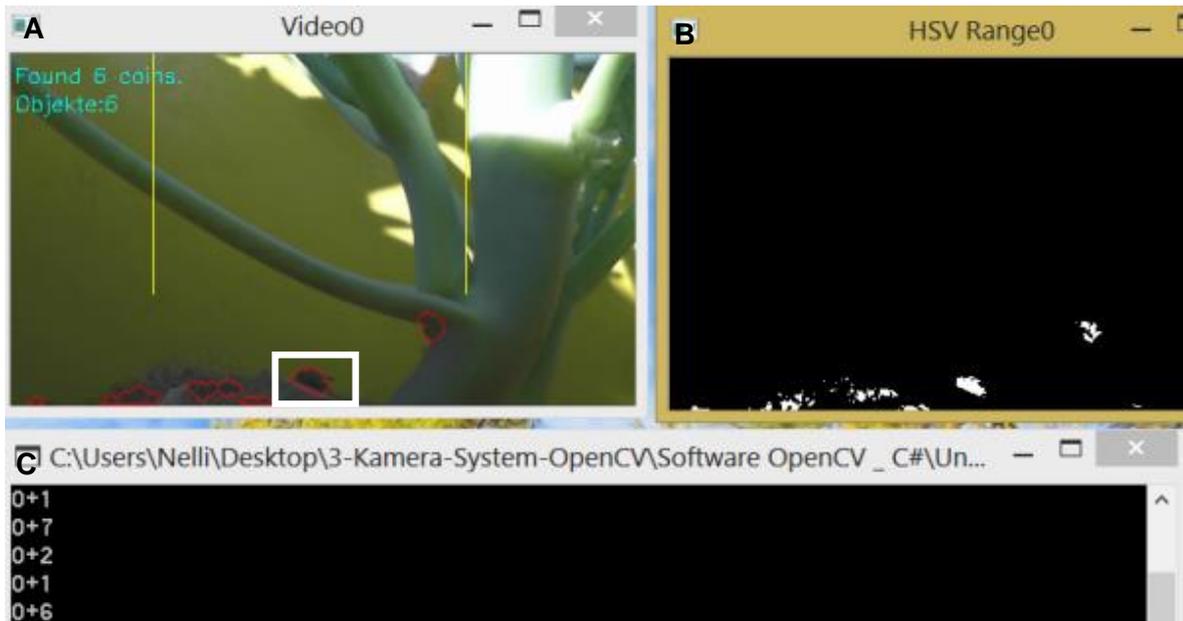


Abbildung 69: Bildschirmfoto der automatischen Objekterkennung der TCS und die damit verbundenen Herausforderungen. Ein (A) Original Bild wurde von dem Bildverarbeitungsprogramm in (B) ein binäres Bild ohne Stängel und Hintergrund umgewandelt (schwarz-weißes Bild). Anschließend wurde mit einem weiteren Algorithmus die Plausibilität des Ergebnisses überprüft und die Bereiche mit Kleiner Kohlflye auf dem Originalbild rot markiert. In (C) der Tabelle wurde die Anzahl erkannter Fliegen bei jeder Kamera-Aktivierung erfasst. Es wurden bis zu sieben Fliegen zu einem bestimmten Zeitpunkt auf einer Pflanze durch das TCS gezählt. Auf der Pflanze befand sich aber nur eine Kleine Kohlflye (weißes Viereck)

Die TCS funktionierte beständig für 15 min, danach traten mehrere Fehlermeldungen auf, so dass ein Neustart des Systems notwendig war. Die gleichzeitige Steuerung der drei Webcams mit dem Betriebssystem Windows (Microsoft, USA) war störanfällig und äußerte sich in 1700 Artefaktbildern mit falschen Farben (Abbildung 70). Die Artefaktbilder führten zu einer fehlerhaften Detektion der Kleinen Kohlflye.

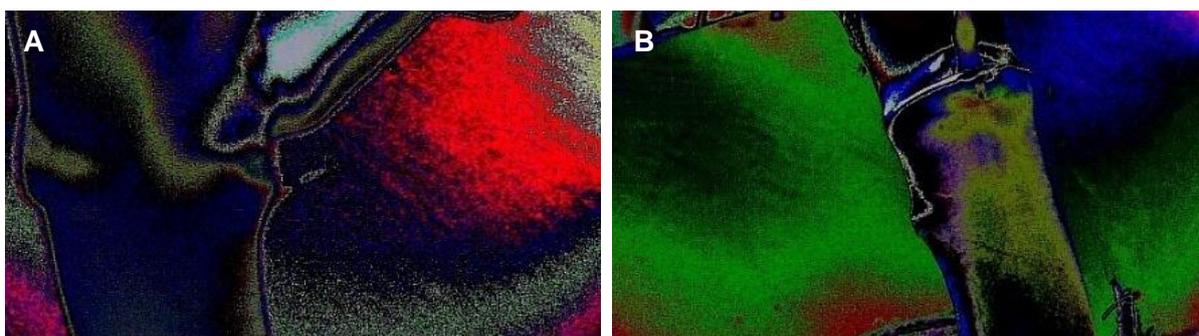


Abbildung 70: Zwei Beispiele (A) und (B) der Artefaktbilder, die bei dem Einsatz der TCS im Jahr 2013 entstanden und die zur fehlerhaften Detektion der Kleine Kohlflye führten

2014 wurde der verwendete Laptop durch einen Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Großbritannien) und das Betriebssystem Windows durch Raspbian (Linux, open-source) ersetzt. Dies verbesserte die Freilandtauglichkeit des Systems, jedoch führte dieser Wechsel zu Problemen an der Schnittstelle zwischen den Webcams (Microsoft, USA) und der Datenverarbeitung. Die Rechenleistung eines Raspberry Pi war nicht in der Lage die drei Webcams (Microsoft, USA) zu steuern. Daher wurden ein Raspberry Pi mit einer Webcam (Microsoft, USA) mit der Auflösung von 320 x 240 Pixel konfiguriert. Der Fokus und die

Helligkeit der Kamera konnten nicht über Software festgelegt werden, sondern mussten über die Konsole direkt im Videotreiber eingestellt werden. Dies war jedoch aufgrund der Probleme mit der automatischen Zeiteinstellung durch ein Modul mit einer Echt-Zeit-Uhr nicht möglich. Die aufgetretenen Schwierigkeiten bei dem überarbeiteten System führten dazu, dass keine weiteren Versuche zu Effektivität des TCS-Bildverarbeitungsprogramms in dem Versuchszeitraum im Feld oder unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden konnten.

3.3.2.2 Einfluss des TCS-Rahmens auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye

Um eine generelle Bewertung zur Eignung der digitalen optoelektronischen Sensorsysteme zur Erfassung der Kleinen Kohlflye auf einer Pflanze abschließend treffen zu können, wurde untersucht, wie sich der TCS-Rahmen auf die Eiablage der Kleinen Kohlflye unter realen Anbaubedingungen im Feld auswirkt. Hierfür wurden 2014 und 2015 Versuche in einem Brokkolibestand auf den Flächen in Braunschweig und Hötzum durchgeführt. Mittels der Versuche wurde überprüft, inwieweit PVC oder Metall bei der Eiablage durch die Kleine Kohlflye im Vergleich zu Eimanschetten bevorzugt wird. Des Weiteren wurde geprüft, ob die Farbe der Außenwände des TCS-Rahmens das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye im Vergleich zum Eiablageverhalten bei einer Eimanschette ohne TCS-Rahmen beeinflusst. Die Farben der Außenwände des TCS-Rahmens waren entweder silbern, gelb oder braun. Die TCS-Rahmen mit den silbernen Außenwänden waren aus Metall. Die TCS-Rahmen mit den gelben bzw. braunen Außenwänden waren aus PVC.

Die Daten aus dem Jahr 2014 wurden getrennt von den Daten aus dem Jahr 2015 ausgewertet, da sich die Datenstruktur unterschied. Sowohl im Jahr 2014 als auch im Jahr 2015 gab es keine signifikanten Unterschiede bei der Anzahl der abgelegten Eier der Kleinen Kohlflyen in den Eimanschetten ohne TCS-Rahmen und der Anzahl der abgelegten Eier in den Eimanschetten mit TCS-Rahmen. Es wurde festgestellt, dass die Anzahl der abgelegten Eier der Kleinen Kohlflyen sich bei dem TCS-Rahmen mit silbernen Außenwänden nicht signifikant von der Anzahl der abgelegten Eier in dem Rahmen mit gelb oder braun gefärbten Außenwänden unterschied. Des Weiteren unterschieden sich die Daten der abgelegten Eier bei dem Metallrahmen des TCS nicht signifikant von den Daten der abgelegten Eiern mit dem Kunststoffrahmen des TCS (Abbildung 71). Somit konnte kein Einfluss der TCS-Rahmen auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye festgestellt werden.

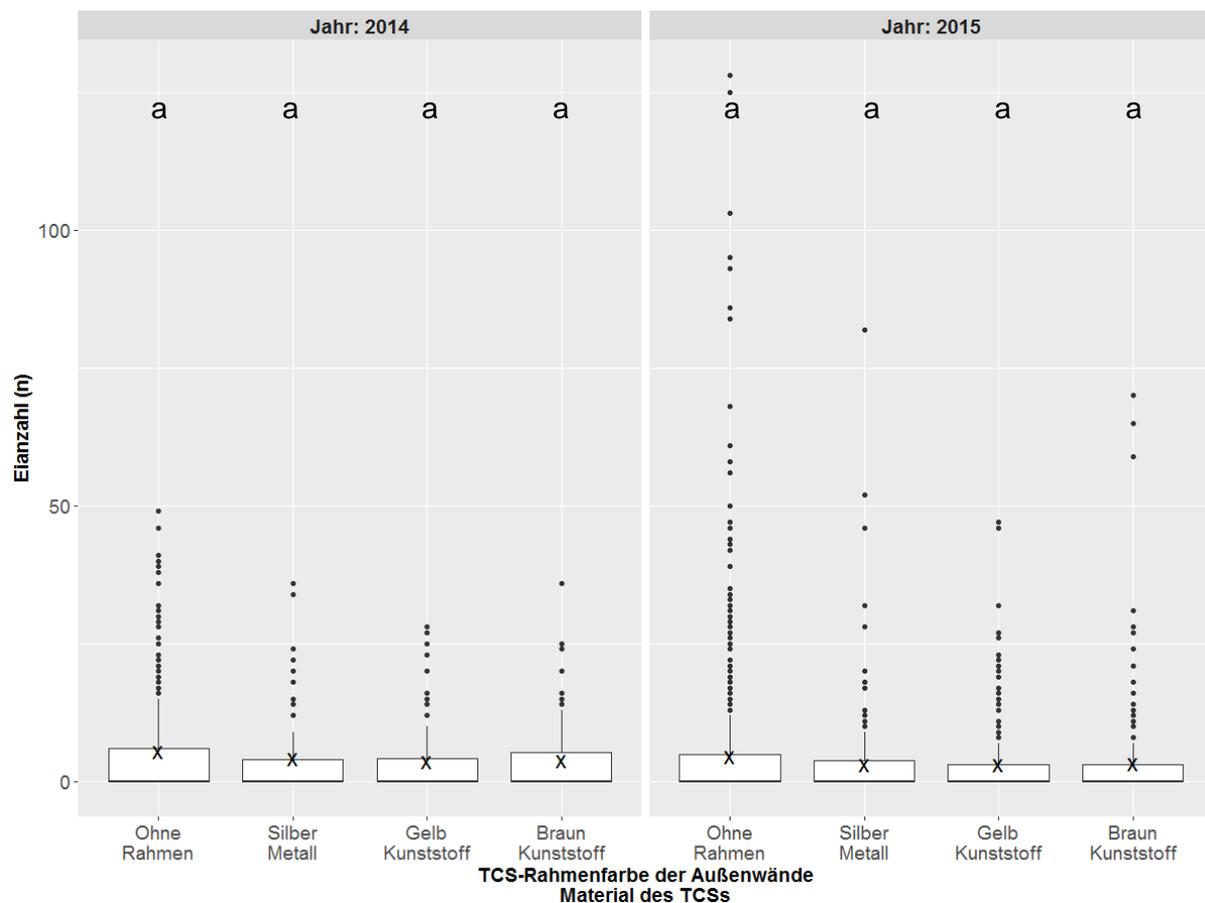


Abbildung 71: Anzahl der abgelegten Eier der Kleinen Kohlflye in den Eimanschetten ohne bzw. mit einem TCS-Rahmen. Die TCS-Rahmen waren entweder aus Metall oder Kunststoff. Die Außenfarbe der TCS-Rahmen unterschied sich. Diese war entweder silbern, gelb oder braun. Die Versuche wurden 2014 und 2015 in einem Brokkolibestand in Hötzum und Braunschweig durchgeführt. Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (2014 n=66 (silber), n=108 (gelb bzw. braun), n=390 (ohne Rahmen); 2015: n=270 (silber, gelb bzw. braun), n=1080 (ohne Rahmen), glmmADMB, lsmean, x = arithmetisches Mittel)

3.3.3 Bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme

Im Versuchszeitraum wurde die Eignung von zwei bildgebenden Lichtschrankensensor-Systemen, Infrascan 5000 (Sitronik GmbH, Österreich) und Opto-Elektronische-Objekt Scanner (OEOS; iotec GmbH, Deutschland), zur Erfassung von fliegenden Schadinsekten unter kontrollierten Bedingungen untersucht. Hierbei wurde überprüft, ob Kleine Kohlfiegen, Kohlmotten, Kleiner Kohlweißling bzw. Kohleulen mit den optoelektronischen Systemen detektiert werden können.

Bei dem Einsatz des Lichtgitters Infrascan 5000 zur Detektion der Kohlmotte, welches eine Auflösung von 2,5 mm und eine Messrate von 330 Hz hatte, konnten keine Daten und somit keine Bilder-Frames im Jahr 2013 erzeugt werden. Die Erfassung der Daten durch das System war zu langsam. Somit konnten damit keine Schadinsekten detektiert werden.

Anhand des in den Jahren 2014 und 2015 entwickelten Laser-Zeilensensors OEOS - Opto-Elektronischer Objekt-Scanner (iotec GmbH, Deutschland), welcher eine Auflösung von

0,064 mm und eine Messrate von 4000 Hz hatte, wurden Datenpakete mit der Kleinen Kohlflye, der Kohlmotte, der Kohleule bzw. dem Kleinen Kohlweißling erzeugt. Jedes Schadinsekt, welches sich zwischen dem Sender und Empfänger bewegt hat, wurde von dem System im LLD-Format unter kontrollierten Bedingungen erfasst. Die Datenpakete im LLD-Format wurden in binäre schwarz-weiß Bilder konvertiert (Abbildung 72) und statistisch ausgewertet. Damit die erzeugten Datenpakete ausgewertet werden konnten, durfte die Aufnahmezeit 5 min nicht überschreiten, da sonst aufgrund der Datengröße die Aufnahme nicht gespeichert werden konnte und von dem System verworfen wurde.

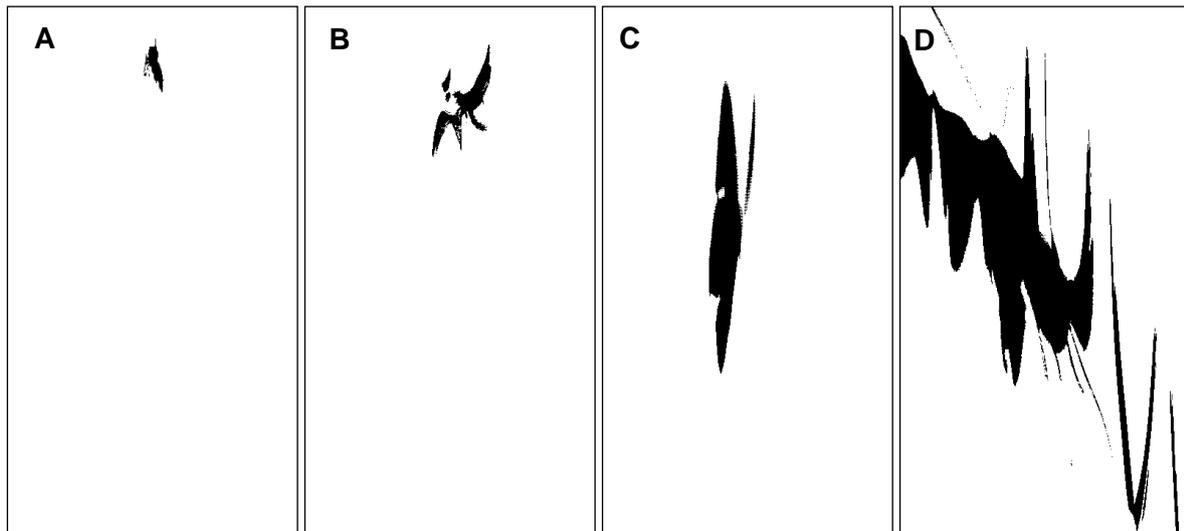


Abbildung 72: Konvertierte binäre schwarz-weiß Bilder der LLD-Datenblocks des OEOS von vier Schädlingen ((A) Kleine Kohlflye, (B) Kohlmotte, (C) Kleiner Kohlweißling und (D) Kohleule. Jedes Bild hat die gleiche Gesamt-Pixelanzahl von 393 x 723 Pixeln)

Die Eignung des Systems zur Erfassung der vier Schädlingsarten wurde anhand des statistischen Vergleichs der Anzahl an schwarzen Pixeln einer bestimmten Schädlingsart als schädlingsspezifische Signatur bewertet. Die Anzahl an schwarzen Pixeln zwischen den vier Schädlingsarten unterschied sich signifikant voneinander (Abbildung 73). Die p-Werte der statistischen Vergleiche lagen hauptsächlich bei $>0,0001$. Ausschließlich bei dem paarweisen Vergleich der Pixelanzahl zwischen der Kleinen Kohlflye und der Kohlmotte lag der p-Wert bei 0,005 (s. 7.2.4).

3. Ergebnisse

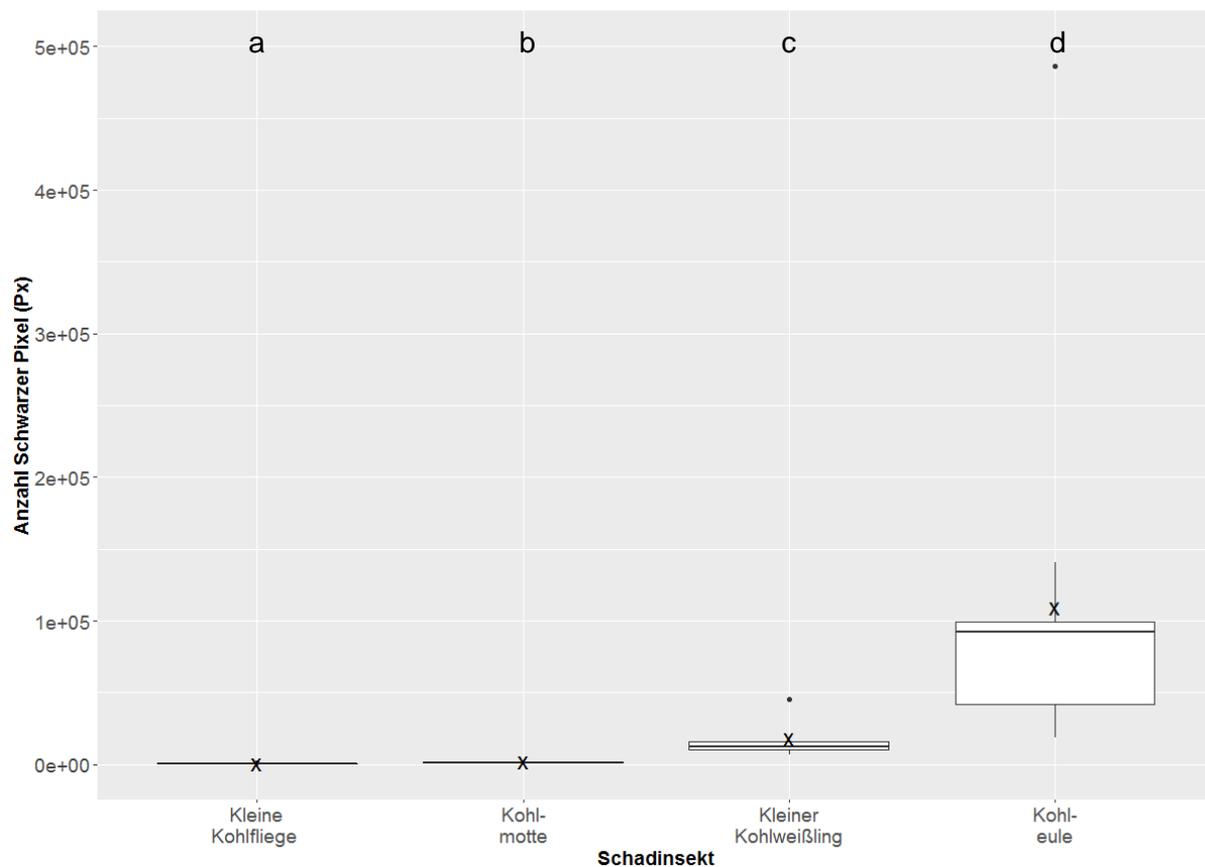


Abbildung 73: Anzahl schwarzer Pixel verschiedener Kohlschädlinge. Die Werte wurden mittels OEOS unter kontrollierten Bedingungen erfasst. Die Versuchsdaten sind unbalanciert. Der Stichprobenumfang unterscheidet sich je nach Schädling (Kleine Kohlflyge: n=16, Kohlmotte: n=20, Kohleule: n=12, Kleiner Kohlweißling: n=10). Die Boxplots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (glm, lsmean, x= arithmetisches Mittel)

Die niedrigste Anzahl an schwarzen Pixeln wiesen die Weibchen der Kleinen Kohlflyge auf. Je nach Aufnahme lag die Pixelanzahl zwischen 374 und 1.336 (Tabelle 52). Die Anzahl an schwarzen Pixeln zwischen den weiblichen und männlichen Kleinen Kohlflygen unterschied sich nicht signifikant voneinander. Die höchste Anzahl an schwarzen Pixeln - zwischen 18.779 und 486.320 - wiesen die Kohleulen auf.

Tabelle 52: Maximale, minimale und durchschnittliche Anzahl schwarzer Pixel in Abhängigkeit vom Kohlschadinsekt (Kleine Kohlflyge: n=16, Kohlmotte: n=20, Kohleule: n=12, Kleiner Kohlweißling: n=10)

Schadinsekt	Minimale Pixelanzahl (Px)	Maximale Pixelanzahl (Px)	Durchschnittliche Pixelanzahl (Px)
Kleine Kohlflyge, Weibchen	374	1 336	687
Kleine Kohlflyge, Männchen	255	609	435
Kohlmotte	669	3 447	1 700
Kleiner Kohlweißling	6 639	45 101	18 080
Kohleule	18 779	486 320	109 311

3.3.4 Vergleich der optoelektronischen Sensorsysteme zur Detektion von geflügelten adulten Kohlschädlingen

Die Ergebnisse der optoelektronischen Sensorsysteme zur digitalen Detektion von geflügelten adulten Kohlschädlingen (Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.3) lassen sich wie folgt zusammenfassen (Tabelle 53). Die Sensorsysteme befanden sich in unterschiedlichen

Entwicklungsstadien und erfassten je nach Sensorsystemart ein elektromagnetisches Wellenspektrum zwischen 380 nm und 950 nm. Von den sechs untersuchten Sensorsystemen konnten vier Systeme die Schadinsekten digital erfassen. Je nach Schadinsektenart und Versuchsbedingungen (Feld vs. kontrollierte Bedingungen) konnten diese entweder mit TrapView, Z-Trap, TCS oder OEOS erfolgen. Von den vier untersuchten Sensorsystemen war das TCS am kostengünstigsten (450 €) und OEOS am teuersten (6 000 €). Von den fünf untersuchten Schadinsektenarten (Kohlmotte, Kohleule, Kleine Kohlflye, Kleiner Kohlweißling und Kohldrehherzgallmücke) konnte eine Insektenart (Kohldrehherzgallmücke) mit keinem der untersuchten Sensorsysteme digital erfasst werden.

Tabelle 53: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Detektion der geflügelten adulten Kohlschädlinge mittels optoelektronischer Sensorsysteme

Optoelektronisches System	Kosten (€)	Sensibler Spektralbereich (nm)	Versuchsbedingungen	Schädling	Vorkommen im System?	Detektion mit System möglich?
TrapView	820 (ohne SIM-Card Kosten)	380-780	Feld	Kohlmotte Kohleule Kohldrehherzgallmücke	ja nein ja	ja nein nein
Z-Trap	14 00 (Z-Trap + Basisstation)	-	Kontrollierte Bedingungen Feld	Kohlmotte Kohleule Kohleule	ja ja nein	ja ja -
Technisch modifizierte Trichterfalle Hochschule Osnabrück	800-900	380-780	Feld	Kohlmotte Kohleule	ja nein	nein nein
TCS (Triangel-Camera-System)	450 (mit 3 Webcams+ Raspberry Pi)	380-780	Feld	Kleine Kohlflye	ja	ja
Infrascan 5000	1 000 (pro Modul)	950	Kontrollierte Bedingungen	Kohleule	ja	nein
OEOS (Optoelektronischer Objektscanner)	6 000 (pro Modul)	635	Kontrollierte Bedingungen	Kleine Kohlflye Kohlmotte Kohleule Kleiner Kohlweißling	ja ja ja ja	ja ja ja ja

4. Diskussion

Im Rahmen der vorgelegten Promotionsarbeit wurde in einem Versuchszeitraum von drei Jahren die Eignung von 12 optoelektronischen Systemen zur automatisierten Erfassung von oberirdisch vorkommenden Schadinsekten untersucht. Weiterhin erfolgte die Aufnahme der oberirdisch verursachten Schäden im Freiland in einem Bestand am Beispiel von Kohlgemüse. Mit den verwendeten optoelektronischen Sensorsystemen wurden ausschließlich oberirdisch vorkommende Schadinsekten erfasst. Die Erfassung von unterirdisch vorkommenden Insekten ist schwierig, da die meisten Methoden hierfür auf der Entnahme von Bodenproben basieren (Southwood und Henderson 2007; Reynolds und Riley 2002b) und daher schwer mit optoelektronischen Methoden zu automatisieren sind.

Anhand dieser Arbeit wurde festgestellt, dass bildgebende Sensorsysteme, die elektromagnetische Strahlung im Wellenbereich von 380 nm bis etwa 1 000 nm (s. 1.2.1) erfassen, generell geeignet sein können, um die oberirdisch vorkommenden Schadinsekten sowie durch diese oberirdisch verursachten Schäden auf dem Feld digital zu erfassen. Dies bestätigt die Ergebnisse von Untersuchungen aus dem Bereich der Pflanzenphänotypisierung (Strothmann 2016; Kicherer 2015; Busemeyer et al. 2013), Unkrautforschung (Pohl et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Holpp et al. 2016; Young und Pierce 2014; Jørgensen et al. 2007) und Forschung im Bereich der Erfassung von oberirdisch vorkommenden Schadinsekten (Rettig 2022; Bjerger et al. 2021; Born 2021; Junker-Frohn et al. 2021; Kirkeby et al. 2021; Junker et al. 2019; Zhong et al. 2018; Priya et al. 2013; López et al. 2012; Bechar und Moisan S. 2010; Bauch und Rath 2005; Reynolds und Riley 2002a). Bei den genannten Quellen wurden bestimmte pflanzliche Strukturen bzw. Insekten mittels bildgebender Sensorsysteme digital und automatisch erfasst.

Grundsätzlich war es möglich, mit acht der verwendeten Systeme oberirdisch vorkommende Schadinsekten und mit vier Systeme durch die Schadinsekten oberirdisch verursachte Schäden zu erfassen (Tabelle 53; Tabelle 36). Zwei der optoelektronischen Sensorsysteme (Z-Trap-System und TrapView), die untersucht wurden, waren bereits kommerziell zur Erfassung von Schadinsekten verfügbar. Dennoch befanden sich alle 12 untersuchten optoelektronischen Sensorsysteme noch in der Entwicklung, was bei der Bewertung berücksichtigt werden muss. In der Arbeit wurden die optoelektronischen Sensorsysteme in zwei Gruppen eingeteilt. In der ersten Systemgruppe befanden sich solche, die zur Erfassung der mobilen oberirdischen, ungeflügelten pflanzenschädigenden Insektenstadien bzw. durch diese verursachten Schäden eingesetzt wurden. Die Sensorsysteme aus der zweiten Gruppe waren stationär und wurden zur Erfassung von geflügelten Kohlschädlingen eingesetzt. Im Gegensatz zur ersten Sensorsystem-Gruppe wurden die meisten Sensorsysteme aus der zweiten Gruppe im Feld getestet.

Eine allgemeine Aussage über die Eignung der Systeme für die Praxis kann allerdings anhand der Daten dieser Arbeit noch nicht getroffen werden. Einerseits waren einzelne Systeme noch nicht ausgereift, andererseits gab es - genau wie bei den gängigen

konventionellen Überwachungsmethoden - kein System, mit dem alle Schadinsekten auf dem Feld erfasst werden konnten.

Je nach Sensorgruppe unterschieden sich der Entwicklungsstand sowie die Verfahrensweise zur Erfassung von Schadinsekten stark, sodass die mit den optoelektronischen Systemen erzeugten Ergebnisse im Folgenden in Abhängigkeit der Systemgruppe evaluiert werden. Es werden zunächst die Ergebnisse, die mit den jeweiligen Sensorsystemen aus der ersten (s. 3.1) und dann aus der zweiten (s. 3.3) Gruppe erzielt wurden, evaluiert. Vorab wird jedoch auf einen Teil der Ergebnisse eingegangen, die mit den Versuchen zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs (s. 3.2) erzielt wurden. Es werden dadurch die daraus folgende Motivation sowie die Rahmenbedingungen der Arbeit noch einmal verdeutlicht.

4.1 Motivation und Rahmenbedingungen der Arbeit

Anhand der Feldversuche zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs (z. B. Verteilung von bestimmten Schadinsekten auf einer Pflanze) für die digitale Erfassung von Schaderregern mit konventionellen Monitoringmethoden (s. 2.5.) wurden die Ergebnisse von Wyss und Daniel (2004), Forster (1997), Forster et al. (1992), Hommes (1983) sowie El Titi (1977) bestätigt. Kohlmotten, Kleine Kohlweißlinge, Kohleulen, Kleine Kohlfiegen, Mehliges Kohlblattläuse und Kohldrehherz gallmücken (Tabelle 12) waren in den Versuchsjahren 2014 und 2015 an den Versuchsstandorten Hötzum und Braunschweig neben Weißen Fliegen (Böckmann und Richter 2016) sowie Kohlerdflöhen beim Brokkoli die am häufigsten vorkommenden Schadinsekten. Das Vorkommen der Kohlerdflöhe (*Phyllotreta* spp.) in Hötzum (s. 2.4.1) wurde im Jahr 2014 und 2015 mit drei Hut-Fallen (KLP+-Fallen, Csalomon, Ungarn; Abbildung 84) mit je einem Aggregations-Pheromon (Csalomon, Ungarn) erfasst. Die Hut-Fallenfänge wurden mikroskopisch unter 20- bis 100-facher Vergrößerung oder - wenn nötig und möglich - nach Präparation von Aedeagus (Abbildung 84) und nach dem Bestimmungsschlüssel von Freude et al. (1966) als *Phyllotreta* spp. bestimmt. Da für die Erfassung der Kohlerdflöhe keine optoelektronischen Systeme erprobt wurden, wurden diese in den vorangegangenen Kapiteln nicht erwähnt.

Die Populationsdynamik sowie Insektenaktivitäten der erfassten Schadinsekten unterschieden sich je nach Art, Jahr und Versuchsstandort, obwohl die Versuchsstandorte nur 6 km voneinander entfernt lagen und die gleiche Bodenbearbeitung und Anbautechniken aufwiesen. Im Jahr 2014 kamen 43 % mehr Mehliges Kohlblattläuse (s. 3.2.1.1) und 51 % mehr Schmetterlingslarven (s. 3.2.2.1) als im Jahr 2015 vor. Die meisten Mehliges Kohlblattläuse wurden 2014 und 2015 in der KW 28 in Braunschweig festgestellt. In Hötzum hingegen wurden im Jahr 2014 in der KW 32 und im Jahr 2015 in KW 40 die meisten Mehliges Kohlblattläuse erfasst. Die meisten Larven der Kohlmotten und des Kleinen Kohlweißlings kamen im Jahr 2014 unabhängig vom Standort vor. Hingegen variierte die Larvenanzahl von Kohleulen, Großen Kohlweißlingen, Gammaeulen und Kohlzünzlern je nach Standort und Jahr. In den Eimanschetten in Braunschweig in den Jahren 2013 und 2015 wurden bis zu 67 % mehr Kleine Kohlfliegeneier im Vergleich zu Hötzum festgestellt (s.

3.2.3). Die meisten Eier der Kleinen Kohlflyge wurden in Braunschweig im Jahr 2013 in der KW 38 und in Hötzum im Jahr 2014 in der KW 21 erfasst. Beim Einsatz der Tetra-Sexualpheromonlockstofffallen kamen in Hötzum insgesamt 60 % mehr Kohldrehherzgallmücken im Vergleich zu Braunschweig (s. 3.2.4) vor. Die Flugaktivität der Kohldrehherzgallmücke war im Jahr 2013 in der KW 32 wesentlich höher im Vergleich zu den Jahren 2014 und 2015. Die am häufigsten vorkommenden Arten der Kohlerdföhe in beiden Jahren waren: *P. cruciferae* Goetze mit einem Anteil von 40 % (2014) bzw. 48 % (2015), *P. undulata* Kutsch mit einem Anteil von 29 % (2014) bzw. 26 % (2015) und *P. atra* F. einem Anteil von 21 % (2014) bzw. 10 % (2015) (s. 7.2.5; Tabelle 77; Tabelle 78). Die erhobenen Daten der Arbeit sowie die Feststellungen in der Literatur (Poehling und Verreet 2013; Radcliffe et al. 2009; Forster et al. 1992), unterstreichen die Bedeutung von Überwachungsmethoden zur Erfassung von Populationsdichten, Flug- bzw. Schadinsektenaktivität während einer Anbausaison. Ohne die geeigneten Überwachungsmethoden für eine bestimmte Kultur und Schadinsekten ist die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes (Anhang III der Richtlinie 2009/128/EG) gezielt unter Berücksichtigung des Entwicklungsverlaufs von Schadinsekten und der Bekämpfungsschwellen (s. 1.1.2) nicht möglich. Nach Poehling und Verreet (2013) kann die Populationsdichte eines Schädlings durch Umweltfaktoren, Standortbedingungen, Bodenbearbeitung, Anbautechniken, Fruchtfolge und Düngung beeinflusst werden.

Die Feldversuche und die damit erhobenen Daten zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs verdeutlichen, dass grundsätzlich drei gängige konventionelle Überwachungsmethoden ausreichen, um die bereits erwähnten bedeutenden Schadinsekten in einem Kohlgemüsebestand zu erfassen. Die Befallsdichte von Schadschmetterlingslarven und Mehligen Kohlblattläusen in einem Kohlgemüsebestand könnte anhand von Bestandskontrollen (s. 2.4.3 und 2.4.3.1) geschätzt werden (Sauer und Fischer 2013; Forster 1997; Forster et al. 1992; Freuler et al. 1991b; Theunissen und Ouden 1987). Die Flugaktivitäten der Kohlmotte (Nofemela 2010; Sulifoa und Ebenebe 2007; Walker et al. 2003; Reddy und Guerrero 2001; Freuler et al. 1991a; Baker et al. 1982), der Kohleule (Stan 1996; Freuler et al. 1991a; Terytze et al. 1987; Terytze und Adam 1981) und der Kohldrehherzgallmücke (Hallett und Sears 2013; Sauer und Fähndrich 2010) wurden mittels Sexualpheromonlockstofffallen (s. 2.4.3.2 und 2.4.5) erfasst. Die Daten zum Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflyge spiegeln die Schädlingsdichte wieder und wurden mittels Eimanschetten nach Freuler und Fischer (1982) erhoben.

Der Einsatz von konventionellen Überwachungsmethoden war mit entsprechenden Personal- und Materialkosten sowie mit einem hohen Zeitaufwand verbunden (Tabelle 51). Die entsprechenden Personalkosten sind schwer abschätzbar und wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die gesamten Materialkosten pro Saison und Fläche lagen bei 865,20 €. Unter der Annahme, dass die Fallen und Pflanzen einmal in der Woche kontrolliert werden, sich mehrere Kohlgemüsekulturen auf einer Anbaufläche befinden können und die Anbausaison maximal 30 Kalenderwochen dauern werden pro Saison 225 Stunden für die Bestands-, Eimanschetten- und Sexualpheromonfallen-Kontrollen (210 Stunden) und die Wartung der Fallen (15 Stunden) durch eine Fachkraft ohne die Anfahrt und den Weg zu

den Fallen bzw. Pflanzen benötigt. Für den Hin- und Rückweg wurden hierbei insgesamt bis zu 20 Stunden benötigt. Dabei waren die Flächen nicht groß und nicht weit vom Institut entfernt. Laut Statistischem Bundesamt (Destatis) (2021) liegt die Anbaufläche von Kohlgemüse bei durchschnittlich 8 ha pro Betrieb und laut der Betriebe (persönliche Mitteilung) kann die Flächenentfernung vom Betriebshof bis zu 60 km betragen. Dies würde zu einem höheren Zeitaufwand als in der Arbeit erfasst, führen.

Des Weiteren wurde durch die vorliegende Arbeit deutlich, dass, um repräsentative Werte zur Populationsdynamik bzw. Flugdynamik von Schadinsekten in einem Kohlgemüsebestand zu erhalten, die Überwachungsmethoden sachgemäß angewandt werden müssen. Zu Beginn der Überwachung muss die Positionierung der Bonitурpflanzen bzw. Fallen im Bestand entsprechend der Fachliteratur erfolgen. Das Monitoring sollte regelmäßig in bestimmten Zeitabständen stattfinden. Die Fängigkeit der Pheromonfallen (Andermatt Biocontrol 2013) bzw. die Eiablage von Kleinen Kohlfiegen auf den Eimanschetten kann durch unsachgemäße Wartung bzw. Kontrolle negativ beeinflusst werden. Je kleiner ein Insekt ist, desto aufwendiger ist die Überwachungsmethode. Zum Beispiel können die Larven der Kohlmotten insbesondere im L1- und L2-Stadium aufgrund ihrer geringen Größe (bis zu 1,2 bzw. bis 2,1 mm nach Rosario und Cruz (1986)) auf den Pflanzen durch ungeschultes Personal übersehen werden. Daher sollten die Kontrolle der Pflanzen bzw. Fallen sowie die Wartung der Fallen durch geschultes Personal erfolgen. Bei einzelnen Überwachungsmethoden, wie bei der Ermittlung der genauen Anzahl von Kohldrehherz gallmücke (Größe 1,5 mm) auf dem Klebeboden einer Sexualpheromon Tetra-Falle, werden optische Hilfsmittel wie Stereomikroskope benötigt, was in einem Betrieb nicht praktikabel ist.

Die Attraktivität und zukunftsorientierte Notwendigkeit von digitalen und automatischen Überwachungsmethoden wurde aufgrund der genannten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bezüglich der konventionellen Methodik sowie aufgrund der Forderung der Praxis nach Optimierung vor allem arbeitsorganisatorischer Aspekte, wie insbesondere dem Zeitaufwand für Bestandskontrolle (Umfrage von Landwirten aus Nordrhein-Westfalen), der ein besonderes Hemmnis für die Umsetzung des integrierten Pflanzenschutzes darstellt (Thiel et al. 2021; Thiel et al. 2019), deutlich. Rückläufige Beratungskapazitäten bei den Pflanzenschutzdiensten der Länder (Hommel 2012), steigende Lohnkosten und Fachkräftemangel (Thiel et al. 2021) führen dazu, dass die Anbauflächen nicht im empfohlenen Umfang überwacht werden und ein substantielles Hemmnis bei der Umsetzung des integrierten Pflanzenschutzes in Landwirtschaftsbetrieben darstellen. Die unsachgemäße Anwendung von gängigen konventionellen Überwachungsmethoden kann zu verfälschten Ergebnissen und somit auch zu unsachgemäßer Anwendung von Pflanzenschutzmitteln führen. Die arbeitsorganisatorischen Aspekte, der Zeitaufwand sowie die Bonitурqualität könnten durch digitale Sensorsysteme optimiert werden. Anhand der Arbeiten von Rajmis et al. (2021) und Scholz et al. (2016) wurde bereits nachgewiesen, dass die Digitalisierung bei der Unkrautererkennung und die damit verbundene Automatisierung zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit führt und den gezielten Einsatz von Herbiziden fördert.

4.2 Evaluierung der Systeme zur Erfassung der mobilen oberirdischen ungeflügelter pflanzenschädigender Insektenstadien sowie der durch diese verursachten Schäden

Einer der Arbeitsschwerpunkte war die Prüfung der Eignung von sechs optoelektronischen Systemen zur Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden auf einer Pflanze, um im Folgenden die Bestandskontrolle zu automatisieren. Aus den durchgeführten Versuchen sowie aus Arbeiten zu Phänotypisierungssystemen (Pohl et al. 2020; Behmann 2016; Kicherer 2015; Strothmann et al. 2013), Unkrautererkennungssystemen (Pohl et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Young und Pierce 2014) und Systemen zur Erfassung von Pflanzenkrankheiten (Bauriegel, E. Herppich, W. 2014; Mahlein 2011) geht hervor, dass die Effektivität eines optoelektronischen Systems stark von dessen Ausrichtung und Positionierung abhängt (Pflanz et al. 2018; Jenz et al. 2016).

Bei den Kohlgemüsearten, deren Entwicklung durch die Anlage von Blättern und deren Flächenwachstum gekennzeichnet ist (Lüling et al. 2021a; Krug et al. 2002), erwies sich die Top Shot Perspektive am besten. Die Top Shot Perspektive ist durch eine Kamerastellung im 90° Winkel zu der Pflanze und der Bodenoberfläche gekennzeichnet. Die Top Shot Perspektive wird bei der Erfassung der Blattflächen von Weißkohl (Lüling et al. 2021a), der Phänotypisierung von Zuckerrüben (Behmann 2016; Mahlein 2011), Feldsalat, Möhren und Raps (Scholz et al. 2019) und zur Erfassung von Unkräutern (Pohl et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Young und Pierce 2014; Strothmann et al. 2013; Ruckelshausen et al. 2010) angewandt. Bei der Phänotypisierung von Weinreben (Kicherer 2015) sowie bei der Erfassung von Pilzkrankheiten an Weizen (Bauriegel, E. Herppich, W. 2014) werden die Kameras horizontal (Seitliche-Sicht, Tabelle 14) zu der Pflanze ausgerichtet. Die seitlichen Aufnahmen sowie die Aufnahmen aus der Froschperspektive, d.h. dass sich die Kamera in einer sehr niedrigen vertikalen Position zum Zielobjekt befand, waren bei allen untersuchten optoelektronischen Systemen ungünstig. Bei den Aufnahmen von der Seite, bei denen die Systemkameras horizontal zu der Pflanze ausgerichtet waren, oder aus der Froschperspektive wurde immer ein großer Pflanzenbereich schlecht ausgeleuchtet und somit nicht erfasst. Dies lässt sich mit den Wachstumsmerkmalen von Kohlgemüse erklären. Weißkohl, Brokkoli oder Blumenkohl sind durch eine gedrungene Wuchsform und relativ große Blattflächen (Lüling et al. 2021a; Krug et al. 2002) im Vergleich z. B. zu Getreide gekennzeichnet. Kohlgemüsepflanzen werden meistens als Jungpflanzen ausgepflanzt und können je nach Entwicklungsstadium zwischen 10 und 80 cm hoch und zwischen 10 und 80 cm breit werden (www.floragard.de). Getreide wird im Gegensatz zu Kohlgemüse ausgesät und kann je nach Entwicklungsstadium zwischen 1 bis 150 cm hoch und 1 bis 15 cm breit (www.floragard.de) sein.

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Positionierungen der Systeme zur Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden auf den Weißkohlpflanzen im BBCH-Stadium 16-19 untersucht. Aufgrund der Zwischenergebnisse bzw. technischen Systemeigenschaften der optoelektronischen Systeme wurden nicht alle Systeme in

unterschiedlichen Höhen getestet. Jedoch lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass bei einer Positionierung der Systeme ab einer Höhe von 70 cm zum Boden ganze Pflanzen erfasst werden. Mit der Positionierung der Systeme in 30 bis 40 cm Höhe wird ein Teilbereich einer Weißkohlpflanze erfasst. Somit ist es möglich, die optoelektronischen Systeme in fahrbaren autonomen Systemen wie BoniRob und BreedVision einzusetzen. BoniRob und BreedVision haben eine höhenverstellbare Messbox mit optischen Systemen. Die Messbox von BoniRob kann in einer Höhe von 0,4 m bzw. 0,8 m positioniert werden. Die Messbox von BreedVision kann bis zu einer Höhe von 1,50 m platziert werden (Ruckelshausen et al. 2010). Ob die untersuchten Systeme der optoelektronischen Sensorsysteme aus der ersten Gruppe mit Multicoptern eingesetzt werden können, muss noch überprüft werden. Nach Pflanz et al. (2018) lag die optimale Aufnahmehöhe zur Applikationskartenerstellung von Unkräutern mit Hexacopter und Systemkamera Sony NEX 5N (Sony, Japan) zwischen 2,5 und 4 m über dem Boden. Diese Positionierung wurde im Rahmen der Arbeit nicht überprüft.

Die Evaluierung von spektralen Informationen von bestimmten optoelektronischen Systemen zur Erfassung von Insekten bzw. durch diese verursachten Schäden konnte anhand einfacher Bildverarbeitungs-Algorithmen erfolgen. Die einfachen Bildverarbeitungs-Algorithmen hoben Objekte (Schadinsekten bzw. Insektenschäden) durch Farbraumkonvertierung und dem Freistellen hervor. Die Verwendung von einfachen Bildverarbeitungs-Algorithmen führte dazu, dass es mit keinem der untersuchten optoelektronischen Systeme möglich war, die Objekte automatisch zu erfassen. Dies lag nicht an den Systemen, sondern an der angewandten Bildverarbeitungsart (Freistellen und Farbraumkonvertierung). Die Bildanalyse der Chlorophyllfluoreszenz erfolgte nach dem kumulativen Ansatz von Bauriegel et al. (2010). Die Automatisierung der Bildverarbeitung ist durch leistungsfähige Bildverarbeitungs-Algorithmen unter Verwendung von Autoencoder (Kämpfer et al. 2021; Paulus und Mahlein 2020; Schramowski et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Zhong et al. 2018) z. B. BoVW (Bag-of-Visual-Words) (Kämpfer et al. 2021; Pflanz et al. 2018) möglich. Anhand der durchgeführten Versuche unter kontrollierten Bedingungen und im Feld war es möglich, die jeweiligen optoelektronischen Systeme in Abhängigkeit von Objektart (Insekt bzw. Schaden) zu bewerten und anhand dessen eine Empfehlung für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten abzuleiten.

Zunächst wurde die Handlichkeit von den insgesamt sechs untersuchten optoelektronischen Systemen evaluiert. Vier davon erfassten die zweidimensionale Spektraleigenschaften (Farbkamera, Graubildkamera, CFBA, Bolometerkamera) von Insekten bzw. Pflanzengewebe (s. 3.1). Hintergrund der Untersuchung war, dass jedes Objekt (Pflanze bzw. Insekt) eine bestimmte Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung absorbiert und eine bestimmte Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung reflektiert (s. 1.2.1). Somit weist jede Gewebeart eine bestimmte spektrale Signatur auf. In der Arbeit wurden Systeme untersucht, die reflektierte elektromagnetische Strahlung entweder in Form von sichtbarem Licht mit einer Farbkamera (Spektralbereich: 380-780 nm) bzw. Graubildkamera (Spektralbereich: 400- 1000 nm), Fluoreszenz mit CFBA (Spektralbereich: 650-800 nm) oder Infrarotstrahlung mit Bolometerkamera i7 (Spektralbereich: 7 500-13 000 nm) erfassten.

Somit wurden je nach Kamerasystem unterschiedlich reflektierende Wellenbereiche erfasst. Am einfachsten in der Handhabung waren Farbkameras und die Bolometerkamera. Es wurden dabei keine Abdeckungen wie bei der Graubildkamera mit Zusatzbeleuchtung oder Dunkeladaptionsphasen wie bei CFBA benötigt. Bei den Farbkameras wurden die Kompaktkamera PowerShot G2 (Canon, Japan), die Spiegelreflexkamera Olympus-E1 (Olympus, Japan) und der Camcorder HDR-CX730E (Sony, Japan) verwendet. Die drei Farbkameras hatten eine gute Auflösung und eigneten sich gleich gut bzw. gleich schlecht zu Erfassung von spektralen 2D-Information von Objekten (Insekten bzw. Schaden). Durch ihr Gewicht von 515 g und Maßen von 121 x 77 x 64 mm war die Kompaktkamera handlicher im Vergleich zu der Spiegelreflexkamera (Gewicht: 660 g; 141 x 104 x 81 mm) und dem Camcorder (Gewicht: 545 g; 137,5 x 73,5 x 67,5 mm). Im Folgenden wird nicht zwischen den Farbkameras unterschieden. Am billigsten waren die Farbkameras und am teuersten war CFBA (Tabelle 36). CFBA war am teuersten und kompliziertesten in der Handhabung, denn die Messungen konnten erst nach zehnminütiger Dunkeladaptation durchgeführt werden. Das System bestand aus zwei LED-Feldern, einem Halogenlampensystem für den Lichtsättigungsimpuls, einer CCD-Kamera und einem Computer, durch den das System gesteuert wurde. Um optimale Ergebnisse erzeugen zu können, mussten die CFBA-Bestandteile richtig positioniert werden. Des Weiteren haben Bauriegel, E. und Herppich, W. (2014) darauf hingewiesen, dass die Qualität der Messung durch Pflanzenbewegungen beeinträchtigt werden. Diese Faktoren weisen auf die Komplexität des Systems im Feldeinsatz hin.

Mit zwei weiteren Systemen (Linienprofilsensor, TOF-Kamera) wurde untersucht, ob bestimmte Objekte anhand ihrer Rückstreuungseigenschaften detektiert werden können. Die durch die Systeme erfassten 3D-Rückstreuungsinformationen von Objekten wurden entweder zu 2D-Falschfarbenbildern (Linienprofilsensor) bzw. 2D-Distanzbildern (TOF-Kamera) umgewandelt und mittels konventioneller Bildverarbeitung falls möglich analysiert. Unabhängig von der Datenauswertung waren beide Systeme witterungsfest und unkompliziert in der Handhabung.

Im Folgenden wird die Eignung der Sensorsysteme Schadinsektengruppen bzw. Gewebeschäden digital zu erfassen evaluiert. Anhand der Ergebnisse wurde festgestellt, dass mit einer Bolometerkamera i7 (FLIR systems Inc., USA) und einer 3D TOF-Kamera nach dem Pulslaufzeitverfahrensprinzip (O3D 201PMD 3D-Kamera (IFM Elektronik GmbH, Deutschland)) keine Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden erfasst werden konnten. Die Gründe hierfür unterscheiden sich je nach Kamerasystem.

Die Bolometerkamera i7 misst die reflektierte Infrarotstrahlung (Spektralbereich: 7,5-13 μm) von Objekten. Damit wird die Oberflächentemperatur erfasst (s. 1.2.2). Anhand der Versuche mit der Bolometerkamera i7 wurde festgestellt, dass sich die Temperaturunterschiede zwischen den Insekten und einer Weißkohlpflanze im Feld bei 9,5 °C und einer Weißkohlpflanze in der Klimakammer bei 20 °C Außentemperatur nicht signifikant unterschieden. Untersuchte Insekten waren sowohl Larven des Kleinen Kohlweißlings (L5-Stadium) und des Kohlzünzlers (L4-Stadium), als auch große Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus (> 200 Individuen). Dies entspricht den Ergebnissen von Hoffmann et al. (2013). Dort wurde festgestellt, dass die Weidenbohrerlarven (*Cossus cossus* L.) nur unter Laborbedingungen

auf kaltem Hintergrund aus Kunststoff mittels Infrarotthermographie erfasst werden konnten. Der Temperaturunterschied zwischen der Weidenbohrerlarve und dem Hintergrund betrug in dem Fall 1 K. Wurden die Weidenbohrerlarven auf einer Pflanze platziert oder mit einer dünnen Schicht aus Steinwolle abgedeckt, konnten diese aufgrund geringer Temperaturunterschiede ($< 0,5$ K) nicht mit Infrarotthermographie erfasst werden. Diese Ergebnisse lassen sich damit begründen, dass Insekten zu den poikilothermen (wechselwarmen) Tieren zählen. Somit haben diese keine konstante Temperatur und sind in der Lage sich der Umgebungstemperatur oder der Pflanzentemperatur anzupassen. Unter extremen Bedingungen (z. B. niedrige Temperaturen) sind Insekten in der Lage ihre Temperatur entweder durch thermoregulatorische Verhaltensweisen (z. B. Aufsuchen von Sonnenstrahlen oder Schatten) oder durch ihren eigenen Stoffwechsel (z. B. Muskelzittern) zu regulieren (Hoffmann 1978). Damit kann erklärt werden, wieso bei der Ermittlung von Kälteanpassungen von Insekten (Palmer et al. 2004) Infrarotthermographie angewandt werden kann. Da jedoch die Bestandskontrolle vorzugsweise einmal wöchentlich von Anfang Mai bis Ende September durchgeführt werden sollte und in der Zeit nicht durchgehend mit extremen Wetterbedingungen zu rechnen ist, ist die Infrarotthermographie zur Erfassung von Schadinsekten nicht geeignet.

Die gemessene Oberflächentemperatur der befallenen Pflanzenoberflächen mittels Thermographie unterschied sich nicht von symptomfreiem Pflanzengewebe. Die Blattemperatur der Kulturpflanzen ist eng mit der umgebenden Temperatur verbunden und wird durch Wärmeabgabe infolge der Transpiration und Wärmeaufnahme aus der Umgebung (Außentemperatur und Strahlungstemperatur) reguliert (Lenthe 2006; Hellebrand et al. 2005). Die meisten Kulturpflanzen werden den höheren Pflanzen zugeordnet und können auf externe Stressfaktoren in Form von veränderten Stoffwechselprozessen reagieren (Taiz und Zeiger 2008). Thermographieverfahren können eingesetzt werden, um Wasser- bzw. Stickstoffveränderungen in den Blättern zu messen (Lenthe 2006). Jedoch eignet sich die Methode nicht, um den durch Schadschmetterlingslarven verursachten Loch- bzw. Fensterfraß oder die durch Mehligke Kohlblattläuse verursachten Blattverfärbungen zu erfassen. Dies spiegelt zum Teil die Ergebnisse von Lenthe (2006) und Hellebrand et al. (2005) wider, die die Temperatur mittels Thermographie von Weizenpflanzen mit Braunrost- und Blattseptoriainfektionen bzw. Mehltauinfektionen gemessen haben. Lediglich die Temperatur von Weizenpflanzen mit Mehltauinfektion war um bis zu $0,9$ K höher als die Temperatur von befallsfreien Pflanzen. Anhand der durchgeführten Versuche sowie der wissenschaftlichen Arbeiten lässt sich ableiten, dass die äußere Blattemperatur mit biotischen Stressoren (wie Pilzen und Insekten) sich meistens an die Außentemperatur anpasst und sich schwer anhand von Infrarotthermographie erfassen lässt.

Die 3D TOF-Kamera (O3D 201PMD 3D), die nach dem Prinzip des Pulslaufzeitverfahrens die Rückstreuungseigenschaften von Objekten erfasste, konnte sowohl die Schadinsekten als auch deren Schäden nicht detektieren. Das Sensorsystem erreichte eine sehr hohe Reichweite, jedoch war die Auflösung mit 64×48 Bildpunkten zu gering und eignete sich nicht zum Automatisieren der Bestandskontrolle.

Demnach kann Infrarotthermographie und die 3D TOF-Kamera (O3D 201PMD 3D; IFM Elektronik GmbH, Deutschland) zur Erfassung von Schadinsekten bzw. durch diese verursachten Schäden nicht empfohlen werden.

Im Folgenden wird die Eignung der vier weiteren optoelektronischen Systeme Objekte (Insekten bzw. Schäden) zu erfassen in Abhängigkeit von der Objektart evaluiert. Zunächst wird die Fähigkeit der Systeme die Schadinsekten auf einer Pflanze zu erkennen betrachtet. Zur Erfassung von Insekten eigneten sich grundsätzlich Sensorsysteme, die spektrale 2D-Informationen (Farbkameras, Graubildkamera bzw. CFBA) aufnehmen. Die Rückstreuungseigenschaften der Insekten, die durch einen Linienprofilsensor erfasst wurden, konnten nicht vom Pflanzenmaterial unterschieden werden und konnten somit nicht zur deren Detektion verwendet werden. Um Insekten mit spektraler 2D-Information der Farbkameras, Graubildkamera bzw. CFBA erfassen zu können, mussten sich diese auf einer Pflanzenoberfläche befinden, die dem Kamerasystem zugewandt ist. Des Weiteren mussten die Systemkameras relativ niedrig, 40 cm über dem Boden, und senkrecht (Top Shot-Perspektive) zum Boden positioniert werden.

In der Arbeit konnten ausschließlich große Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus (> 200 Individuen) mit CFBA an abgetrennten Blättern erfasst werden (s. 3.1). Mit Farbkameras konnten die großen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus auf einer Pflanze nicht detektiert werden, da diese sich im Herzbereich aufhielten und dort durch Kohlblätter abgedeckt waren. Zudem verursachten die Mehligen Kohlblattläuse Blattverformungen, sodass diese im Herzbereich der Weißkohlpflanze mit optoelektronischen Systemen nicht detektiert werden konnten. Unabhängig von der Systemart unterschied sich die spektrale 2D-Information der kleinen Kolonien (5-15 Individuen) der Mehligen Kohlblattlaus nicht von der spektralen 2D-Information der Weißkohlpflanzen. Unabhängig von der Systemart ähnelte die spektrale Signatur der Mehligen Kohlblattläuse besonders stark der spektralen Information der Blattadern der Weißkohlpflanzen. Die Mehligen Kohlblattläuse befinden sich während der Nahrungsaufnahme bevorzugt auf den Blattadern (Gill et al. 2013). Somit konnten die durch Farbkamera, Graubildkamera und CFBA erfassten spektralen 2D-Informationen zur Detektion der kleinen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus auf den Um- und Außenblättern nicht verwendet werden.

Die spektrale 2D-Information der Schmetterlingslarven auf einer Pflanzenoberfläche konnte hingegen mit Farbkameras, Graubildkamera bzw. CFBA erfasst und vom Pflanzengewebe mittels konventioneller Bildverarbeitung unterschieden werden. Die Eignung der Systeme zwischen den unterschiedlichen Schadschmetterlingslarven zu differenzieren wurde nicht ausgewertet, da bei der konventionellen Bestandskontrolle die Pflanzenanzahl mit Schmetterlingslarven und nicht das Artenspektrum von Bedeutung ist. Aufgrund der unterschiedlich erfassten Spektralbereiche der drei Kamerasysteme unterschied sich die erfasste Spektralinformation je nach optoelektronischem Systemtyp. Je nach Art unterschied sich die Systemeignung.

Farbkameras sind Systeme, die das optisch sichtbare Licht (Spektralbereich: 380-780 nm) zweidimensional erfassen. Nach Taiz und Zeiger (2008) absorbiert Chlorophyll den violetten (380-420 nm), blauen (420-470 nm) und roten (620-780 nm) Wellenbereich und reflektiert

den grünen Wellenbereich (490-575 nm) des sichtbaren Lichtes (Tabelle 4) in photosynthetisch aktivem Gewebe. Daher wurde überprüft, inwieweit sich die sichtbare spektrale Signatur der Schadinsekten von der sichtbaren spektralen Signatur des Pflanzengewebes unterscheidet. Die mit Farbkameras erfassten spektralen Signaturen der Mehligen Kohlblattläuse waren, wie bereits beschrieben, für die anschließende Bildverarbeitung zur Detektion von dem Schadinsekt unbrauchbar, da die spektrale Information der Mehligen Kohlblattlaus der spektralen Information des Pflanzengewebes sehr ähnelte. Die sichtbare spektrale Information von Kohleulenlarven, die mit Farbkameras erfasst wurden, konnte besonders gut ausgewertet werden. Diese unterschied sich stark von der spektralen Information der Weißkohlpflanzen. Die sichtbare spektrale Information von Kohlmottenlarven war hingegen der spektralen Information der Blattadern der Weißkohlpflanzen ähnlich. Obwohl die Farbkameras zur Applikationskartenerstellung von Unkräutern mit Hexacopter und Systemkamera Sony NEX 5N (Sony, Japan) (Pflanz et al. 2018) und zur automatischen Erfassung des Großen Kohlweißlings auf Fangpflanzen (Priya et al. 2013) verwendet werden, kann diese Systemart nicht für die automatische Bestandskontrolle verwendet werden, da damit nur größere Larven (Kohleulen) von bestimmten Schmetterlingsarten erfasst werden konnten. Bei der integrierten Schmetterlingslarvenkontrolle wird aber empfohlen, die Schadschmetterlingslarven am Anfang des Befalls - also kleine Stadien - zu bekämpfen. Denn mit zunehmenden Larvenalter kann die Sensibilität für bestimmte Pflanzenschutzmittel und somit die Larvenmortalität abnehmen und Resistenzen gegenüber bestimmten Pflanzenschutzmitteln können zunehmen (Seljåsen und Meadow 2006).

Die im Nahinfrarot-Wellenbereich empfindliche Graubildkamera, die monochrome Matrixkamera HXG20NIR (Baumer, Deutschland), erfasste zweidimensional einen Spektralbereich von 400 nm bis 1000 nm der elektromagnetischen Strahlung und ist im multifunktionalen Feldroboter BoniRob zur Beikrautregulierung (Strothmann et al. 2013) verbaut. Anhand der Versuche wurde ermittelt, wie sich drei unterschiedliche Fremdlichtquellen, die unterschiedliche Wellenbereiche emittierten, auf die spektralen Informationen von Pflanzenmaterial und Insekten auswirkten. Anhand der spektralen Informationen der monochromen Matrixkamera und Fremdlichtquelle, die im rot sichtbaren Wellenbereich emittierte, war deutlich erkennbar, dass der Chlorophyllgehalt der Blattadern geringer war als im umliegenden Mesophyllgewebe. Damit wurde nochmal verdeutlicht, dass kleine Kolonien (5-15 Individuen) der Mehligen Kohlblattlaus mit dem System nicht erfasst werden können. Bei der Erfassung von Kohlmottenlarven auf einer Pflanze eignete sich am besten die Fremdlichtquelle, die im sichtbaren roten Wellenbereich (625 nm) emittierte. Die Spektralinformation der Kohlmottenlarven auf einer Pflanze mit Fremdlichtquellen, die im Wellenbereich von NIR (940 nm) bzw. im Halogenlampenbereich (780 nm) emittierten, ähnelte sehr der spektralen Information einer Weißkohlpflanze und waren somit ungeeignet für deren Erfassung. Die positiven Eigenschaften der Fremdlichtquelle, die im sichtbaren roten Wellenbereich (625 nm) emittierte, lassen sich mit den Eigenschaften von Chlorophyll in dem photosynthetisch aktiven Gewebe der Pflanzen begründen. Nach Horler et al. (1983) und Scotford und Miller (2005) wird die Strahlung im rot sichtbaren Spektralbereich (630-700 nm) von Chlorophyll in den Blättern zum größten Teil absorbiert und nur zum geringen

Teil reflektiert. Die Kohlmottenlarven weisen kein photosynthetisch aktives Gewebe auf und hoben sich dadurch auf den erfassten spektralen Informationen von dem Pflanzengewebe ab. Im Gegensatz zur Mehligen Kohlblattlaus haben die Schmetterlingslarven bevorzugt Mesophyll, also photosynthetisch aktives Gewebe, zwischen den Blattadern verzehrt. Somit eignete sich die Methode, um Schmetterlingslarven auf der zum Kamerasystem zugewandten Blattseite zu erfassen. Daher war die monochrome Matrixkamera in Kombination mit rot emittierender Fremdlichtquelle für die Erfassung von Schadschmetterlingslarven empfehlenswert.

Die CFBA wurde angewandt, um die photochemische Effizienz des Photosystems II (Matsysek und Herppich 2019; Bolhar-Nordenkampf et al. 1989) einer Pflanze und von Schadinsekten (Bauriegel, E. Herppich, W. 2014; Brabandt et al. 2014; Lazár et al. 2006; Berger et al. 2004) bildgebend zu erfassen. Diese wurde in der Arbeit mittels des Verhältnisses der variablen Fluoreszenz zur maximalen Fluoreszenz nach einem Lichtsättigungsimpuls (F_v/F_m) bewertet. Die im System eingebaute Kamera konnte grundsätzlich die elektromagnetische Strahlung im Wellenbereich zwischen 400 nm und 1000 nm erfassen. Durch den eingesetzten Kurzbandfilter wurden jedoch von der Kamera reflektierte Strahlung der Wellenlängen zwischen 650 nm und 800 nm erfasst. Anhand der Ergebnisse wurde deutlich, dass im Gegensatz zum Pflanzengewebe die großen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus als auch der Kohlmottenlarven keine photosynthetisch aktiven Gewebe aufwiesen. Daher konnten die großen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus mit über 200 Individuen und Kohlmottenlarven mit dem System erfasst werden. Kleine Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus konnten damit nicht erfasst werden. Mit dem Sensorsystem konnten auch keine Unterschiede zwischen Mesophyllblattgewebe und Blattadern erfasst werden. Die Mesophyllblattfläche, Blattadern und die kleinen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus hatten die gleichen F_v/F_m -Werte (0,8). Nach Björkman und Demmig (1987) weist ein F_v/F_m -Wert von 0,8 auf intakte photochemische Effizienz und somit auf gesundes Pflanzengewebe hin. Da eine Mehliges Kohlblattlaus eine Länge von 2 bis 2,6 mm aufweist (Dubnik 1991) und in einer kleinen Mehliges Kohlblattlauskolonie (bis zu 15 Individuen) zwischen den Individuen Pflanzengewebe ist, könnte es sein, dass die Insekten zu klein sind, um mit dem System erfasst zu werden. Im Gegensatz zu Großkolonien, in denen sich die Mehliges Kohlblattläuse dicht nebeneinander befinden und somit als eine nicht photosynthetisch aktive Fläche erfasst werden konnten.

Demnach sind zur Detektion von Schadinsekten auf einer Pflanze optoelektronische Kamerasysteme gut geeignet, die die spektralen Eigenschaften des photosynthetisch aktiven Chlorophylls in den Blättern hervorheben. Zum Beispiel durch Verwendung einer Graubildkamera mit Fremdlichtquelle oder Chlorophyllfluoreszenz. Wie vermutet wies das Insektengewebe keine photosynthetisch aktiven Gewebe auf. Grundsätzlich war die Erfassung von Schmetterlingslarven einfacher im Vergleich zu den kleinen Kolonien der Mehliges Kohlblattlaus. Dies lag an der Positionierung der Insekten während der Nahrungsaufnahme sowie der relativ geringen Größe des Schadinsekts. Kleine Kolonien der Mehliges Kohlblattlaus waren auf den Blattadern lokalisiert, Schmetterlingslarven hingegen im Mesophyllgewebereich. Sowohl die Schmetterlingslarven als auch große Kolonien der

Mehligen Kohlblattläuse konnten mit CFBA an abgetrennten Blättern erfasst werden. Untersuchungen mit einer Graubildkamera mit rot sichtbarer emittierender Fremdlichtquelle und große Blattläuskolonien auf abgetrennten Blättern wurden nicht durchgeführt. Dies führt dazu, dass beide Sensorsysteme nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Die untersuchten Insekten - unabhängig von der zugehörigen Ordnung - konnten ausschließlich auf der zur Systemkamera zugewandten Blattseite (Blattoberseite) erfasst werden. Bei den Versuchen zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs im Feld wurde jedoch festgestellt, dass nur 6 % bis 22 % der Mehligen Kohlblattläuse und 20 % bis 44 % der Schmetterlingslarven sich auf der Blattoberseite befanden (s. 3.2.1.3 und 3.2.2.3). Die Präferenz der Mehligen Kohlblattläuse sich bei Nahrungsaufnahme auf den Blattunterseiten zu platzieren, wurde bereits durch Gill et al. (2013) beschrieben. Des Weiteren wurde festgestellt, dass je nach Insektenordnung unterschiedliche vertikale Zonen bevorzugt wurden. Nach Gill et al. (2013) und Dubnik (1991) bevorzugten die Mehligen Kohlblattläuse junge Kohlgemüseblätter. Das konnte im Versuchszeitraum der Arbeit im Feld nicht bestätigt werden. Die Mehligen Kohlblattläuse hielten sich bevorzugt mit 56 % bis 80 % auf den Außenblättern (s. 3.2.1.2) und nicht wie erwartet auf den Herz- bzw. Kopf- oder Umblättern auf. Dies könnte an dem relativ niedrigen Befall (im Durchschnitt maximal 19 Blattläuse/Pflanze) im Vergleich zu Forster et al. (1992) (im Durchschnitt maximal 225 Blattläuse/Pflanze) liegen. Die meisten Schmetterlingslarven kamen an Weißkohlpflanzen in den BBCH-Stadien 19-46 vor. Die meisten vorkommenden Larven konnten der Kohlmotte, dem Kleinen Kohlweißling, der Kohleule und dem Großen Kohlweißling zugeordnet werden. Hierbei konnten bei den Schmetterlingslarven keine eindeutigen Präferenzen für eine bestimmte vertikale Pflanzenzone festgestellt werden, die sich an beiden untersuchten Standorten in einem bestimmten Entwicklungsstadium in den beiden Jahren wiederholt widerspiegeln (s. 3.2.2.2). Dies gibt zum Teil die Ergebnisse nach Forster (1997) wieder. Er stellte fest, dass der Kleine Kohlweißling keine Präferenz für eine bestimmte vertikale Zone hatte. Kohlmotten- und Kohleulenlarven kamen nach Forster et al. (1992) bevorzugt auf den Außenblättern, aber auch auf den Um- und Herzblättern vor. Beim Großen Kohlweißling hat Forster (1997) eine Präferenz für Außenblätter festgestellt. In den durchgeführten Versuchen lag die Larvenanzahl im Herzbereich zwischen 22 % und 43 %, bei den Umblättern bei 26 % und 38 % und bei den Außenblättern bei 27 % und 50 %. Die Erfassung der Insekten im Herzbereich war aufgrund der Blättergeometrie schwierig, da es sich um mindestens zwei senkrecht wachsende Blätter handelte. Ab dem BBCH-Stadium 19 konnten mit den optoelektronischen Systemen mindestens 50 % der Außenblätter nicht gut erfasst werden, da diese durch Umblätter verdeckt waren.

Insgesamt lässt sich daraus schlussfolgern, dass, obwohl optoelektronische Systeme vorhanden sind, mit denen die Insekten erfasst werden können, diese maximal nur 22 % der Mehligen Kohlblattläuse bzw. 44 % der Schmetterlingslarven erfassen können. Wird die Verteilung der Insekten auf vertikalen Zonen berücksichtigt, so sinkt die Wahrscheinlichkeit die Insekten auf Pflanzen mit optoelektronischen Systemen zu erfassen auf 18 % bei den Mehligen Kohlblattläusen und 37 % bei den Schmetterlingslarven. Des Weiteren sollte berücksichtigt werden, dass kleine Mehliges Kohlblattläuskolonien mit über zehn Individuen, so wie nach Forster et al. (1992) empfohlen, mit den untersuchten optoelektronischen

Systemen nicht erfasst werden können. Das bedeutet, dass die Bekämpfung insbesondere der Mehligen Kohlblattlaus bei Erreichen der wirtschaftlichen Schadschwelle (Poehling und Verreet 2013) nicht nach den Grundsätzen des integrierten Pflanzenschutzes erfolgen kann. Obwohl die überprüften Systeme in anderen Bereichen wie Phänotypisierung (Kicherer 2015), Beikrautkontrolle (Pflanz et al. 2018; Strothmann 2016; Strothmann et al. 2013; Ruckelshausen et al. 2010), zur Erfassung von Pilzinfektionen (Bauriegel, E. Herppich, W. 2014; Mahlein 2011) oder zur automatischen Erfassung der Larven des Großen Kohlweißlings (Priya et al. 2013) eingesetzt werden, sind diese zur Automatisierung der Bestandskontrolle unter Berücksichtigung der Insektenverteilung auf einer Kohlgemüsepflanze sowie Pflanzengeometrie nach heutigem Wissensstand nicht geeignet.

Im folgenden Abschnitt werden die optoelektronischen Systeme zur Erfassung von Gewebeschäden, welche durch Mehliges Kohlblattläuse bzw. Schmetterlingslarven verursacht wurden, evaluiert. Die durch die Schadinsekten verursachten Pflanzenschäden konnten durch ein Laserschnittkamera-System nach dem Prinzip der Triangulation (3D-Kamerasystem), Farbkameras, Graubildkamera bzw. CFBA erfasst werden. Mehliges Kohlblattläuse sind Phloemsauger, die nach dem Einstechen mit ihrem Saugrüssel in den Pflanzenzellen bereits nach sechs Stunden zu zahlreichen veränderten Stoff- und Energiewechselprozessen führen (Kuśnierczyk et al. 2008; Kuśnierczyk et al. 2007). Die andauernde Saugtätigkeit der Mehligen Kohlblattlaus und die dadurch ausgelösten Zellaktivitäten führen bei den Kohlgemüsepflanzen zu Gelb- bzw. Rotverfärbungen an den Blattsaugstellen sowie zu Verformungen der Blätter (Dubnik 1991). Des Weiteren können die Mehliges Kohlblattläuse zu Wachstumsstauungen führen (Gill et al. 2013). Die Schmetterlingslarven bewirken durch ihre Fraßtätigkeiten mit den Mandibeln Fenster-, Loch- bzw. Skelettierfraß der Blätter (Griegel 1999; Buhl und Schütte 1971). Die Eignung der optoelektronischen Systeme, Pflanzenschäden zu erfassen, unterschied sich je nach Insektenordnung und Systemart.

Ein Laserschnittkamera-System wurde angewandt, um durch Insekten verursachte Formveränderungen der Blätter anhand deren Rückstreuungseigenschaften dreidimensional nach dem Prinzip der Lasertriangulation zu erfassen. Die 2D-Linienprofilsensorbilder der durch die Mehliges Kohlblattläuse verursachten Blattverformungen unterschieden sich nicht von den Linienprofilsensorbildern von Blättern ohne durch Insekten ausgelöste Blattverformungen. Anhand der 2D-Linienprofilsensorbilder und Bildverarbeitung (freilegen und Farbraum konvertieren) konnte der durch Schmetterlingslarven verursachte Fenster- bzw. Lochfraß erfasst werden. Die dreidimensionale Vermessung mit einem Linienprofilsensor hat eine hohe Auflösung und hohe Einzelpunktgenauigkeit (Paulus 2017; Paulus et al. 2013). Um die dreidimensionale Punktwolke des Laserscanners auswerten zu können, war die Entwicklung von komplizierten Algorithmen (Paulus et al. 2013) im Versuchszeitraum notwendig. Nach Paulus et al. (2013) muss ein Blatt in jedem 3D-Datensatz (3D-Punktwolke) einer Pflanze mit einer bestimmten Blattstellung manuell definiert werden. Je nach Pflanze unterschied sich die Anzahl an Blättern sowie die Blattstellung. Die Auswertung der 3D-Punktwolke konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Daher kann die Güte des Systems nicht abschließend im Rahmen dieser Arbeit zur Detektion von Blattschäden, die durch Schadinsekten verursacht wurden, bewertet werden.

Die anderen drei Sensorsysteme (Farbkamera, Graubildkamera und CFBA) erfassten die zweidimensional reflektierte Strahlung der Blätter mit und ohne Insektenschäden. Die Nutzung der bestimmten spektralen Informationen zur Detektion von Insektenschäden durch je ein bestimmtes optoelektronisches System unterschied sich stark je nach Insektenordnung. Die durch kleine Kolonien (5-15 Individuen) der Mehligen Kohlblattläuse verursachten spektralen Veränderungen im Blattgewebe ähnelten der spektralen Signatur der Kohlgemüseblattadern und konnten dadurch mit keinem System erfasst werden. Dies kann einerseits an der Positionierung der Mehligen Kohlblattläuse bei der Nahrungsaufnahme liegen, die sich in der Nähe der Blattadern befinden (Gill et al. 2013). Andererseits sind Blattläuse in der Lage die Abwehrreaktionen der Pflanzen aktiv zu unterdrücken (Jaouannet et al. 2014; Kuśnierczyk et al. 2008; Kuśnierczyk et al. 2007), was die Erfassung von Blattveränderungen insbesondere in der Anfangsphase des Befalls (wichtige Phase bei der Schädlingskontrolle) mit kleinen Mehligen Kohlblattlauskolonien erschweren. In der Arbeit von Junker-Frohn et al. (2021) wurden auch festgestellt, dass die spektrale Reflexion von Blättern und Pflanzen mit Befall durch die Salatblattlaus (*Nasonovia ribisnigri*, Mosley) anhand optischer Sensoren nicht erfasst werden kann. Die mit hyperspektralen Bildgebungsverfahren erfasste spektrale Reflexion von Salatpflanzen und Salatblättern mit Salatblattlausbefall unterschieden sich nicht von befallsfreien Pflanzen. Des Weiteren hat Franzen et al. (2007) festgestellt, dass die Russische Weizenblattlaus (*Diuraphis noxia*, Kurdjumov) keinen Einfluss auf die photochemische Effizienz vom Photosystem II der Weizenpflanzen nach neun Infektionstagen dieser Aphidenart mit einer Kolonie zwischen 75 und 90 Individuen hat. Diese Ergebnisse, an Weizenpflanzen mit Befall der Russischen Weizenblattlaus, konnten an Kohlgemüsepflanzen nach zwei Wochen mit großen Kolonien (> 200 Individuen) der Mehligen Kohlblattlaus nicht bestätigt werden. An den Blattstellen mit großen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus war die photochemische Effizienz des Photosystems II stark herabgesetzt. Diese Reaktion konnte nur mittels CFBA und nicht mit einer Farbbildkamera festgestellt werden. In den Blattstellen mit großen Kolonien der Mehligen Kohlblattlaus sank die photochemische Effizienz des Photosystems II in den Blättern auf null. Die Gründe hierfür sind leider nicht näher bekannt und könnten in den unterschiedlichen Pflanzenarten oder Blattlausarten zu suchen sein (Kuśnierczyk et al. 2007).

Der durch Schmetterlingslarven verursachte Fenster-, Loch- bzw. Skelettierfraß der Blätter konnte grundsätzlich mit Farbkameras, Graubildkameras und CFBA erfasst werden. Bei der Anwendung der monochromen Matrixkamera wurde die beste zweidimensionale Spektralinformation von Larvenschäden mit Fremdlichtquelle, die im sichtbaren roten Wellenbereich (625 nm) emittierte, erzeugt. Die spektrale 2D-Information der drei Systemarten eignete sich gleich gut zur Erfassung der Larvenschäden. Bei der Auswertung der spektralen Informationen sind folgende Schwierigkeiten unabhängig von der Systemart aufgetreten: Die Stellung der Blätter ändert sich während des Tages sowie während einer Vegetationsperiode. Dies erschwerte die automatische Erfassung von Schäden. Ein weiteres Problem der Bildverarbeitung sind Fraßschäden an den Blättern, die sich überlappen. Fraßschäden, welche sich ober- sowie unterhalb eines gesunden Blattes befanden, konnten anhand der Bildverarbeitung nicht ausgewertet werden. Die Schäden durch Larven, die sich

oberhalb eines schadfreien Blattes befanden, erschienen als unbeschädigte Blätter aufgrund der photosynthetisch aktiven Fläche des darunterliegenden unbeschädigten Blattes. In manchen Fällen formten die überlappten Blattbereiche am Pflanzenstamm zweidimensionale Flächen, die nach der Bildverarbeitung als Larvenschaden erschienen und fälschlich als Larvenfraß erfasst wurden. Des Weiteren konnten die senkrecht wachsenden Kohlgemüseblätter des Herzbereichs nicht mittels Bildverarbeitung ausgewertet werden, da die Schäden nicht erkennbar waren. Die Differenzierung zwischen alten und neuen Fraßschäden war mit einer Bildbearbeitung der spektralen Informationen, die mit den drei Kamerasystemen erfasst wurden, nicht möglich.

Somit kann Folgendes aus den Untersuchungen abgeleitet werden: Unter bestimmten Voraussetzungen konnten die durch die Mehlig Kohlblattlaus bzw. die Schadschmetterlingslarven verursachten Blattschäden so erfasst werden, dass diese sich von unbeschädigtem Pflanzengewebe hervorhoben.

Die Nutzung eines Laserschnittkamera-Systems zur Erfassung der Pflanzenschäden nach dem Prinzip der Lasertriangulation kann durch diese Arbeit nicht abschließend beurteilt werden, da dafür die Auswertungen durch Parametrisierung der dreidimensionalen Punktwolke fehlen. Jedoch wurde in den letzten Jahren ein Laserscanner zur Beikrautererkennung (Scholz et al. 2019) bzw. Phänotypisierung der Pflanzen (Paulus 2017; Behmann 2016) erfolgsversprechend eingesetzt. Hierbei wurden 3D-Laserscanner in Fusion mit einer monochromen Matrixkamera (Scholz et al. 2019) oder mit einer Hyperspektralkamera (Paulus 2017; Behmann 2016) eingesetzt, um die Pflanzengeometrie auf Organebene genauer erfassen zu können. Die zweidimensionale reflektierte spektrale Information reichte nicht aus, um Objekte genau vermessen zu können (Paulus 2017; Behmann 2016). Dies spiegelte sich in den Untersuchungen zu den optoelektronischen Systemen wieder. Die spektralen 2D-Informationen von Blattschäden mit kleinen Kolonien der Mehlig Kohlblattlaus ähnelten den Blattflächen ohne Insektenbefall und konnte nicht mit den eingesetzten optoelektronischen Systemen erfasst werden. Somit konnten die zweidimensional erfassten optischen Veränderungen bei geringem Befall durch die Mehlig Kohlblattläuse (< 10 Individuen), sowie von Forster et al. (1992) für Integrierten Pflanzenschutz empfohlen, nicht erfasst werden. Es konnten ausschließlich die reflektierten spektralen 2D-Informationen von Schäden durch große Kolonien der Mehlig Kohlblattlaus, die anhand CFBA erfasst wurden, zu deren Detektion verwendet werden. Demnach kann anhand der optoelektronischen Systeme, welche nur zweidimensional reflektierte spektrale Informationen erfassten, der Befallsverlauf der Mehlig Kohlblattlaus nicht relevant wiedergegeben werden. In dem Gewächshausversuch wurde festgestellt, dass insbesondere die geometrischen Blattverformungen von großer Bedeutung waren, da diese am Anfang des Befalls mit Mehlig Kohlblattläusen im Herzbereich einer Kohlpflanze vorkamen. Um die Blattgeometrie erfassen zu können, sind Systeme erforderlich, die neben der zweidimensionalen reflektierten spektralen Information einer Pflanze auch dreidimensional reflektierte spektrale Informationen erfassen.

Die zweidimensionale Erfassung der Larvenschäden der Pflanzen ist mit Farbkameras, Graubildkameras, CFBA und dem Laserschnittkamera-System möglich. Die kostengünstigeren Sensorsysteme wie Farbkameras oder Graubildkameras mit Fremdlichtquellen

eigneten sich gleich gut zur Erfassung von Larvenschäden wie die kostspielige Methode CFBA (Tabelle 36). Die Auswertung der reflektierten 2D-Spektralinformationen mittels Bildverarbeitung war durch die Pflanzengeometrie auf der Organebene der Weißkohlpflanzen, wie überlappte Blattbereiche bzw. senkrechte Blattstellung, gestört. Mit zunehmender Entwicklungsdauer nahm der Anteil an überlappten Blättern mit Kohleulenlarvenschäden im Gewächshausversuch zu, da die Blattfläche der Weißkohlpflanzen mit zunehmender Entwicklungsdauer zunimmt (Lüling et al. 2021a; Olfati et al. 2010). Der zunehmende Anteil an überlappten Blättern und die damit verbundene störende Wirkung auf die automatische Erfassung der Blattfläche der Weißkohlpflanzen wurde auch durch Lüling et al. (2021a) festgestellt. Bei den Kohlmottenlarvenschäden konnten im Gegensatz zu Kohleulenlarven beim Gewächshausversuch keine Zusammenhänge zwischen dem Pflanzenalter und der Anzahl an überlappten Blattschäden festgestellt werden. Dies könnte an den unterschiedlichen Larvengrößen der beiden Arten liegen (Kohlmotte maximal 9 mm und Kohleule maximal 42 mm (Sannino und Espinosa 1999; Rosario und Cruz 1986)) und die damit verbundene verzehrte Blattfläche. Die Verzehrmenge korreliert mit der Larvengröße. Das bedeutet, je größer eine Schmetterlingslarve desto größer ist die konsumierte Blattfläche (Jeon et al. 2006; Morishita und Azuma 1990). Somit kann die digitale Erfassung und Auswertung der Spektralinformation von Pflanzenschäden, die durch Schadschmetterlingslarven verursacht wurden, je nach Pflanzenstadium, Insektenart und Insektenstadium beeinflusst werden.

Unter Berücksichtigung des heutigen Wissensstandes zur Bildverarbeitung bzw. Pflanzenphänotypisierung sowie der erzielten Ergebnisse lässt sich vermuten, dass durch Schadinsekten verursachte Blattschäden mittels optoelektronischer Systemkombination erfasst werden können. Hierbei können Systeme genutzt werden, die einerseits zweidimensionale reflektierte Strahlung (Farb- oder Graubildkamera) und andererseits zurückgeworfene reflektierte Strahlung dreidimensional (Laserscanner) erfassen. Lüling et al. (2021a) konnte die Blattflächen der Weißkohlpflanzen automatisch anhand einer Farbkamera GoPro-Kamera (Hero 7, GoPro Inc., USA) und Bildverarbeitung erfassen. Mit dreidimensionalen Abbildungen von Pflanzen durch Laserscanner könnten die Blattveränderungen gemessen werden (Scholz et al. 2019; Paulus 2017; Behmann 2016). Die Arbeiten von Lüling et al. (2021b), Scholz et al. (2019), Paulus (2017), Behmann (2016) und die hier vorgelegten Versuche weisen darauf hin, dass es mittels optoelektronischer Methoden möglich ist, die gesamte Blattfläche und den Anteil an beschädigten Blattflächen durch Schadschmetterlingslarven sowie die BBCH-Stadien von einer bestimmten Anzahl an Pflanzen automatisch zu ermitteln. Nach Forster et al. (1992) werden bei der Bestandskontrolle 50 Pflanzen empfohlen. Am Zuwachs der beschädigten Flächen könnte wahrscheinlich der Befallsverlauf ermittelt werden, so dass eventuell keine Differenzierung zwischen den alten und neuen Schäden notwendig wäre. Eine weitere Möglichkeit ist die Anzahl an beschädigten Blättern zu erfassen. Um Blattschäden als Boniturmethode verwenden zu können, müssten jedoch neue Schadschwellen basierend auf der Anzahl beschädigter oder verformter Blätter bzw. durch die Erfassung der beschädigten oder verformten Blattfläche erarbeitet werden. In Deutschland werden zurzeit Schadschwellen im Kohlanbau eingesetzt, die auf der Pflanzenanzahl mit bestimmter Anzahl an Schadinsekten

basieren (Forster et al. 1992). In den USA werden neben der Pflanzenanzahl mit Schadschmetterlingslarven auch sichtbare Pflanzenschäden als Boniturmethode verwendet (Shelton et al. 1983; Chalfant et al. 1979). Bei der Mehligen Kohlblattlaus basieren alle Schadschwellen im Kohlanbau auf der Erfassung der Pflanzen mit einer bestimmten Individuenanzahl (≥ 5 Individuen (Kline und Kline 2015) oder ≥ 10 Individuen (Forster 1997)). Bei der Mehligen Kohlblattlaus muss untersucht werden, in wie weit die Blattverformungen zur Erfassung der Populationsdynamik geeignet sind und ob diese mit 3D-Laserscannern erfasst werden können.

Zusammenfassend unter Berücksichtigung des heutigen Wissensstands sowie der in der Arbeit erzielten Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die Erfassung von Blattschäden sowie Blattverformungen mit optoelektronischen Systemen erfolgsversprechender ist als die Erfassung von Schadinsekten auf einer Pflanze. Zur Detektion von Blattschäden sowie Blattverformungen sollte eine Kombination aus optoelektronischen Systemen, die zwei- und dreidimensionale spektrale Informationen erfassen können, verwendet werden. Es ist weitere gezielte Forschung zur Entwicklung von leistungsfähigen Algorithmen (Autoencoder) in Kombination mit unterschiedlichen optoelektronischen Sensoren sowie die damit verbundenen ökonomischen Schadschwellen und Bekämpfungsschwellen notwendig. Anhand der Ergebnisse könnten für die weiteren Forschungsarbeiten Farbkameras, Graubildkameras in Kombination mit Rotlicht emittierender Fremdlichtquelle, CFBA und Laserschnittkamera-Systeme nach dem Prinzip der Lasertriangulation zur Erfassung von Objekten (Insekten bzw. Schäden) auf einer Pflanze empfohlen werden. Farbkameras waren am kostengünstigsten und am einfachsten in der Handhabung. CFBA war am teuersten und am kompliziertesten in der Handhabung. Die optoelektronischen Systeme könnten entweder an landwirtschaftliche Fahrzeuge (z. B. Schlepper) (Ruckelshausen 2016), an selbstfahrende Trägerfahrzeuge (z. B. BoniRob) (Scholz et al. 2019; Jenz et al. 2016; Ruckelshausen et al. 2010) oder autonom fliegende Sensorplattformen (z. B. Multikopter) (Pohl et al. 2020; Pflanz et al. 2018; Ruckelshausen et al. 2010) befestigt werden. Die Eignung der Hyperspektralkameras zur Erfassung von Blattschäden sowie Blattverformungen wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Eine Bolometerkamera sowie 3D TOF-Kamera nach dem Pulslaufzeitverfahrensprinzip (O3D 201PMD 3D TOF-Kamera) erwiesen sich als ungeeignet. Somit wurde gezeigt, dass eine Automatisierung der Bestandskontrolle im Kohlgemüseanbau möglich und erstrebenswert ist. Sie ist aber zurzeit noch nicht praxistauglich und es bedarf weiterer Forschung. Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse zum Einsatz des autonomen Feldroboters BoniRob (Scholz et al. 2016) sowie bei den Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Pflanzenschutzmittelapplikationen mit Hilfe von Drohnen (Rajmis et al. 2021) wurde gezeigt, dass Automatisierung wirtschaftlich sein kann. Des Weiteren kann es die Umsetzung des Integrierte Pflanzenschutzes fördern (Rajmis et al. 2021; Scholz et al. 2016).

4.3 Evaluierung der Systeme zur Erfassung der geflügelten adulten Kohlgemüseschädlinge

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit war die Evaluierung von insgesamt sechs stationären Sensorsystemen zur Erfassung der geflügelten adulten Schadinsekten (s. 3.3). Die Eignung von vier stationären optoelektronischen Sensorsystemen (TrapView, Z-Trap, digitales Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück, TCS) zur Erfassung von Kohlmotten, Kohleulen, Kleinen Kohlfiegen bzw. Kohldrehherz gallmücken wurde im Folgenden anhand der Feldversuche evaluiert. Weiterhin wurden zwei bildgebende Lichtschrankensensor-Systeme (OEOS-System und Infrascan 5000) in Klimakammerversuchen mit der Kohlmotte, dem Kleinen Kohlweißling, der Kohleule und der Kleinen Kohlflye evaluiert. Die Eignung der Systeme, bestimmte Schadinsekten zu erfassen, hing von der Insekten- und Systemart ab, daher wurden vor der allgemeinen Bewertung die optoelektronische Systeme zunächst getrennt voneinander evaluiert.

Bevor drei untersuchte digitale Pheromonlockstofffallensysteme (TrapView (Efos, Slowenien), Z-Trap-System (spensa Technologies, USA) und das Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück) für die automatische Erfassung von bestimmten Schadinsekten evaluiert wurden, wurde die Eignung sowie die Handlichkeit der konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen (Delta-, Trichter- bzw. Tetra-Falle) zur Erfassung der Flugdynamik von Kohlmotten, Kohleulen bzw. Kohldrehherz gallmücken (s. 2.4.3.2 und 2.4.5) in einem Feldversuch auf ihre Praktikabilität in der Kulturführung bewertet. Keine der eingesetzten konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen führte zu Komplikationen bei den Kulturpflegemaßnahmen (z. B. Jäten oder Gießen). Die eingesetzten Sexualpheromonlockstofffallen wurden ebenso nicht durch Kulturpflegemaßnahmen gestört. Sowohl die erzielten Ergebnisse mit konventionellen Deltafallen und einem Sexuallockstoffdispenser als auch die Literaturergebnisse weisen darauf hin, dass Sexualpheromonlockstofffallen zur Flugaktivitätserfassung von Kohlmotten gut geeignet sind. Die Anzahl an männlichen Kohlmotten auf den Klebeböden der Deltafallen korrelierte positiv signifikant mit der Kohlmottenlarvenanzahl auf den Pflanzen im Feld. Dies spiegelte die Ergebnisse von Nofemela (2010), Sulifoa und Ebenebe (2007), Reddy und Guerrero (2001) sowie Baker et al. (1982) wieder. Nach Baker et al. (1982) kann der Kohlmottenflug im Frühjahr besonders gut anhand der Pheromonfallenfänge in Kombination mit einem Tages-Temperatursummenmodell vorhergesagt werden. Nach Nofemela (2010) korreliert die Adultenanzahl in den Sexualpheromonfallen mit der Larvenanzahl besonders gut, wenn die Parasitierungsrate von Larven und Eiern der Kohlmotte durch natürliche Gegenspieler gering war. Reddy und Guerrero (2001) haben Schadschwellen für Sexualpheromonfallenfänge für den Kohlanbau in Indien erarbeitet. Demnach wird eine Behandlung bei einem Fang von acht und 12 Kohlmottenmännchen innerhalb von 24 Stunden pro Sexualpheromonlockstofffalle pro Nacht in Weißkohl und Blumenkohl empfohlen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Bonitur des Schädling relativ unkompliziert war. Denn in den Delta-Sexuallockstofffallen, welche direkt über dem Pflanzenbestand positioniert wurden, kamen hauptsächlich Kohlmotten als Schadschmetterlinge vor. Damit konnten die

Kohlmotten ohne Verwechslungsgefahr bonitiert werden. Somit wurde deutlich, dass die automatisierte Erfassung des Schädlings empfehlenswert ist.

Trotz der relativ geringen Populationsdichten der Kohleulen im Versuchszeitraum, welche sich sowohl durch geringe Fallenfänge (maximal 4 Kohleulen pro Falle) als auch durch geringe Larvenzahlen (maximal 2 Kohleulenlarve pro Pflanze) äußerten, konnten beim Einsatz der Trichter-Sexualpheromonlockstofffalle zur Erfassung der Kohleulenmännchen für die praktische Anwendung wichtige Ergebnisse generiert werden. Die Sexualpheromonlockstofffallen konnten zur Erfassung der Flugaktivität der Kohleule eingesetzt werden. Denn die Anzahl an männlichen Kohleulen korrelierte in den meisten Fällen positiv signifikant mit der Anzahl der Eigelege mit einer Zeitverzögerung von einer, drei bzw. sieben Wochen. Die zeitliche Verzögerung der Korrelation zwischen dem Vorkommen der ersten Kohleulen und der ersten Eigelege betrug neun Tage bei Terytze und Adam (1981). Nach Johansen (1997a) kann die Dauer der Flug- und Ovipositionszeit der Kohleulen etwa vier bis sieben Wochen betragen. Dies könnte die unterschiedlichen Zeitkorrelationen in der Arbeit begründen. Bei Terytze und Adam (1981) sowie Terytze et al. (1987) führte das Vorkommen von zehn Kohleulen innerhalb von 24 Stunden zu einer intensiven Eiablage. In der Versuchszeit konnten zu keinem Zeitpunkt mehr als zehn Männchen innerhalb von 24 Stunden erfasst werden und es wurde kein hoher Besatz mit Kohleulenlarven dokumentiert. Im Gegensatz zum Vorkommen von Eigelegen der Kohleulen korrelierte die Larvenanzahl mit der Kohleulenanzahl in den Trichterfallen schlechter. Die schlechtere Korrelation zwischen der Kohleulenanzahl und Kohleulenlarven kann mit einer hohen Ei- und Larvenmortalität begründet werden. Die Larvenmortalität kann laut Literaturangaben zwischen 93 % (Johansen 1997b) und 95 % (Hommes 1983) liegen. Eine weitere wichtige Feststellung der Arbeit war, dass die Fängigkeit der konventionellen Trichter-Lockstofffallen durch bestimmte Positionierung im Feld negativ beeinflusst werden kann. Um die Flugdynamik der Kohleule erfassen zu können, müssen die Fallen in der Höhe von 1,2 m über dem Pflanzenbestand platziert werden. Denn die Positionierung der Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen in einer Höhe von 50 cm (Jahr 2013) über dem Pflanzenbestand führte zu keinen Kohleulenfängen im Gegensatz zu 1,2 m Höhe. Dies entspricht auch den Untersuchungen von Terytze und Adam (1981). Zudem wurde im Gewächshausversuch festgestellt, dass nicht alle von der Falle angelockten Kohleulen im Körbchen der Trichterfalle landen. Im Gewächshausversuch landeten die meisten Kohleulenmännchen auf einer Pheromonhalterung im Fallendach oder auf einer Falle (Z-Trapversuch) und führten bestimmte Bewegungen durch, die nach Stan (1996) und Birch et al. (1989) als Balzverhaltensaktivitäten beschrieben werden. Balzverhaltensaktivitäten führten jedoch dazu, dass die Kohleulen nicht in das Fallenkörbchen gingen. Dies könnte die geringe Anzahl an Kohleulen in Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen erklären. Die Bonitur der Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen-Fänge war schwieriger im Vergleich zu Delta-Sexualpheromonlockstofffallen. Denn neben den 66 Kohleulen wurden insgesamt in beiden Jahren an beiden Standorten 405 weitere Schmetterlinge aus der Familie der Eulenfalter erfasst. Die am häufigsten auftretende Falterart war die Hellrandige Erdeule (*Ochropleura plecta* L.), die auch zur gleichen Zeit wie die Kohleule vorkam. Um die Kohleulen von den anderen Schmetterlingen unterscheiden zu können, mussten alle Falter unbeweglich sein.

Die Ergebnisse wurde auch durch Johansen (1996) bestätigt, die neben den Kohleulen auch andere Schmetterlinge aus der Familie Eulenfalter in den Trichter-Fallen festgestellt hat. Somit sind bei der Auswertung der Trichterfallenfänge Fachkenntnisse erforderlich. Trichter-Sexualpheromonlockstofffallen können aber bei richtiger Positionierung im Feld zur Erfassung der Flugaktivität von Kohleulen eingesetzt werden. Da die Falle noch andere Schmetterlinge aus der Familie Eulenfalter anlockt, sollte die Fallenauswertung durch geschultes Personal erfolgen. Um die Populationsdynamik der Kohleule genauer erfassen zu können, wurde von Johansen (1996) empfohlen, die Sexuallockstofffalle zusammen mit einem Tages-Temperatursummenmodell zu verwenden. Durch die Untersuchungen wurde deutlich, dass die automatisierte Auswertung von Fallenfängen der Trichter-Sexuallockstofffalle aufgrund der geringen Selektivität des Pheromons komplizierter sein wird im Vergleich zu Delta-Sexualpheromonlockstofffallen.

Die Flugaktivität der Kohldrehherzgallmücke kann, wie bereits in der Literatur beschrieben, anhand der Tetra-Sexualpheromonlockstofffalle erfasst werden (Hallett und Sears 2013; Sauer und Fähndrich 2010). Die konventionellen Tetra-Fallen mit dem Sexuallockstoffdispenser zum Anlocken der Kohldrehherzgallmücke wurden direkt über dem Pflanzenbestand positioniert. Die Auswertung der Klebeböden mit Kohldrehherzgallmücken musste unter dem Binokular erfolgen, da es sich - wie bereits bei Eder et al. (2005) beschrieben - um einen relativ kleinen Schädling handelt und neben den Kohldrehherzgallmücken noch andere Mückenarten vorkamen. Anhand der Pflanzenschäden kann die Befallssituation der Kohldrehherzgallmücken im Feld ermittelt werden. Jedoch können bei deutlich sichtbaren Schadsymptomen keine Pflanzenschutzmaßnahmen eingeleitet werden, denn sowohl in den durchgeführten Versuchen sowie nach Sauer und Fähndrich (2010) sind die meisten Larven dann verpuppt und im Boden und der Schaden durch die Larven bereits unwiderruflich eingeleitet. Die Eier (0,3 mm) und die Larven der Kohldrehherzgallmücke (Tabelle 1) sind relativ klein und auf dem Feld nicht einfach erkennbar. Die Larvenentwicklungsdauer des Schädlings von acht bis 14 Tagen ist relativ kurz (Sauer und Fähndrich 2010; Allen et al. 2008). Um Pflanzenschutzmaßnahmen rechtzeitig einleiten zu können, wird in der Praxis die Flugaktivität der Kohldrehherzgallmücke mit einer Tetra-Sexualpheromonlockstofffalle erfasst. Je nach Literatur betragen die Schadschwellen entweder 4-10 Mückenmännchen pro Falle innerhalb von 24 Stunden (Hallett und Sears 2013) oder 10 Mückenmännchen pro Falle pro Woche (Sauer und Fähndrich 2010). Es existieren keine Schadschwellen auf Basis der Larvenanzahl im Kohlgemüsebestand (Hallett und Sears 2013; Sauer und Fähndrich 2010). Bei den Untersuchungen wurden Daten zur Anzahl an Kohldrehherzgallmücken in den Tetra-Sexualpheromonlockstofffallen sowie der Anzahl an geschädigten Weißkohl- und Brokkolipflanzen erhoben. Der Anteil an geschädigten Brokkolipflanzen war höher als der Anteil an geschädigten Weißkohlpflanzen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass entweder die Kohldrehherzgallmücke Brokkoli im Vergleich zu Weißkohl bevorzugt oder dass Brokkoli sensibler auf den Kohldrehherzgallmückenbefall im Vergleich zu Weißkohl reagiert. Nach Sauer und Fähndrich (2010) reagieren besonders Brokkoli, Kohlrabi und Rosenkohl sensibel auf einen Kohldrehherzgallmückenbefall. Demnach sollte insbesondere bei Brokkoli-, Kohlrabi- und Rosenkohlanbau eine Tetra-Sexualpheromonlockstofffalle zur Kontrolle der

Kohldrehherzgallmücke eingesetzt werden. Mit den Untersuchungen wurde nochmals verdeutlicht, dass bei einem sachgemäßen Gebrauch eine Tetra-Sexualpheromonlockstofffalle ein wichtiges Werkzeug zur Erfassung der Kohldrehherzgallmücke darstellt.

Die Ergebnisse der durchgeführten Feldversuche zeigten eine gute Korrelation zwischen der Männchenanzahl bestimmter Schadinsekten in den Sexualpheromonlockstofffallen und der Larven- bzw. Eigelegeanzahl auf den Pflanzen. Wie auch in anderen Arbeiten (Hallett und Sears 2013; Nofemela 2010; Sauer und Fähndrich 2010; Sulifoa und Ebenebe 2007; Reddy und Guerrero 2001; Johansen 1996; Terytze et al. 1987; Baker et al. 1982; Terytze und Adam 1981) wird die Bedeutung von Sexualpheromonlockstofffallen für die Erfassung, insbesondere der Kohlmotten sowie der Kohldrehherzgallmücken, und die Notwendigkeit der digitalen Pheromonlockstofffallensysteme bestätigt.

In Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wurden drei digitale Sexualpheromonlockstofffallensysteme (TrapView, Z-Trap-System und das digitale Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück) auf ihre praktische Verwendung im Feld evaluiert. Mit TrapView und Z-Trap-System war es möglich, bestimmte Schadschmetterlinge entweder im Feld oder unter kontrollierten Bedingungen automatisch zu erfassen. Die TrapView und das Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück basieren auf bildgebender Erfassung (z. B. mittels Farbkameras) einer Klebefläche. Bei dem Z-Trap-System wurden die Insekten mittels eines Biosensors erfasst (s. 2.5.1). TrapView und Z-Trap wurden kommerziell vertrieben. Je nach Fallensystem unterschieden sich der Entwicklungsstand sowie die zu detektierende Insektenarten. Daher werden die Systeme getrennt voneinander bewertet.

TrapView (Efos, Slowenien) ist ein relativ weit entwickeltes Fallensystem, dessen Inbetriebnahme einfach und problemlos erfolgte. Das System wurde störungsfrei über Sonnenkollektoren mit Strom versorgt und die Datenübermittlung auf ein Benutzerkonto über GSM-Funk erfolgte einmal täglich grundsätzlich reibungslos. Somit konnten die Veränderungen der Populationsdynamik - so wie in der Literatur in Zusammenhang mit Fangzahlen und den damit verbundenen Bekämpfungsschadsschwellen empfohlen (Hallett und Sears 2013; Reddy und Guerrero 2001; Terytze et al. 1987) - innerhalb von 24 Stunden ermittelt werden. Die Fallen des Systems konnten von einem Büroarbeitsplatz kontrolliert werden. Nur die Fallenwartung, wie z. B. der Pheromonwechsel (Tabelle 51), musste vor Ort erfolgen. Dadurch, dass jede Falle mit der Webseite der Firma verbunden war, war es möglich zu sehen, wo sich die Falle zu einem bestimmten Zeitpunkt befindet (GPS). Dies machte es schwerer für fremde Personen das Fallensystem unbemerkt zu entwenden.

Die Versuche mit dem TrapView-Fallensystem haben gezeigt, dass das System nicht für jede Insektenart gut geeignet war. Die signifikant geringere Anzahl an Kohleulen bzw. Kohldrehherzgallmücken in den Sexualpheromonlockstofffallen des digitalen Systems im Vergleich zu konventionellen Sexualpheromonlockstofffallen lassen auf eine schlechte Eignung des Systems, diese digital zu erfassen, schließen. Die schlechte Eignung des Systems Kohleulen bzw. Kohldrehherzgallmücken zu fangen hing hauptsächlich mit der Fallenform des Systems zusammen. Nach Sauer und Fähndrich (2010) werden für

Kohldrehherzgallmücken Tetra-Sexualpheromonlockstofffallen und nach Terytze und Adam (1981) für Kohleulen Fallen empfohlen, die zu allen vier Himmelsrichtungen offen sind. Desweiteren war es nicht möglich die Kohldrehherzgallmücken auf Grund der geringen Kameraauflösung digital mit dem Fallensystem zu erfassen. Die Auflösung sowohl der RGB-Kameras (4 x je 2 MPix-Kamera) von einem Standard TrapView-Modell als auch der RGB-Kameras (4 x je 5 MPix-Kamera) eines TrapView+ Modells, welche für kleine Insekten entwickelt wurden und nebenbei zusammen mit Kohldrehherzgallmücken Sexualpheromon getestet wurden, reichte nicht aus, um die Kohldrehherzgallmücken auf den RGB-Fotos des Klebebodens bestimmen zu können.

Anhand der erhobenen Daten konnte gezeigt werden, dass die Eignung des Systems Kohlmotten digital zu erfassen als gut bewertet werden kann. Die Anzahl der Kohlmotten in der grünen Delta-Sexualpheromonfalle des Systems unterschied sich nicht signifikant von der männlichen Kohlmottenanzahl in den braunen konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen. Die automatische Identifizierung der Kohlmotten war nicht fehlerfrei. Die Fehlerquote der automatischen Identifizierung lag zwischen 25 % und 100 %, daher mussten die bildbasierten Daten nachträglich manuell auf dem Benutzerkonto korrigiert werden. Da die Kohlmotten auf dem Computermonitor gut erkennbar waren, wurden pro Falle höchstens fünf Minuten für die Nachkorrektur benötigt, somit ist der Aufwand als gering zu bewerten. Nach Angaben von Boštjan Božič (persönliche Mitteilung, Efos, Slowenien) wurde die automatische Kohlmotten-Identifizierung seitdem stark überarbeitet und es werden anhand der Fangzahlen Bekämpfungsschadsschwellen von der Firma für Kohlmotten erarbeitet, die wahrscheinlich im Jahr 2022 getestet werden. Diese basieren auf der Kohlmottenanzahl, Temperatur- und relativen Feuchtigkeitsmessungen, die Sensoren hierfür gehören mittlerweile zu einem Standard-Fallensystem dazu.

In Anbetracht der erzielten Ergebnisse mit dem Fallensystem sowie der Tatsache, dass die Kohlmotte als einer der ersten Schadsmetterlinge in der Versuchslaufzeit vorkam (s. 3.2.2.1) und insbesondere am Anfang der Anbausaison während der Ausbildung des Kopfbereichs zu schweren Schäden im Kohlgemüsebestand führen kann (Forster 1997), ist sogar das veraltete TrapView für den Praxiseinsatz empfehlenswert. Der Einsatz von TrapView war mit konventionellen Fallen vergleichbar und führt zusätzlich zu Zeitersparnis, denn die Fallen mussten nicht vor Ort wöchentlich kontrolliert werden. Die Kosten unterscheiden sich je nach TrapView-Paket der Firma Efos. Es ist möglich ein TrapView-Fallensystem entweder für 820 € zu kaufen oder für 650 € pro Jahr zu mieten. Bei dem Kaufpreis sind die Pheromonkosten, 85 € jährliche Kosten für SIM-Card und Klebeböden sowie die jährliche Efos-Servicekosten (z. B. automatische Schädlingserkennung), welche im ersten Jahr 250 € und im zweiten Jahr 100 € betragen, nicht enthalten. Bei dem Mietpreis sind ausschließlich die Kosten für Pheromondispenser nicht berücksichtigt.

Die Inbetriebnahme der technisch modifizierten Trichterfallensysteme der Hochschule Osnabrück war einfach. Jedoch war die Fallenform des Systems weder für die Kohleule noch für die Kohlmotte optimal. Aufgrund der Größe des Systems (s. 2.5.1.3) kann dieses nicht - wie für die Kohleule empfohlen - in einer Höhe von 1,2 m (Terytze et al. 1987) aufgehängt werden. Dies führte dazu, dass sich in der Falle keine Kohleulen vorfanden. Das System konnte nur auf dem Boden positioniert werden, so dass sich der Fallentrichter mit

Dispenserkorb direkt über dem Bestand befand. Die Positionierung war zwar gut für den Fang von Kohlmotten, jedoch war die Fallentrichterform mit Dispenserkorb für die Erfassung des Schädlings ungünstig. Dies äußerte sich in einer um 98 % geringeren Kohlmottenanzahl in dem technisch modifizierten Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück im Vergleich zur konventionellen Delta-Falle. Somit kann das Fallensystem für den Praxiseinsatz nicht empfohlen werden.

Das Z-Trap-System (spensa Technologies, USA) ist eine digitale Delta/Trichter-Sexuallockstofffalle, welche die Schadinsekten durch einen elektronischen Impuls mittels eines Biosensors zählt und nicht wie bei anderen Fallensystemen anhand Auszählens des Schädlings auf einem RGB-Bild des Klebebodens durch Bildverarbeitung. Durch das Benutzerkonto konnte der Aktivitätszeitplan des Biosensors zur Erfassung von einer bestimmten Schadinsektenart innerhalb von 24 Stunden einfach festgelegt werden. Die Befestigung der Pheromondispenser war kompliziert, denn die Pheromonhalterung des Fallensystems war für die im Versuch verwendeten Dispenser unpassend. Die Stromversorgung der Z-Trap erfolgte über Akkus, zum Laden musste die Z-Trap für einen Tag abgehängt werden. Bei dem Model aus dem Jahr 2012, welche für Versuchszwecke zur Verfügung gestellt wurde, war die Basisstation nicht witterungsfest und konnte nicht während der Versuchslaufzeit draußen aufgestellt werden. Die Z-Trap übermittelte die Daten an die Basisstation des Fallensystems über Radiowellen. Für eine problemlose Datenübertragung durfte die räumliche Distanz zwischen Z-Trap und Basisstation 60 m nicht überschreiten. Die Basisstation brauchte wiederum eine Internetverbindung, um die Daten zu verarbeiten. Diese Faktoren grenzten den Anwendungsradius des Fallensystems stark ein. Des Weiteren war die Inbetriebnahme aufgrund der fehlerhaften Bedienungsanleitung relativ kompliziert im Vergleich zu anderen technisch modifizierten Fallensystemen. Die technische Unterstützung der Firma (über das Internet und Telefon) war jedoch motiviert, lösungsorientiert und sehr hilfsbereit.

Die Aktivierungsprobleme des Fallensystems führten dazu, dass im ersten Jahr keine verwertbaren Ergebnisse im Feld gewonnen werden konnten. Die Versuche in den Klimakammern haben ergeben, dass das Fallensystem zur Erfassung von Kohleulen und Kohlmotten grundsätzlich geeignet war. Durch den Stromschlag wurden die Insekten nicht getötet, um die Verfälschung der Ergebnisse durch verbleibende Insekten zwischen den Stäben zu vermeiden. Kohleulen waren für eine Minute und Kohlmotten für fünf Minuten bewusstlos. Somit waren Stromversorgung, die Art der Pheromonhalterung und die Wetterbeständigkeit des Fallensystems aus dem Jahr 2012 verbesserungswürdig. Das Z-Trap-System gibt es seit Ende des Jahres 2015 mit einer Basisstation für den Außenbereich und mit einer deutlich besseren Auflösung (200 statt 1 Sempel/sec), jedoch fehlen die Versuche mit dem optimierten System. Dies macht die abschließende Evaluierung schwierig. Anhand der Ergebnisse mit dem veralteten Fallensystem kann die Eignung des Systems zur Erfassung von Kohlmotten nicht ausgeschlossen werden. Die Fallenform war insbesondere ungünstig zur Erfassung der Kohleulen, denn es war nicht wie empfohlen zu allen Himmelsrichtungen offen (Terytze et al. 1987). Die Erfassung von Kohlmotten mit Z-Trap im Feld wurde im Versuchszeitraum nicht getestet. Bei der Erfassung der Kohleulen mit einem entsprechenden Sexualpheromon und einer entsprechenden konventionellen Falle wurde

neben Kohleulen auch Beifang im Form von anderen Schmetterlingen aus der Familie der Eulenfalter sowohl im Versuchszeitraum als auch in der Literatur (Johansen 1996; Stan 1996) festgestellt. Die online Korrektur der Fanganzahl war mit dem Fallensystem aufgrund fehlendem visuellen Nachweis (z. B. durch ein RGB-Bild) nicht möglich. Jedoch kann ein bestimmter Aktivitätsplan des Fallensystems eingestellt werden, durch den eventuell die Kohleulen selektiv erfasst werden könnten. Hierfür ist es wichtig zu wissen, ob Aktivitätsunterschiede in der Uhrzeit zwischen der Anflugdynamik der Kohleulen und der anderen Schmetterlingsarten aus der Familie der Eulenfalter bestehen, die durch den Sexuallockstoff angelockt werden. Anhand der Versuchsergebnisse mit dem veralteten System und der Literaturergebnisse (Wilson et al. 2017; Holguin et al. 2010) kann zurzeit das Fallensystem zur Erfassung von Kohleulen und Kohlmotten für die Praxis nicht empfohlen werden. Hierfür muss die Fallenform zunächst optimiert werden und im Anschluss sind umfassende Studien erforderlich, um die Eignung eines überarbeiteten Fallensystems neu zu bewerten.

Aus den hier vorgelegten Versuchen mit digitalen Sexualpheromonlockstofffallensystemen wurden folgende Erkenntnisse abgeleitet. Digitale Sexualpheromonfallensysteme sind grundsätzlich geeignet, um geflügelte Schadinsekten automatisch zu erfassen. Um Lockstofffallen einsetzen zu können, sind kommerziell verfügbare Lockstoffdispenser notwendig. Je selektiver ein Lockstoff war, desto besser funktionierte die automatische Erfassung der digitalen Fallensysteme. Die digitalen Fallensysteme mit Farbkameras zur visuellen Schadinsektenerfassung haben sich besonders gut bewährt. Hierbei waren die online-Nachkorrekturen an einem Arbeitsplatz möglich. Mithin war eine Zeitersparnis durch das Wegfallen des Fahrweges sowie des Weges zur Falle möglich. Es gab keine Falle, die für alle Schadinsektenarten verwendet werden konnte. Je nach Schädlingsart unterschieden sich die Fallenformen. Um Schadinsekten mit technisch modifizierten Sexualpheromonfallensystemen erfolgreich erfassen zu können, müssen die vorgeschriebenen Fallenarten je nach Schädlingsart und die Fallenpositionierungen berücksichtigt werden. Je kleiner ein Schadinsekt war, umso besser musste die Kameraauflösung zur deren Erfassung sein. Zu dem Einsatz von Sexualpheromonfallen in Zusammenhang mit Schadschwellen und den damit verbundenen Bekämpfungsschwellen in Deutschland ist weitere Forschung erforderlich. Es muss des Weiteren überprüft werden, inwieweit die Bekämpfungsschwellen durch die Erfassung von Tages-Temperatursummenmodellen und die damit verbundenen Fallenfänge einer bestimmten Schädlingsart verbessert werden können. Darüber hinaus muss in weiterer Forschungsarbeit überprüft werden, wie das Vorkommen von bestimmten Schadinsekten miteinander korreliert. Dennoch konnte von den drei untersuchten Sexualpheromonfallensystemen TrapView für die Praxis zur automatischen Erfassung der Flugdynamik der Kohlmotten empfohlen werden. Es sollte jedoch bedacht werden, dass andere Firmen (Preti et al. 2021b; Cardim Ferreira Lima et al. 2020) wie z. B. Pessel Instruments (Österreich) auch technisch modifizierte Sexualpheromonfallen (iScout) anbieten. Das Z-Trap-System bedarf weiterer Forschung und das digitale Sexualpheromonfallensystem der Hochschule Osnabrück wird als ungeeignet bewertet.

In relativ kurzer Zeit, vom 10.08.2012 bis zum 30.05.2015, und einem kleinen Budget wurde von der Hochschule Osnabrück (Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik) in Zusammenarbeit mit JKI (Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst) ein TCS-Prototyp (s. 2.5.2) zur automatischen Erfassung der Kleinen Kohlflyge entwickelt. Es handelte sich um ein System, welches ohne Lockstoffe die Kleine Kohlflyge auf einer Pflanze in Bodennähe bei der Eiablage auf der Basis der Bildverarbeitung der Webkamera-Bilder erfasste. Anhand der Untersuchungen mit dem TCS wurde festgestellt, dass die konventionellen Methoden (z. B. Eimanschetten) zur Erfassung der Eiablage der Kleinen Kohlflyge grundsätzlich digitalisiert werden können. Mit TCS wird jedoch nicht die abgelegte Anzahl an Eiern, sondern die Weibchenanzahl bei der Eiablage indirekt erfasst. Die Weibchen, die Eier abgelegt haben, verweilten im Durchschnitt viermal länger auf dem bodennahen Bereich einer Brokkolipflanze im Vergleich zu Weibchen, die keine Eier ablegten. Dies entspricht den Ergebnissen von Morley et al. (2005). In den Untersuchungen hielten sich die Kleinen Kohlfiegen im Falle einer Eiablage auch wesentlich länger auf im Vergleich zu Kleinen Kohlfiegen, die keine Eier abgelegt haben. Obwohl das Verhalten der Kleinen Kohlflyge durch mehrere Faktoren wie olfaktorische Attraktivität einer Pflanze (Roessingh et al. 1997; Roessingh et al. 1992; Städler und Schöni 1990; Zohren 1968), die visuellen Eigenschaften des Hintergrunds und des Blattes (Košťál und Finch 1996; Košťál 1991; Prokopy et al. 1983a, 1983b) sowie mechanische Eigenschaften des Blattes (Roessingh und Städler 1990) bei der Eiablage beeinflusst wird, konnte kein Einfluss der TCS-Rahmens (Abbildung 21B) auf das Verhalten der Kleinen Kohlflyge bei der Eiablage festgestellt werden. Die Ergebnisse der Arbeit weisen darauf hin, dass gelb emittierte TCS-Innenwände sowie braun, gelb bzw. silbern emittierte TCS-Außenwände keinen Einfluss auf das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflyge haben.

Demnach war es grundsätzlich möglich, die Kleine Kohlflyge anhand von TCS automatisch und digital auf dem Feld zu erfassen. Es zeigte sich jedoch auch, dass sowohl der TCS-Prototyp wie die Verwendung des TCS auf dem Feld weiterer Forschungsarbeiten bedarf. Diese Punkte werden im Weiteren näher erläutert. Bei der Anwendung der TCS entstanden die meisten Fehlermeldungen entweder aufgrund der Steuerung der drei Webkameras des Systems oder aufgrund der mangelnden Kompatibilität zwischen Linux (Raspberry Pi; Einplatinencomputer) und Windows (Webkameras) Betriebssystemen. Um die Schwierigkeiten bei der Steuerung der drei Webkameras zu umgehen und die Kosten für das TCS zu senken, wurde im Rahmen einer Hausarbeit der Hochschule Osnabrück zum Thema "Bildgebendes Sensorsystem zur Insektendetektion" von Feldkämper und Glaser (2014) die Anwendung von zwei statt drei Webkameras untersucht. Demnach können grundsätzlich zwei Kameras verwendet werden. Damit ist es möglich, den Großteil des Brokkolistamms zu erfassen. Nebenbei entsteht jedoch ein Bereich, der durch die Kameras nicht abgedeckt wird. Der durch Kameras nicht abgedeckte Stammbereich variierte je nach Stammform und Größe und konnte zwischen 15 % und 30 % des Pflanzenumfangs betragen. Sowohl in der Literatur (Zohren 1968) als auch anhand der durchgeführten Feldversuche wurden bei der Kleinen Kohlflyge bestimmte Verhaltensmuster auf einer Pflanze vor der Eiablage festgestellt. Die wichtigsten Phasen im bodennahen Bereich vor der Eiablage waren der sogenannte Rund-um-Lauf, Klettern und Eiablage. Bei dem Rund-um-Lauf und Klettern

bewegte sich eine Kleine Kohlfliege um eine Pflanze herum und konnte von den drei Kameras nacheinander erfasst werden. Dies deutet darauf hin, dass zwei Kameras bei der Erfassung der Kleinen Kohlfliege im bodennahen Bereich ausreichen würden. Inwieweit der nicht abgedeckte Bereich die Erfassung der Kleinen Kohlfliege stört, muss durch weitere Forschungsarbeit genau untersucht werden. Des Weiteren sollte der Einsatz einer automatischen Zeiteinstellung durch ein Modul mit einer Echt-Zeit-Uhr in Raspberry Pi (Einplatinencomputer) zur Verbesserung der Kompatibilität zwischen Linux (Raspberry Pi; Einplatinencomputer) und Windows (Webkameras) geprüft werden.

Weiterer Optimierungsbedarf bestand hinsichtlich der automatischen Erkennung der Kleinen Kohlfliege. Das System hat die Kleine Kohlfliege anhand der Pixelanzahl erfasst und nicht anhand der heutzutage üblichen auf Autoencoder basierende Bildverarbeitung (Rettig 2022; Kirkeby et al. 2021; Zhong et al. 2018; ENDURE International Conference). Im Feldversuch stellte sich heraus, dass die automatische Erkennung der Kleinen Kohlfliege durch dynamische Einflüsse und insbesondere durch Sonnenlicht und die damit verbundene Schattenbildung beeinflusst wurde. Nach Lüling et al. (2021b) unterscheidet sich die Stärke eines Schattenwurfs je nach Uhrzeit. Die Eiablage der Kleinen Kohlfliege in den Feldversuchen zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs fand zwischen 10 Uhr morgens und 20 Uhr abends statt. Dies widerspricht den Ergebnissen von Zohren (1968) und der bis zum heutigen Zeitpunkt in der Praxis herrschender Annahme, dass die meisten Eier in den ersten Stunden der Hellphase abgelegt werden. Die durch Zohren (1968) erzeugten Ergebnisse zur Eiablage der Kleinen Kohlfliege werden durch Hawkes (1972) und den eigenen Ergebnissen widerlegt. Nach Hawkes (1972) werden die meisten Eier der Kleinen Kohlfliege in der Zeit zwischen 16 und 17 Uhr abgelegt. Im Versuchszeitraum zur Charakterisierung des Arbeitsbereichs in dieser Arbeit wurden die meisten Eier von der Kleinen Kohlfliege im Zeitraum zwischen 12 und 20 Uhr gelegt. Demnach muss die TCS in dem Zeitraum zwischen 12 und 20 Uhr aktiv sein, um die Kleine Kohlfliege bei der Eiablage erfassen zu können. Inwieweit die reduzierte Aktivitätszeit und die auf Autoencoder basierende Bildverarbeitung die automatische Auswertung verbessert, sowie die damit verbundene mögliche Senkung des Stromverbrauchs, muss durch weitere Forschungsarbeit untersucht werden.

Die Daten des Sensorsystems wurden bei dem Prototyp auf eine Speicherkarte gespeichert. Inwieweit dies verbessert werden kann, muss durch weitere Forschungsarbeiten untersucht werden. Für einen Einsatz in der Praxis wäre es besser, wenn die Daten auf einen Server weitergeleitet werden. Damit wäre es nicht nötig rauszufahren, um extra die Daten auszulesen. Die Stromversorgung des Sensorsystems bedarf auch weiterer Forschung.

Aufgrund der nötigen Optimierungen bei dem TCS-Prototyp konnte durch die vorliegende Arbeit nicht die genaue notwendige TCS-Anzahl in einem Kohlgemüsebestand direkt geklärt werden. Da jedoch bei dem TCS die eierlegenden Weibchen eine große Bedeutung haben und somit auch indirekt die Anzahl abgelegter Eier wie bei Eimanschetten, wird die Empfehlung von Ester (1993) und Hommes (1987) für Eimanschetten übernommen. Demnach werden pro Feld etwa zwischen 20 und 25 TCS benötigt. Dies jedoch muss durch weitere Feldversuche untersucht werden. 20 bzw. 25 TCS würden insgesamt zu relativ hohen Kosten führen. Die hohen ursprünglichen TCS-Materialkosten (s. 3.3.4) waren mit

hohen TCS-Rahmenkosten aus Metall, die etwa 67 % der gesamten Materialkosten ausmachten, verbunden. Da keine Unterschiede zwischen den Rahmen aus verschiedenen Materialien (PVC vs. Metall) bei der Eiablage der Kleinen Kohlfliege im Feld bestanden, könnten die Rahmenkosten signifikant durch Verwendung von PVC gesenkt werden. Damit würden die Materialkosten mit drei Webkameras und einen Einplatinencomputer Raspberry Pi in einer witterungsfesten Kunststoffhülle 190 € betragen.

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass das TCS ein optimierungsbedürftiges System und daher zurzeit für die Praxis ungeeignet ist. Da mit dem System Kleine Kohlfliegen im Feld grundsätzlich automatisch erfasst werden konnten und die Fliegen nicht von dem System bei der Eiablage gestört wurden, ist weitere Forschung zur Optimierung des TCS erstrebenswert. Denn die konventionell gängigen Überwachungsmethoden wie das Aufschwämmen der Kleiner Kohlfliegenener Eier sowie die Anwendung von Eimanschetten sind für die Praxis zeitaufwändig und das Simulationsmodell PASO (s. 1.1.2) ist nicht flächenspezifisch. Um repräsentative Werte mit konventionell gängigen Überwachungsmethoden zu Beginn, Dauer und Ausmaß der Eiablage der Kleinen Kohlfliege erhalten zu können, muss das Aufschwämmen von Eiern bzw. die Anwendung von Eimanschetten im Abstand von vier Tagen erfolgen. Denn je nach Temperatur können aus den Eiern bereits nach drei Tagen Larven schlüpfen (Finch und Collier 1985; Varis 1967). Im Feld kommen auch Nützlinge wie z. B. Kurzflügelkäfer (*Aleochara* spp.) vor, die die Eier der Kleinen Kohlfliege nicht nur parasitieren, sondern auch fressen (Holliday et al. 2011). Somit hat das TCS das Potential eine Alternative zu den gängigen konventionellen Überwachungsmethoden darzustellen.

Abschließend wurde unter kontrollierten Bedingungen festgestellt, dass nicht jedes bildgebende Lichtschrankensensor-System zur Erfassung von Schadinsekten geeignet war. Zur Erfassung von Kleinen Kohlweißlingen, Kohleulen, Kohlmotten und Kleinen Kohlfliegen hat sich das Lichtschrankensensor-System OEOS-System (iotec GmbH, Deutschland) im Gegensatz zu Infrascan 5000 (Sitronik GmbH, Österreich) bewährt. Das OEOS-System hatte im Vergleich zu Infrascan 5000 (Sitronik GmbH, Österreich) eine hohe Auflösung und eine hohe Messrate. Um die Insekten erfassen zu können, mussten Sender und Empfänger (s. 1.2.2 und 2.5.3) 50 cm voneinander entfernt sein. Bei den aktuellen Modellen der OEOS-Systeme beträgt dieser räumliche Abstand zwischen 100 und 150 cm. Somit wäre es möglich, die Flugaktivität von Insekten von der fast gesamten Beetbreite zu erfassen. Zudem konnten mit dem System die Flügelschlagfrequenzen von opaken Insektenflügeln erfasst werden. Das bedeutet, der Flügelschlag von Schadschmetterlingen konnte im Gegensatz zur Kleinen Kohlfliege damit erfasst werden. Da das System 2014 entwickelt wurde und erst 2015 für die Versuche zur Verfügung stand, konnten damit keine Versuche im Feld erfolgen. Dennoch deuten die ersten Ergebnisse darauf hin, dass das OEOS-System insbesondere die Schadlepidopteren oberhalb eines Kohlgemüsebestands im Feld erfassen kann und eine mögliche Monitoring-Methode darstellen könnte. Die Differenzierung zwischen den Insektenarten erfolgte im Rahmen der Arbeit anhand der schwarzen Pixelanzahl. Mit dem OEOS wurde neben der Pixelanzahl auch die Flügelschlagfrequenz erfasst. Die Auswertung der Flügelschlagfrequenzen mittels z. B. Fourier-Transformation wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da dies die Systemevaluierung nicht ändern würde. Jedoch kann

die Flügelschlagfrequenz wie bei Rydhmer et al. (2021), Kirkeby et al. (2021), Gebru et al. (2018) gezeigt wurde, bei Insektendifferenzierung durch Anwendung von optischen stationären Sensorsystemen von Bedeutung sein. Dort wurde festgestellt, dass die mit multispektralen polarimetrischen Systemen (Rydhmer et al. 2021; Kirkeby et al. 2021; Gebru et al. 2018) oder mit einem nach dem nicht bildgebenden Lichtschrankenprinzip funktionierenden NIR-Sensor (Rydhmer et al. 2021) erfassten Flügelschlagfrequenzen zur Differenzierung von Insekten verwendet werden können. Sowohl das OEOS-System, das multispektrale polarimetrische System (Kirkeby et al. 2021; Gebru et al. 2018) als auch ein NIR-Sensor (Rydhmer et al. 2021) haben den Vorteil, dass sie durch äußere Lichteinflüsse wie Sonnenstrahlung nicht beeinflusst werden können. Somit können diese optischen Sensorsysteme sowohl tagsüber als auch nachts eingesetzt werden und das Vorkommen von Insekten erfassen.

Aufgrund der vorgelegten Ergebnisse mit bildgebenden Lichtschrankensensor-Systemen und wissenschaftlichen Arbeiten zu nicht bildgebenden Lichtschrankensensorsystemen (Rydhmer et al. 2021; Kirkeby et al. 2021; Gebru et al. 2018) lässt sich schlussfolgern, dass das OEOS-System zur Flugdynamikerfassung von Schadinsekten grundsätzlich geeignet ist. Mit dem OEOS-System war es möglich, Daten zu opaken Insekten unabhängig von Lichtverhältnissen zu erfassen. Bei den erfassten Daten handelte es sich um die Pixelanzahl, Flügelschlagfrequenzen und die Uhrzeit des Vorkommens. Somit wäre die Unterscheidung von den Insektenarten aufgrund der Pixelanzahl, der Flügelschlagfrequenzen sowie der Flugaktivitätszeiten (Wilson et al. 2017; Hawkes 1972) im Feld theoretisch möglich. Das OEOS-System könnte dicht über dem Pflanzenbestand positioniert werden. Somit würden die Insekten erfasst, die an dem Kohlgemüsebestand interessiert sind. Bevor das Sensorsystem im Feld eingesetzt werden kann, bedarf es jedoch weiterer Optimierungen und Untersuchungen. Optimierungsbedürftig sind die Stromversorgung und die Laufzeit des Sensorsystems. In weiteren Untersuchungen muss geklärt werden wie sich Umwelteinflüsse wie Regen und Staub auf die Messungen auswirken. Es muss geklärt werden wie viele OEOS-Systeme in einem Kohlgemüsebestand benötigt werden. Nach Smith und Shepard (2004) wird zur Bestandskontrolle ein W-förmiger Boniturweg empfohlen. Somit werden für weitere Versuche im Feld mindestens fünf OEOS-Systeme benötigt. Inwieweit das OEOS-System Daten der Populationsdynamik von Schadschmetterlingen bzw. anderen Schadinsekten in einem Feldbestand widerspiegeln, bedarf weiterer Untersuchungen. Somit ist das OEOS-System zwar ein vielversprechendes, jedoch optimierungsbedürftiges System zur Erfassung von fliegenden Schadinsekten, welches zurzeit für die Praxis nicht empfohlen werden kann.

Anhand der Ergebnisse der vorgelegten Arbeit wurde nachgewiesen, dass digitale Erfassung von geflügelten Schadinsekten mit stationären Sensorsystemen möglich ist. Zur Erfassung von geflügelten Schadinsekten eigneten sich je nach Insektenart digitale Sexuallockstofffallensysteme, TCS bzw. bildgebendes Lichtschrankensensor-System OEOS. Die Sensoren der digitalen Sexuallockstofffallensystemen sowie des OEOS-Systems wurden im Gegensatz zu TCS nicht durch dynamische Veränderungen (z. B. Pflanzenwachstum, Blattstellung, Insektenpositionierung, Umwelteinflüsse usw.) beeinflusst. Nach

Ruckelshausen (2014) können dynamische Änderungen im Pflanzenbestand im Feld zu erheblichen Störungen bei Sensorapplikationen führen. Von allen untersuchten stationären digitalen Sensorsystemen waren die digitale Sexuallockstofffallen am fortschrittlichsten. Dies liegt zunächst daran, dass es zu dem Einsatz von konventionellen gängigen Sexuallockstofffallen zur Insektenerfassung zahlreiche Erkenntnisse (McCravy 2018; Southwood und Henderson 2007; Muirhead-Thomson 1991) gibt. Diese können bei den digitalen Sexuallockstofffallensystemen übernommen werden. Des Weiteren wird zur Entwicklung und dem Einsatz von digitalen Pheromonfallensystemen im Gegensatz zu TCS und zu OEOS-Systemen bereits seit 1985 geforscht. Das erste digitale Sexualpheromonlockstofffallensystem wurde zur Erfassung des Tabakknospenswurms (*Heliothis virescens*, Fabricius) und der Aschgrauen Höckereule (*Trichoplusia ni*, Hübner) entwickelt (Hendricks 1985). Somit wird seit 36 Jahren zur automatischen Erfassung von Schadinsekten mittels digitaler Sexualpheromonfallensystemen geforscht (Preti et al. 2021a; Preti et al. 2021b). Dieses erworbene Fachwissen kann bei der Entwicklung von digitalen Sexuallockstofffallensystemen verwendet werden. Im Vergleich dazu wurde der erste TCS-Prototyp im Jahr 2012 und der erste OEOS-Systemprototyp im Jahr 2014 erstellt.

Anhand der digitalen Sexuallockstofffallensysteme konnten bestimmte Schadinsekten gezielt erfasst werden. Von den drei untersuchten digitalen Sexualpheromonfallensystemen hat sich insbesondere TrapView zur Erfassung von Kohlmotten bewährt. Da die Kohlmotte als erster Schadschmetterling in einer Anbausaison vorkommt und die Anzahl der Kohlmotten im Fallensystem mit der Larvenanzahl im Bestand korrelierten, wird das optoelektronische Fallensystem für die Praxis empfohlen. TCS zur Erfassung der Kleinen Kohlflye und das bildgebende Lichtschrankensensor-System OEOS zur Erfassung von Schadschmetterlingen und Kleiner Kohlflye werden in den untersuchten Ausführungen aufgrund der aufgeführten, notwendigen Verbesserungen für die Praxis als ungeeignet bewertet. Jedoch ist aufgrund der hier beschriebenen erzielten Ergebnisse die Forschung und die damit verbundene Optimierung des TCS sowie des OEOS-Systems erstrebenswert. Denn die Kleine Kohlflye stellt einen wichtigen Schädling im Kohlgemüseanbau dar (El Titi 1977) und konventionelle Überwachungsmethoden zur Ermittlung der Populationsdichte werden nur selten in der Praxis angewandt. Somit sind digitale automatisierte Methoden zur Erfassung des Schädling notwendig. Für die weitere Forschung im Zusammenhang mit dem OEOS-System spricht, dass damit unterschiedliche Insekten bildgebend erfasst werden konnten. Das war sonst mit keinem weiteren untersuchten Sensorsystem möglich.

5. Fazit und Schlussfolgerungen für die Praxis

In der vorliegenden Arbeit wurde die praktische Eignung von 12 optoelektronischen Sensorsystemen zur Erfassung von oberirdisch vorkommenden Schadinsekten bzw. durch Insekten verursachte oberirdische Gewebeschäden mit den Sensorsystemen und gängigen konventionellen Überwachungsmethoden vergleichend bewertet. Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen die potentielle Wichtigkeit der Überwachungsmethoden für den integrierten Pflanzenschutz und somit auch für eine nachhaltige Lebensmittelproduktion. In dem untersuchten Versuchszeitraum der Dissertation waren die am häufigsten vorkommenden Schadinsekten im Kohlgemüse: Kohlmotte, Kleiner Kohlweißling, Kohleule, Großer Kohlweißling, Kleine Kohlfliege, Kohldrehherzgallmücke, Mehliges Kohlblattlaus sowie Weiße Fliege und Kohlerdföhe. Die Populations- sowie Flugdynamik der Schadinsektenarten variierte je nach Jahr und Ort. Da sich die Insektengrößen je nach Art und Entwicklungsstadium unterschieden sowie auch die durch diese verursachten Schadsymptome, gab es nicht die eine Überwachungsmethode, um alle Schadinsektenarten auf einem Feld schätzen zu können. Zu den wichtigsten gängigen konventionellen Überwachungsmethoden im Kohlgemüse zählen die Bestandskontrolle, Sexualpheromonfallen und die Erfassung von Eiern der Kleinen Kohlfliege. Alle verwendeten gängigen konventionellen Überwachungsmethoden zur Erfassung von Schadinsekten waren mit Kosten- und vor allem Zeitaufwand verbunden. Des Weiteren mussten die Bonituren auf dem Feld ausschließlich durch eingearbeitetes Personal erfolgen, um repräsentative Werte zum aktuellen Schädlingsbefall im Feld erhalten zu können. Somit wurde die Notwendigkeit der Digitalisierung und Automatisierung von gängigen konventionellen Überwachungsmethoden veranschaulicht.

In den durchgeführten Experimenten wurden optoelektronische Sensorsysteme eingesetzt, um Überwachungsmethoden zu digitalisieren und - falls möglich - durch Erfassung, Erkennung und Übermittlung von Daten zu automatisieren. Die präsentierten Ergebnisse tragen dazu bei, den Einsatz der optoelektronischen Sensorsysteme zur digitalen Erfassung von bestimmten oberirdisch vorkommenden Schadinsekten bzw. bestimmten oberirdisch vorkommenden Pflanzenschäden besser zu verstehen. Von den 12 untersuchten optoelektronischen Sensorsystemen eigneten sich grundsätzlich acht zur digitalen Detektion der oberirdisch vorkommenden Schadinsekten bzw. zur digitalen Erfassung der oberirdisch vorkommenden Insektenschäden. Hierbei handelte es sich um die CFBA (Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse), Laserschnittkamera nach dem Prinzip der Triangulation (Gocator 2350), TrapView, Z-Trap-System, TCS (Triangel-Camera-System), OEOS-System (Opto Elektronischer Objekt Scanner), Farb- bzw. Graubildkamera. Diese optoelektronischen Sensorsysteme nehmen die Rückstreuung bzw. spektrale Signaturen der elektromagnetischen Strahlung auf und sind sensibel für den Spektralbereich von 380 nm bis 1000 nm. Somit wurden entweder spektrale Änderungen oder geometrische Veränderungen des Pflanzengewebes bzw. der Schadinsekten erfasst. Dementgegen waren die Bolometerkamera, die 3D TOF-Kamera nach dem Pulslaufzeitverfahrensprinzip (O3D 201PMD 3D Time-Of-Flight (TOF)-Kamera), das digitale Trichterfallensystem der Hochschule Osnabrück sowie das bildgebende Lichtschrankensensorsystem Infrascan 5000

(Sitronik GmbH, Österreich) aufgrund der Systemeigenschaften ungeeignet zur Digitalisierung der Überwachungsmethoden. Die Eignung der aufgelisteten acht optoelektronischen Sensorsysteme unterschied sich je nach Erfassungsmethode.

Die Schädlingspopulation kann anhand der durch diese verursachten Pflanzenschäden geschätzt werden. Daher wurde in der vorgelegten Arbeit untersucht, inwieweit diese Methode digitalisiert werden kann. Aufgrund der Ergebnisse mit Farbkameras, einer Monochrommatrixkamera in Kombination mit einer rot emittierenden Fremdlichtquelle (625 nm), CFBA bzw. Laserschnittkamera sowie der anschließenden Auswertung der erfassten spektralen 2D-Signaturen lässt sich schlussfolgern, dass die spektralen 2D-Signaturen zur automatischen Erfassung von Pflanzenschäden nur begrenzt verwendet werden können.

Die Eignung der optoelektronischen Sensorsysteme, um einfache oberirdisch vorkommende Gewebeschäden durch Schadschmetterlingslarven bzw. Mehliges Kohlblattläuse digital erfassen, hing stark von der Insektenart ab. Die durch Schadschmetterlingslarven verursachten Fraßschäden hoben sich im Vergleich zu Saugschäden der Mehliges Kohlblattlaus eindeutiger von Pflanzengewebe ohne Insektenschäden ab. Insbesondere die zweidimensionale spektrale Signatur der Saugschäden der kleinen Kolonien mit bis zu 15 Individuen der Mehliges Kohlblattlaus ähnelte stark der zweidimensionalen spektralen Signatur der befallsfreien Blattadern bzw. Blätter und konnte nicht automatisch erfasst werden. Es konnten lediglich die Pflanzenschäden, die durch große Kolonien mit über 200 Individuen der Mehliges Kohlblattlaus verursacht wurden, an abgetrennten Blättern mit CFBA erfasst werden. Im Gegensatz dazu konnten die Fraßschäden der Schmetterlingslarven mit Farbkameras, einer Monochrommatrixkamera in Kombination mit rot emittierender Fremdlichtquelle (625 nm), CFBA bzw. einem Laserschnittkamera-System nach dem Prinzip der Triangulation erfasst werden.

Die Eignung der optoelektronischen Sensorsysteme die oberirdisch vorkommenden Fraßschäden der Schmetterlingslarven zu erfassen, hing stark von deren Positionierung ab. Beim Einsatz der Farbkameras, einer Monochrommatrixkamera in Kombination mit einer rot emittierenden Fremdlichtquelle (625 nm), CFBA bzw. Laserschnittkamera-System erwies sich die Kamerapositionierung im 90° Winkel zur Pflanze und der Bodenoberfläche am geeignetsten. Seitliche Aufnahmen sowie die Aufnahmen aus der Froschperspektive, d.h. dass sich die Kamera in einer sehr niedrigen vertikalen Position zum Zielobjekt befand, erwiesen sich als ungünstig, da die im Fokus stehenden Kohlgemüsearten wie Weißkohl durch eine gedrungene Wuchsform und relativ große Blattflächen gekennzeichnet waren. Bei seitlicher Positionierung und aus der Froschperspektive wurde ein großer Bereich der Pflanzen durch die optoelektronischen Systeme nicht erfasst. Bei einem Abstand von 30 cm in Relation zum Boden wurde ein Teilbereich der Pflanze und bei 70 cm eine ganze Pflanze erfasst. Somit konnte mit den vier optoelektronischen Sensorsystemen hauptsächlich die zweidimensionale spektrale Signatur der Umblätter erfasst werden, da die Blätter des Herzbereichs senkrecht wuchsen und die Außenblätter durch Umblätter zum großen Teil abgedeckt wurden. Dies führte dazu, dass Herz- und Außenblätter nur zum Teil digital erfasst werden konnten. Die Auswertung der zweidimensionalen spektralen Information von Insektenschäden war zudem gestört durch: veränderte Stellung der Blätter während des

Tages sowie während einer Vegetationsperiode, überlappende Fraßschäden, Differenzierung zwischen alten und neuen Schäden und Bereichen am Stamm, die wie Raupenfraß aussahen.

Demnach reichen die optoelektronischen Systeme, die die zweidimensionalen spektralen Informationen aufnehmen, nicht aus, um oberirdisch vorkommende Pflanzenschäden von Schadschmetterlingslarven bzw. Mehligler Kohlblattlaus digital zu erfassen und anhand dieser Populationsdynamik abzuleiten. Um Pflanzenschäden besser auswerten zu können, kann es Sinn machen, die dreidimensionalen geometrischen Veränderungen des Pflanzengewebes der Laserschnittkamera mit einzubeziehen. Im Versuchszeitraum war die Methodenvoraussetzung zur Parametrisierung der dreidimensionalen Punktwolke der Laserschnittkamera nicht gegeben.

Die Schadinsektenpopulation kann des Weiteren mittels Schadinsekten, die in einem Bestand erfasst werden, geschätzt werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Schadinsekten auf einer Wirtspflanze, in einer Sexualpheromonlockstoff Falle oder in der Luft digital detektiert werden konnten. Grundsätzlich konnten Insekten mit CFBA, TrapView, Z-Trap-System, TCS, OEOS-System, Farb- bzw. Graubildkameras digital erfasst werden. Die Fähigkeit bestimmter optoelektronischer Sensorsysteme Kohlmotten, Kleine Kohlweißlinge, Kohleulen, Große Kohlweißlinge, Kleine Kohlfiegen, Kohldrehherz gallmücken oder Mehligle Kohlblattläuse digital zu erfassen, hingen hauptsächlich von drei Faktoren ab: Insektenkennzeichen, optoelektronische Sensorsystemart und Einsatzumgebung. Die Insektenkennzeichen waren die Insektenart, das Insektenstadium und die damit verbundene Insektengröße sowie das Insektenverhalten. Bei der Einsatzumgebung der Sensorsysteme zur Erfassung von Schadinsekten wurde unterschieden zwischen variablen und konstanten Umgebungen. Die variable Einsatzumgebung der Sensorsysteme zur Erfassung von Schadinsekten war durch dynamische Änderungen wie Pflanzenwachstum bzw. durch Sonnenlicht und die damit verbundene Schattenbildung beeinflusst. Dazu wurden hauptsächlich CFBA, Farb- bzw. Graubildkameras oder TCS zugeordnet. Mit der Ausnahme von TCS wurden diese zur Automatisierung der Bestandskontrolle und somit zur Erfassung ungeflügelter Schadinsekten auf einer Pflanze eingesetzt. Die konstante Einsatzumgebung veränderte sich während der Erfassung von Insekten nicht. Dazu zählten TrapView, Z-Trap bzw. OEOS. Diese und TCS wurden zur Erfassung von geflügelten Schadinsekten eingesetzt.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse zur Automatisierung der Bestandskontrolle, stellte sich zunächst heraus, dass die digitale Erfassung von Schadschmetterlingslarven und großen Kolonien mit über 200 Individuen der Mehliglen Kohlblattlaus auf einer Pflanze mit CFBA möglich ist. Die Schmetterlingslarven konnten zudem digital auf einer Pflanze mit Farb- oder Graubildkamera in Kombination mit rot emittierender Fremdlichtquelle (625 nm) erfasst werden. Jedoch befanden sich höchstens 10 % der Mehliglen Kohlblattläuse und 44 % der Schadschmetterlingslarven auf der Blattoberseite. Da durch optoelektronische Sensorsysteme ausschließlich Insekten auf den kamerazugewandten Blattflächen (Blattoberseite) erfasst werden konnten und die Pflanzenblätter sich zum Teil auch überdeckten, wurden die dafür eingesetzte optoelektronische Sensorsysteme aufgrund der

Erfassungsmethode (Erfassung ungeflügelter Schadinsekten auf einer Pflanze) als ungeeignet bewertet. Damit wurde auch gezeigt, dass die Digitalisierung der Bestandskontrolle, bei der die Pflanzen mit einer bestimmten Anzahl an Schadinsekten erfasst werden, mit optoelektronischen Sensorsysteme nicht empfehlenswert ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit haben sich zur digitalen Erfassung von Kohlmotten, Kleinen Kohlweißlingen, Kohleulen bzw. Kleinen Kohlfliegen TrapView, Z-Trap-System, TCS bzw. OEOS-System bewährt. Mit TrapView, Z-Trap-System bzw. TCS war es möglich die Schadinsekten digital zu erfassen.

TrapView und Z-Trap-System sind digitale Sexualpheromonlockstofffallensysteme, die Schadinsekten auf unterschiedliche Art und Weise erfassen. TrapView ist ein bildbasiertes Sensorsystem und Z-Trap-System basierte auf der bioelektrischen Impedanz-Analyse. Beim Vergleich der bildbasierten digitalen Pheromonfallensystemen mit digitalen Pheromonfallensystemen mit einem Biosensor wurde festgestellt, dass die Handhabung und die Möglichkeit der Nachkorrekturen bei den bildbasierten digitalen Pheromonfallensystemen einfacher war. Anhand der Ergebnisse mit digitalen und konventionellen Sexualpheromonfallen im Feld und unter kontrollierten Bedingungen wurde zunächst festgestellt, dass die Fängigkeit der Lockstofffallen stark von Fallenform und Fallenpositionierung abhing. Diese variierten je nach Schadinsektenart und mussten bei der Automatisierung eines Sensorsystems berücksichtigt werden. Je größer ein Insekt und je selektiver ein Lockstoff war, desto mehr Zielinsekten befanden sich im System und desto besser funktionierte die automatische Schadinsektenerfassung. Die digitale Erfassung der Kohldrehherzgallmücke bzw. der Kohleule mittels digitalen Pheromonlockstofffallen erwies sich aufgrund der geringen Kameraauflösung bzw. des Balzverhaltens als schwierig. Anhand der Versuche unter kontrollierten Bedingungen wurde nachgewiesen, dass Kohleulen sich auf der Dispenserhalterung oder dem Fallendach aufhalten können, ohne in die Falle hineinzugehen. Die Sexualpheromondispenser für Kohldrehherzgallmücken waren selektiv, jedoch waren die Schadinsekten zu klein und die Auflösung von TrapView-Kameras nicht ausreichend, um die Kohldrehherzgallmücke mit TrapView digital zu erfassen. Die Sexualpheromondispenser für Kohlmotten waren im Vergleich zu Kohleulen sehr selektiv und die Insekten waren auf den übermittelten Bildern des TrapView-Systems gut erkennbar. Die Auswertung der Kohlmottenfänge erfolgte durch bildbasierte digitale Pheromonfallensysteme automatisch und es sind aktuell zahlreiche bildbasierte digitale Pheromonfallensysteme für die Praxis verfügbar. Desweiteren korrelierte die Anzahl an Kohlmotten in den Lockstofffallen mit der Larvenanzahl im Feld. Somit sind die bildbasierten digitalen Pheromonfallensysteme aufgrund der Ergebnisse für die Praxis zur automatischen Erfassung der Flugdynamik der Kohlmotten empfehlenswert.

Die Kohleule konnte mit OEOS unter kontrollierten Bedingungen erfasst werden. Zudem war es möglich, mit dem Sensorsystem die Kohlmotte, den Kleinen Kohlweißling und die Kleine Kohlfliege zu erfassen. Das OEOS-System war das einzige System, welches in der Lage war, vier unterschiedliche Insektenarten unter kontrollierten Bedingungen zu erfassen. Die Anzahl der digital erfassten schwarzen Pixel unterschied sich je nach Insektenart. Somit konnte anhand der vorliegenden Ergebnisse das Potential von Systemen, welche reflektierte Strahlung von opaken, fliegenden Schadinsekten erfassen, nachgewiesen werden.

Abschließend konnte belegt werden, dass die Erfassung der Kleinen Kohlflye digitalisiert werden kann. Durch TCS konnte die Kleine Kohlflye bei der Eiablage automatisch erfasst werden. Es konnte nicht - wie bei Eimanschetten - die Anzahl der abgelegten Eier, sondern die Anzahl der Fliegen, die Eier abgelegt haben, mit TCS abgeleitet werden. Das Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye wurde durch die verwendete TCS-Rahmenfarben- und Materialvariationen im Feld nicht gestört. Da die meisten Eier der Kleinen Kohlflyen im Feld im Zeitraum zwischen 12 und 20 Uhr abgelegt wurden, könnte hypothetisch die Einsatzzeit des TCS begrenzt werden. Die automatische Erfassung, Kamerasteuerung, Stromversorgung sowie die Datenübermittlung des TCS sind optimierungsbedürftig. In Anbetracht der kurzen Entwicklungszeit für das TCS und der vorliegenden Versuche, die Entwicklungsmöglichkeiten der TCS zeigten, ist die Eignung des Systems zur automatischen Erfassung der Kleinen Kohlflye gegeben.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass es - genau wie bei den gängigen konventionellen Überwachungsmethoden - nicht das eine optoelektronische Sensorsystem gibt, welches alle Schadinsekten auf dem Feld erfassen kann. Um Schadinsekten auf dem Feld erfassen zu können, ist eine Kombination an optoelektronischen Sensorsystemen notwendig. Weiterhin können die durch Insekten verursachten oberirdischen Schäden durch optoelektronische Sensorsysteme bedingt digital erfasst werden. Im Gegensatz dazu ist der Einsatz von optoelektronischen Sensorsystemen zur digitalen Erfassung von Schadschmetterlingslarven und Mehligen Kohlblattläusen auf einer Pflanze aufgrund ihrer Verteilung nicht empfehlenswert. Zur Erfassung von fliegenden Schadinsekten waren je nach Insektenart TrapView, OEOS-System und TCS empfehlenswert. Grundsätzlich war der Einsatz von digitalen Sexualpheromonlockstofffallensystemen einfacher im Vergleich zu anderen Erfassungsmethoden. Jedoch sind nicht für alle Schadinsekten synthetische Lockstoffe verfügbar. Das bildbasierte digitale Sexualpheromonlockstofffallensystem TrapView war zur automatischen Erfassung der Flugdynamik der Kohlmotte geeignet. Die digitale Erfassung von fliegenden Schadinsekten wie der Kohlmotte, der Kohleule, dem Kleinen Kohlweißling und der Kleinen Kohlflye war unter kontrollierten Bedingungen mit dem OEOS-System möglich, ein System, welches reflektierte Strahlung digital erfasste. Anhand von TCS war es möglich die Kleinen Kohlflyen automatisch zu erfassen. Aufgrund der Ergebnisse und der Tatsache, dass OEOS sowie TCS im Vergleich zu TrapView in der Handhabung, Datenauswertung sowie Datenübermittlung optimierungsbedürftig waren, können für die Praxis zurzeit ausschließlich bildbasierte digitale Sexualpheromonlockstofffallensysteme (wie z. B. TrapView) zur Erfassung von Kohlmotten empfohlen werden.

6. Literaturverzeichnis

- Adam, W.; Busch, M.; Nickolay, B. (1997): Sensoren für die Produktionstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Allen, J.; Fraser, H.; Halett, R. (2008): The Swede Midge - A Pest of Crucifer Crops. Factsheet. In: *Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs Ontario (08-007)*, S. 1–5.
- Andermatt Biocontrol, PheroNorm (2013): Gebrauchsanleitung. Hg. v. PheroNorm Andermatt Biocontrol.
- Aust, H.-J.; Bochow, H.; Buchenauer, H.; Klingauf, F.; Niemann, P.; Petzold, R.; Poehling, H.-M.; Scheinpflug, H.; Schönbeck, F. (1993): Glossar phytomedizinischer Begriffe. 2., erg. Aufl. Stuttgart: Ulmer (Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, 3).
- Baker, P. B.; Shelton, A. M.; Andaloro, J. T. (1982): Monitoring of Diamondback Moth (Lepidoptera: Yponomeutidae) in Cabbage With Pheromones. In: *Journal of Economic Entomology* 75 (6), S. 1025–1028. DOI: 10.1093/jee/75.6.1025.
- Balmelli, A.; Frank, A.; Sauer, C.; Vogler, U. (2012): Kohlräupen. Hg. v. Extension Gemüsebau Forschungsanstalt Agroscope Changins-Wädenswil ACW. Agroscoop (Merkblatt).
- Bartels, J. (2017): Anwendungen von Time-of-Flight-Kameras in Robotik, Logistik und Medizin. Basler AG.
- Barton, K. (2020): MuMIn: Multi-Model Inference. (R package version 1.43.17.). Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>.
- Bates, D.; Mächler, M. (2021): Matrix: Sparse and Dense Matrix Classes and Methods. Hg. v. <https://CRAN.R-project.org/package=Matrix> (R package version 1.3-3.).
- Bates, D.; Mächler, M.; Bolker, B.; Walker, S. (2015): Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. In: *J. Stat. Soft.* 67 (1). DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- Bauch, C.; Rath, T. (2005): Prototype of a Vision Based System for Measurements of White Fly Infestation. In: *Acta Horticulturae* (691), S. 773–780. DOI: 10.17660/ActaHortic.2005.691.95.
- Baur, R.; Rauscher, S.; Eder, R.; Samietz, J. (2005): Kohldrehherz gallmücke: Überwachung des Fluges mit Pheromonfallen. In: *Die Gemüsebau/Le Maraîcher* (2), S. 16–17.
- Bauriegel, E.; Giebel, A.; Herppich W. B. (2010): Rapid Fusarium head blight detection on winter wheat ears using chlorophyll fluorescence imaging. In: *Journal of Applied Botany and Food Quality* 83 (2), S. 196–203.
- Bauriegel, E. Herppich, W. (2014): Hyperspectral and Chlorophyll Fluorescence Imaging for Early Detection of Plant Diseases, with Special Reference to Fusarium spec. Infections on Wheat. In: *Agriculture* 4 (1), S. 32–57. DOI: 10.3390/agriculture4010032.
- Bechar, I.; Moisan S. (2010): On-line counting of pests in a greenhouse using computer vision. In: *Visual Observation and Analysis of Animal and Insect Behavior (VAIB)* 1, S. 1–4.
- Beck, N. G.; Cameron, P. J. (1990): Developing an action threshold for lepidopterous pests of cabbage. In: *Proceedings of the New Zealand Weed and Pest Control Conference* 43, S. 26–30. DOI: 10.30843/nzpp.1990.43.10932.
- Beerwinkle, K. R. (2001): Automatic Capture-Detection, Time-Logging Instrumentation System for Boll Weevil Pheromone Traps. In: *Applied engineering in agriculture* 17 (6), S. 893–898.

- Behmann, J. (2016): Integration von hyperspektralen Merkmalen und 3D-Geometrie für die Klassifikation von Pflanzenstressprozessen. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Benada, J.; Sedivý, J.; Spacek, J.; Mráz, F.; Kodys, F.; Kinský, J.; Vit, V. (1966): Atlas der Krankheiten und Schädlinge der Ölpflanzen. S.I.: Prag Landwirtschaftlicher Staatsverlag.
- Berger, S.; Papadopoulos, M.; Schreiber, U.; Kaiser, W.; Roitsch, T. (2004): Complex regulation of gene expression, photosynthesis and sugar levels by pathogen infection in tomato. In: *Physiologia Plantarum* 122 (4), S. 419–428. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2004.00433.x.
- Birch, M. C.; Haynes, K. F. (1982): Insect Pheromones. London: Arnold (The Institute of Biology's Studies in biology, 147).
- Birch, M. C.; Lucas, D.; White, P. R. (1989): The courtship behavior of the cabbage moth, *Mamestra brassicae* (Lepidoptera: Noctuidae), and the role of male hair-pencils. In: *Journal of Insect Behavior* 2 (2), S. 227–239.
- Bjerge, K.; Nielsen, J. B.; Sepstrup, M. V.; Helsing-Nielsen, F.; Høye, T. T. (2021): An Automated Light Trap to Monitor Moths (Lepidoptera) Using Computer Vision-Based Tracking and Deep Learning. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 21 (2). DOI: 10.3390/s21020343.
- Björkman, O.; Demmig, B. (1987): Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins. In: *Planta* 170 (4), S. 489–504. DOI: 10.1007/BF00402983.
- Blakesley, R. E.; Mazumdar, S.; Dew, M. A.; Houck, P. R.; Tang, G.; Reynolds, C. F.; Butters, M. A. (2009): Comparisons of methods for multiple hypothesis testing in neuropsychological research. In: *Neuropsychology* 23 (2), S. 255–264. DOI: 10.1037/a0012850.
- Bligaard, J.; Meadow, R.; Nielsen, O.; Percy-Smith, A. (1999): Evaluation of felt traps to estimate egg numbers of cabbage root fly, *Delia radicum*, and turnip root fly, *Delia floralis* in commercial crops. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 90 (2), S. 141–148. DOI: 10.1046/j.1570-7458.1999.00432.x.
- BMEL (2008): Leitsätze für Gemüseerzeugnisse. Neufassung vom 08. 01. 2008 (Beilage zum BAnz. Nr. 89 vom 18. 06. 2008, GMBI Nr. 23-25 S. 451 ff vom 19. 06. 2008). Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.
- BMEL (Hg.) (2017): Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln.
- BMEL (2020): Glossar. zur Erklärung wesentlicher Begriffe der Digitalisierung (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft).
- Böckmann, E.; Richter, E. (2016): Integrierte Bekämpfung der Kohlmottenschildlaus an Gemüsekohlarten. Integrated control of *Aleyrodes proletella* in different cabbage varieties. FKZ: 12NA020. Online verfügbar unter www.orgprints.org/32014/.
- Bohnenkamp, D.; Behmann, J.; Paulus, S.; Steiner, U.; Mahlein, A.-K. (2021): A Hyperspectral Library of Foliar Diseases of Wheat. In: *Phytopathology* 111 (9), S. 1583–1593. DOI: 10.1094/PHYTO-09-19-0335-R.
- Bolhar-Nordenkamp, H. R.; Long, S. P.; Baker, N. R.; Oquist, G.; Schreiber, U.; Lechner, E. G. (1989): Chlorophyll Fluorescence as a Probe of the Photosynthetic Competence of Leaves in the Field: A Review of Current Instrumentation. In: *Functional Ecology* 3 (4), S. 497. DOI: 10.2307/2389624.
- Bolker, B.; Skaug, H.; Magnusson, A.; Nielsen, A. (2012): Getting started with the glmmADMB package.

- Born, F. (2021): Outcome-Driven Innovation in der Landwirtschaft am Beispiel der Entwicklung einer digitalen Gelbschale. Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Weihenstephan-Triesdorf.
- Brabandt, H.; Bauriegel, E.; Gärber, U.; Herppich, W. B. (2014): ΦPSII and NPQ to evaluate *Bremia lactucae*-infection in susceptible and resistant lettuce cultivars. In: *Scientia Horticulturae* 180, S. 123–129. DOI: 10.1016/j.scienta.2014.10.012.
- Brambila, J.; Jackson, L.; Meagher, R. L.; Gaskill, D. R.; Derksen, A. (2014): Plastic Bucket Trap Protocol. Pest detection cooperative agricultural pest survey.
- Breitmeier, U.; Daum, W.; Häusler, G.; Heinrich, G.; Küchel, M.; Mollath, G.; Nadeborn, W.; Schlemmer, H.; Schulze Willbrenning, B.; Schwarte, R.; Seib, M.; Sowa, P.; Steinbichler (1995): Handbuch OF1. Verfahren für die optische Formerfassung. Ausg. 1995. Berlin: DGZfP.
- Brynjolfsson, E.; McAfee, A. (2014): The second machine age. Wie die nächste industrielle Revolution unserer aller Leben verändern wird. Kulmbach: Plassen.
- Buhl, C.; Schütte, F. (1971): Prognose wichtiger Pflanzenschädlinge in der Landwirtschaft. Berlin, Hamburg: Parey.
- Burger, W.; Burge, M. J. (2006): Digitale Bildverarbeitung. Eine Einführung mit Java und ImageJ. 2., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (X.media.press).
- Burkness, E. C.; Hutchison, W. D. (2008): Implementing Reduced-Risk Integrated Pest Management in Fresh-Market Cabbage: Improved Net Returns via Scouting and Timing of Effective Control. In: *Journal of Economic Entomology* 101 (2), S. 461–471. DOI: 10.1603/0022-0493(2008)101[461:IRIPMI]2.0.CO;2.
- Busemeyer, L.; Mentrup, D.; Möller, K.; Wunder, E.; Alheit, K.; Hahn, V. et al. (2013): BreedVision - a multi-sensor platform for non-destructive field-based phenotyping in plant breeding. In: *Sensors* 13 (3), S. 2830–2847. DOI: 10.3390/s130302830.
- Capinera, J. L. (2000): Imported Cabbageworm, *Pieris rapae* (Linnaeus). (Insecta: Lepidoptera: Pieridae). Hg. v. Department of Entomology and Nematology. University of Florida/ IFAS (EENY-126).
- Cardim Ferreira Lima, M.; Damascena de Almeida Leandro, M. E.; Valero, C.; Pereira Coronel, L. C.; Gonçalves Bazzo, C. O. (2020): Automatic Detection and Monitoring of Insect Pests—A Review. In: *Agriculture* 10 (5), S. 161. DOI: 10.3390/agriculture10050161.
- Carter, D. J.; Hargreaves, C. (1987): Raupen und Schmetterlinge Europas und ihre Futterpflanzen. Unter Mitarbeit von Brian Hargreaves. Hamburg, Berlin: Parey.
- Cartwright, B.; Edelson, J. V.; Chambers, C. (1987): Composite Action Thresholds for the Control of Lepidopterous Pests on Fresh-market Cabbage in the Lower Rio Grande Valley of Texas. In: *Journal of Economic Entomology* 80 (1), S. 175–181. DOI: 10.1093/jee/80.1.175.
- Chalfant, R. B.; Denton, W. H.; Schuster, D. J.; Workman, R. B. (1979): Management of Cabbage Caterpillars in Florida and Georgia by Using Visual Damage Thresholds1. In: *Journal of Economic Entomology* 72 (3), S. 411–413. DOI: 10.1093/jee/72.3.411.
- Chinery, M. (2012): Pareys Buch der Insekten. Über 2000 Insekten Europas. Unter Mitarbeit von Denys Ovenden. 2. Aufl., komplett überarb. und aktualisiert. Stuttgart: Kosmos (Kosmos-Naturführer). Online verfügbar unter <http://www.kosmos.de>.
- Collins, R. (2016): The biology and ecology of *Aleyrodes proletella*, the Cabbage Whitefly; a pest of *Brassica* crops. Dissertation. University of Warwick, Warwick. School of Life Sciences.

- Crüger, G.; Backhaus, G. F.; Hommes, M.; Smolka, S.; Vetten H.-J. (2002): Pflanzenschutz im Gemüsebau. 4., völlig neu bearb. und erw. Aufl. / unter Mitarb. von: Georg Friedrich Backhaus. Stuttgart: Ulmer.
- Norm DIN 18716:2017-06: DIN 18716:2017-06.
- Norm DIN EN 60825-1:2015-07, 2015: DIN EN 60825-1:2015-07.
- Dölger, D.; Gerwers, D. (2014): Sensorik im Pflanzenbau – Erfahrungsberichte aus der Praxis. In: *Journal für Kulturpflanzen* 2 (66), S. 57–62. DOI: 10.5073/JfK.2014.02.04.
- Dreves, A. J. (2007): Phenology and monitoring of the cabbage maggot, *Delia radicum* (L.), in Brassica root crops. Dissertation. Oregon State University, Oregon.
- Dubnik, H. (1991): Blattläuse. Artenbestimmung - Biologie - Bekämpfung. Gelsenkirchen-Buer: Mann.
- Durchführungsverordnung (EU) Nr. 543/2011 (07.06.2011): DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) Nr. 543/2011 DER KOMMISSION mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung) Nr. 1234/2007 des Rates für die Sektoren Obst und Gemüse und Verarbeitungserzeugnisse aus Obst und Gemüse.
- Eder, R.; Samietz, J.; Baur, R. (2005): Bestimmung von Männchen der Kohldrehherz gallmücke (*Contarinia nasturtii*) auf Leimtafeln aus Pheromon. agroscope, FAW Wädenswil.
- El Titi, A. (1977): Die Ermittlung der wirtschaftlichen Schadensschwelle für die Kleine Kohlflye (*Erioischia brassicae* Bouché) im Blumenkohlanbau. Determination of the economic threshold of the cabbage root fly (*Erioischia brassicae* Bouché) in early cauliflower. In: *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 84 (2), S. 65–83.
- ENDURE International Conference.
- Ester, E. (1993): The efficacy of the cabbage root fly egg trap as a testing monitoring system for supervised pest control in the Netherlands. In: *Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen, Rijksuniversiteit Gent* 58 (1), S. 17–20.
- F. Poulsen Engineering Aps (2013): Manual for mechanical weeding robot. Robovator. Hg. v. F. Poulsen Engineering Aps.
- Feldkämper, N.; Glaser, S. (2014): Bildgebendes Sensorsystem zur Insektendetektion. Hausarbeit. Hochschule Osnabrück, Osnabrück.
- Feller, C.; Bleiholder, H.; Buhr, L.; Hack, H.; Heß, M.; Klose, R. et al. (1995): Phanologische Entwicklungsstadien von Gemüsepflanzen. I. Zwiebel-, Wurzel-, Knollen- und Blattgemüse. In: *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 8 (47), S. 193–206.
- Finch, S.; Coaker, T. H. (1969): A method for the continuous rearing of the cabbage root fly *Erioischia brassicae* (Bch.) and some observations on its biology. In: *Bulletin of Entomological Research* 58 (3), S. 619–627. DOI: 10.1017/S0007485300057345.
- Finch, S.; Collier, R. H. (1985): Laboratory studies on aestivation in the cabbage root fly (*Delia radicum*). In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 38 (2), S. 137–143. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1985.tb03510.x.
- Fitzgerald, G.; Rodriguez, D.; O’Leary, G. (2010): Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). In: *Field Crops Research* 116 (3), S. 318–324. DOI: 10.1016/j.fcr.2010.01.010.
- Forster, R. (1997): Überregionale Studien zur befallsbezogenen Bekämpfung von Lepidopteren in Kopfkulturen. Dissertation.

- Forster, R.; Hildenhagen, R.; Hommes, M.; Schorn-Kasten, K. (1992): Integrierter Pflanzenschutz im Gemüsebau. Praktizierung von Bekämpfungsschwellen für Kohlschädlinge. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverl. (Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten : Reihe A, Angewandte Wissenschaft, H. 411).
- Fox, J.; Weisberg, S. (2019): An R companion to applied regression. Third edition. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington, DC, Melbourne: SAGE.
- Francis, R. L.; Smith, J. P.; Shepard, B. M. (2005): Integrated pest management for cabbage and collard. A grower's guide. Hg. v. The Clemson University.
- Franzen, L. D.; Gutsche, A. R.; Heng-Moss, T. M.; Higley, L. G.; Sarath, G.; Burd, J. D. (2007): Physiological and Biochemical Responses of Resistant and Susceptible Wheat to Injury by Russian Wheat Aphid. In: *Journal of Economic Entomology* 100 (5), S. 1692–1703. DOI: 10.1603/0022-0493(2007)100[1692:PABROR]2.0.CO;2.
- Freier, B.; Pallutt, B.; Hommes, M. (1994): Zur Anwendung von flexiblen Schwellenwerten im integrierten Pflanzenschutz. In: *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 46 (8), S. 170–175.
- Freier, B.; Sellmann, J.; Strassemeyer, J.; Schwarz, J.; Klocke, B.; Dachbrodt-Saaydeh et al. (2015): Netz Vergleichsbetriebe Pflanzenschutz - Jahresbericht 2014 - Analyse der Ergebnisse der Jahre 2007 bis 2014. Julius Kühn-Institut (Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, 182).
- Freude, H.; Harde, K., W.; Lohse, G. A.; Klausnitzer, B. (1966): Die Käfer Mitteleuropas. Cerambycidae. Chrysomelidae. Krefeld, Jena u.a., Jena u.a., Heidelberg u.a.: Goecke & Evers; G. Fischer; Urban und Fischer; Spektrum Akad. Verl. (9).
- Freuler, J.; Fischer, S. (1982): Description d'un piège à oeufs pour la mouche du chou, *Delia brassicae* Wiedemann. In: *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft/ Bulletin de la Société entomologique suisse* 55 (1/2), S. 77–85.
- Freuler, J.; Fischer, S.; Hurni, B.; Städler, E. (1991a): Kontrollmethoden und Anwendung von Schadschwellen für die Schädlinge im Freilandgemüsebau. In: *Landwirtschaft Schweiz* 4 (7), S. 341–364.
- Freuler, J.; Fischer, S.; Hurni, B.; Städler, E. (1991b): Kontrollmethoden und Anwendung von Schadschwellen für die Schädlinge im Freilandgemüseanbau. In: *Landwirtschaft Schweiz* 4 (7), S. 341–364.
- Fukatsu, T.; Watanabe, T.; Hu, H.; Yoichi, H.; Hirafuji, M. (2012): Field monitoring support system for the occurrence of *Leptocorisa chinensis* Dallas (Hemiptera: Alydidae) using synthetic attractants, Field Servers, and image analysis. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 80, S. 8–16. DOI: 10.1016/j.compag.2011.10.005.
- Gaedike, R. (1980): Beiträge zur Insektenfauna der DDR: Lepidoptera - Ryrastinae. In: *Beiträge zur Entomologie* (30), S. 41–120.
- Ganzelmeier, H. (2014): Sensorik zur Pflanzenschutzmittelreduzierung im Obstbau. In: *Journal für Kulturpflanzen* 2 (66), S. 63–72. DOI: 10.5073/JfK.2014.02.05.
- Gaus, C.-C.; Minßen, T.-F.; Urso, L.-M.; Witte, T. de; Wegener, J. (2017): Mit autonomen Landmaschinen zu neuen Pflanzenbausystemen. Schlussbericht. Hg. v. BÖLN.
- Gebbers, R.; Adamchuk, V. I. (2010): Precision agriculture and food security. In: *Science (New York, N. Y.)* 327 (5967), S. 828–831. DOI: 10.1126/science.1183899.
- Geburu, A.; Jansson, S.; Ignell, R.; Kirkeby, C.; Prangma, J. C.; Brydegaard, M. (2018): Multiband modulation spectroscopy for the determination of sex and species of mosquitoes in flight. In: *Journal of biophotonics* 11 (8), e201800014. DOI: 10.1002/jbio.201800014.

- Getzin, L. W. (1978): Effect of Cabbage Maggot Damage on Yield and Quality of Hybrid Cabbage Seed. In: *Journal of Economic Entomology* 71 (3), S. 528–530. DOI: 10.1093/jee/71.3.528.
- Gill, H. K.; Garg, H.; Gillett-Kaufman, J. L. (2013): Cabbage aphid *Brevicoryne brassicae* Linnaeus (Insecta: Hemiptera: Aphididae). In: *Entomology and Nematology Department, UF/IFAS Extension University of Florida* (EENY577), S. 1–5.
- Goebel, E.; Calatayud, A. (2012): Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: A review. In: *Scientia Horticulturae* 138, S. 24–35. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.02.002.
- Görlich, F.; Marks, E.; Mahlein, A.-K.; König, K.; Lottes, P.; Stachniss, C. (2021): UAV-Based Classification of Cercospora Leaf Spot Using RGB Images. In: *Drones* 5 (2), S. 34. DOI: 10.3390/drones5020034.
- Griegel, A. (1999): Mein gesunder Gemüsegarten. Grosser Krankheits- und Schädlingskalender ; [erkennen, vorbeugen, heilen]. Unter Mitarbeit von Margarete Griegel. Dorsheim: Griegel.
- Griffin, T. W.; Lambert, D. M.; Lowenberg-DeBoer, J.; Peone, J.; Payne, Tim; Daberkow, S. G. (2004): Adoption, profitability, and making better use of precision farming data. Hg. v. Department of Agricultural Economics Purdue University.
- Hallett, R. H.; Sears, M. K. (2013): Pheromone-based action thresholds for control of the swede midge, *Contarinia nasturtii* (Diptera: Cecidomyiidae), and residual insecticide efficacy in cole crops. In: *Journal of Economic Entomology* 106 (1), S. 267–276. DOI: 10.1603/EC12243.
- Hamilton, A. J.; Hepworth, G. (2004): Accounting for Cluster Sampling in Constructing Enumerative Sequential Sampling Plans. In: *Journal of Economic Entomology* 97 (3), S. 1132–1136. DOI: 10.1603/0022-0493(2004)097[1132:AFCSIC]2.0.CO;2.
- Hardman, J. A.; Ellis, P. R. (1978): Host plant factors influencing the susceptibility of cruciferous crops to cabbage root fly attack. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 24 (3), S. 393–397. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1978.tb02799.x.
- Hausmann, A.; Miller, M.; Nippe, B. (Hg.) (2000): Atlas der Raupen europäischer und kleinasiatischer Schmetterlinge. München: Pfeil.
- Hawkes, C. (1972): The diurnal periodicity and cycle of behaviour of the adult cabbage root fly (*Erioischia brassicae*). In: *Ann Applied Biology* 70 (2), S. 109–118. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1972.tb04695.x.
- Hawkes, C. (1974): Dispersal of Adult Cabbage Root Fly (*Erioischia brassicae* (Bouche)) in Relation to a Brassica Crop. In: *The Journal of Applied Ecology* 11 (1), S. 83. DOI: 10.2307/2402006.
- Hecht, E. (2018): Optik. 7. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter (De Gruyter Studium).
- Hellebrand, H. J.; Dammer, K.-H.; Beuche, H.; Herppich, W. B.; Flath, K. (2005): Infrarotbildverfahren im Pflanzenschutz. In: *Agrartechnische Forschung* 11 (3), S. 35–42.
- Hendricks, D. E. (1985): Portable Electronic Detector System Used with Inverted-Cone Sex Pheromone Traps to Determine Periodicity and Moth Captures 1. In: *Environmental Entomology* 14 (3), S. 199–204. DOI: 10.1093/ee/14.3.199.
- Hering, E.; Martin, R. (2017): Optik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Grundlagen und Anwendungen. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446445093>.

- Hering, E.; Schönfelder, G. (Hg.) (2018): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete. Springer Fachmedien Wiesbaden. 2., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.
- Hirafuji, M.; Yoichi, H.; Watanabe, T.; Asai, M.; Haoming, H.; Tanaka, K. et al. (2008): Real-time Insect Monitoring System by Using Field Server. In: *World conference on agricultural information and IT, IAALD AFITA WCCA 2008IT*, S. 277–282.
- Hoffmann, K. (1978): Thermoregulation bei Insekten. In: *Biologie in unserer Zeit* 8 (1), S. 17–26. DOI: 10.1002/biuz.19780080106.
- Hoffmann, N.; Schröder, T.; Schlüter, F.; Meinschmidt, P. (2013): Potential of infrared thermography to detect insect stages and defects in young trees. In: *Journal für Kulturpflanzen* 65 (9), S. 337–346.
- Holguin, G. A.; Lehman, B. L.; Hull, L. A.; Jones, V. P.; Park, J. (2010): Electronic Traps for Automated Monitoring of Insect Populations. In: *IFAC Proceedings Volumes* 43 (26), S. 49–54. DOI: 10.3182/20101206-3-JP-3009.00008.
- Holliday, A. E.; Pak, D. M.; Holliday, N. J. (2011): The Aleochara (Coleoptera: Staphylinidae) attractant in mustard seed meal is not dimethyl disulphide. In: *Proceedings of the Entomological Society of Manitoba* 67, S. 5–10.
- Holpp, M.; Anken, T.; Stehle, T.; Martin, D.; Hatt, M. (2016): Präzisionsunkrautkontrolle in Reihenkulturen. In: *Agroscope Transfer* (130), S. 1–4.
- Hommel, B. (2012): Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Bericht 2008 bis 2011 (Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, 165). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.5073/berjki.2012.165.000>.
- Hommes, M. (1983): Untersuchungen zur Populationsdynamik und integrierten Bekämpfung von Kohlschädlingen. Dissertation. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft in Berlin und Braunschweig.
- Hommes, M. (1987): Nur wenige Insekten müssen bedacht werden. Biologie und Bekämpfung wichtiger Kohlschädlinge. In: *Gemüse* (2).
- Hommes, M.; Müller-Pietralla, W.; Gebelein, D. (1993): Simulationsmodelle für Gemüsefliegen - Entscheidungshilfen für Beratung und Anbau. In: *Bausteine für den integrierten Pflanzenschutz im Gartenbau - Aktuelle Arbeiten aus dem Institut für Pflanzenschutz im Gartenbau* (289), S. 111–122.
- Horler, D. N. H.; Dockray, M.; Barber, J. (1983): The red edge of plant leaf reflectance. In: *International Journal of Remote Sensing* 4 (2), S. 273–288.
- Hothorn, T.; Bretz, F.; Westfall, P. (2008): Simultaneous inference in general parametric models. In: *Biometrical journal. Biometrische Zeitschrift* 50 (3), S. 346–363. DOI: 10.1002/bimj.200810425.
- Hufnagel, J.; Herbst, R.; Jarfe, A.; Werner, A. (Hg.) (2004): Precision Farming. Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: KTBL (KTBL-Schrift, 419).
- Hughes, R. D.; Salter, D. D. (1959): Natural Mortality of *Erioischia brassicae* (Bouche) (Diptera, Anthomyiidae) during the immature stages of the first generation. In: *The Journal of Animal Ecology* 28 (2), S. 231. DOI: 10.2307/2080.
- International Trade Center, Europäische Kommission (ITC) (2019): Der Markt der Europäischen Union für Nachhaltige Produkte. Beschaffungsstrategien und Verbrauchernachfrage aus Sicht des Einzelhandels.

- Jähne, B.; Massen, R.; Nickolay, B.; Scharfenberg, H. (1996): Technische Bildverarbeitung - maschinelles Sehen. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio: Springer.
- Jaouannet, M.; Rodriguez, P. A.; Thorpe, P.; Lenoir, C. J. G.; MacLeod, R.; Escudero-Martinez, C.; Bos, J. I. B. (2014): Plant immunity in plant-aphid interactions. In: *Frontiers in plant science* 5 (663), S. 1–10. DOI: 10.3389/fpls.2014.00663.
- Jenz, M.; Möller, K.; Nieberg, D.; Ruckelshausen, A. (2016): Automatisierte Höhennachführung eines Multisensorsystems zur Feldphänotypisierung. In: *GIL-Jahrestagung*, S. 77–80.
- Jeon, H. Y.; Kim, H. H.; Yang, C. Y.; Jang, H. J.; Mok, I. G.; Yiem, M. S. (2006): Damage and Control Threshold of the Diamondback Moth (*Plutella xylostella* L.) in Chinese Cabbage. In: *Korean Journal of Horticultural Science and Technology* 23 (3), S. 333–336.
- Jiang, J.-A.; Tseng, C.-L.; Lu, F.-M.; Yang, E.-C.; Wu, Z.-S.; Chen, C.-P. et al. (2008): A GSM-based remote wireless automatic monitoring system for field information: A case study for ecological monitoring of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Hendel). In: *Computers and Electronics in Agriculture* 62 (2), S. 243–259. DOI: 10.1016/j.compag.2008.01.005.
- Johansen, N. S. (1996): Prediction of field occurrence of the cabbage moth, *Mamestra brassicae* (Lepidoptera: Noctuidae): Pheromone traps and degree-day model. In: *Norwegian Journal of Agricultural Sciences (Norway)* 10 (4), S. 541–553. Online verfügbar unter <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=NO9700409>.
- Johansen, N. S. (1997a): Influence of temperature on development, fecundity and survival of the cabbage moth *Mamestra brassicae* (L.) (Lep., Noctuidae) in relation to the improvement of forecasting and control methods. In: *Journal of Applied Entomology* 121 (1-5), S. 81–88. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1997.tb01375.x.
- Johansen, N. S. (1997b): Mortality of eggs, larvae and pupae and larval dispersal of the cabbage moth, *Mamestra brassicae*, in white cabbage in south-eastern Norway. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 83 (3), S. 347–360. DOI: 10.1046/j.1570-7458.1997.00190.x.
- Jordan, M. I.; Mitchell, T. M. (2015): Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. In: *Science (New York, N.Y.)* 349 (6245), S. 255–260. DOI: 10.1126/science.aaa8415.
- Jørgensen, R. N.; Sørensen, C. G.; Maagaard, J.; Havn, I.; Jensen, K.; Søgeerd, H. T.; Sørensen, L. B. (2007): HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing. In: *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal* 9, S. 1–13.
- Junker, L.; Rascher, U.; Jaenicke, H.; Müller, O. (2019): Detection of plant stress responses in aphid-infested lettuce using non-invasive detection methods. In: *IOBC-WPRS* 142, S. 8–16.
- Junker-Frohn, L. V.; Siegmann, B.; Quarten, M.; Tholen, T.; Jaenicke, H.; Rascher, U.; Müller, O. (2021): Detektion von Blattlausbefall in Salatpflanzen. Möglichkeiten der Messung spektraler Reflektion. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 1 (99), S. 1–21.
- Kämpfer, C.; Ulber, L.; Wellhausen, C.; Pflanz, M. (2021): Unkrautererkennung und Kartierung zur automatischen Applikationskartenerstellung im Pflanzenschutz. In: *Journal für Kulturpflanzen* 5-6 (73), S. 121–130. DOI: 10.5073/JFK.2021.05-06.04.
- Karn, S.; Frick, T. (2008): Elemente der filmischen Gestaltung. Sächsische Medienakademie.

- Keller, M.; Haberey, P.; Hodel, D.; Collet, L.; Steiner, R.; Bucher, C. et al. (2020): Spot Spraying im Gemüsebau. Deutliche Pflanzenschutzmittelreduktion möglich, aber anspruchsvoll. Hg. v. Agroscoop transfer (Nr. 353/ 2020).
- Kicherer, A. (2015): High-throughput phenotyping of yield parameters for modern grapevine breeding. Julius Kühn-Institut Dissertation, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Quedlinburg, Deutschland.
- Kikkert, J. R.; Hoepting, C. A. (2009): Swede Midge. (also known as the cabbage crowngall fly and cabbage gall midge). Cornell University (Integrated Pest Management).
- Kirk, W. D. J. (1992): Insects on cabbages and oilseed rape. Slough: Richmond (Naturalists' handbooks, 18).
- Kirkeby, C.; Rydhmer, K.; Cook, S. M.; Strand, A.; Torrance, M. T.; Swain, J. L. et al. (2021): Advances in automatic identification of flying insects using optical sensors and machine learning. In: *Scientific reports* 11 (1), S. 1–8. DOI: 10.1038/s41598-021-81005-0.
- Klatt, B.; Kleinhenz, B.; Kuhn, C.; Bauckhage, C.; Neumann, M.; Kersting, K. et al. (2013): SmartDDS-Plant Disease Detection via Smartphone. In: *EFITA-WCCA-CIGR Konferenz "Sustainable Agriculture through ICT innovation", Turin, Italien*.
- Kleger, R. (1998): Sensorik für Praktiker. 1. Aufl. Aarau, Berlin: AZ-Fachverlage; VDE-Verlag.
- Kline, W. L.; Kline, S. T. (2015): Cabbage IPM field guide. In: *Rutgers Agricultural Research & Extension Center, Bridgeton, NJ*. Online verfügbar unter <https://nj-vegetable-crops-online-resources.rutgers.edu/field-guides/>.
- Klockgether, K.; Garming, H.; Dirksmeyer, W. (2016): Entwicklung des Gemüsebaus in Deutschland von 2000 bis 2015. Anbauregionen, Betriebsstrukturen, Gemüsearten und Handel. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen working paper). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/144752>.
- Köhler, W.; Schachtel, G.; Voleske, P. (2002): Biostatistik. Eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch). Online verfügbar unter http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=1473432&custom_att_2=simple_viewer.
- Korner-Nievergelt, F.; Roth, T.; Felten, S. von; Guelat, J.; Almasi, B.; Korner-Nievergelt, P. (2015): Bayesian data analysis in ecology using linear models with R, BUGS, and Stan. Amsterdam, Boston: Academic Press an imprint of Elsevier. Online verfügbar unter <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=975576>.
- Košťál, V. (1991): The effect of colour of the substrate on the landing and oviposition behaviour of the cabbage root fly. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* (59), S. 189–196.
- Košťál, V.; Finch, S. (1996): Preference of the cabbage root fly, *Delia radicum* (L.), for coloured traps: influence of sex and physiological status of the flies, trap background and experimental design. In: *Physiological Entomology* 21 (2), S. 123–130. DOI: 10.1111/j.1365-3032.1996.tb00844.x.
- Kovacheva, I.; Kerksen, S.; Mentrup, D.; Rosemann, T.; Bilgels, K. (2014): Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzenhöhen, Ähren und Grannen. In: *20. Workshop Computerbildanalyse und Sensorik in der Landwirtschaft*, S. 1–12.
- Krug, H.; Liebig, H.-P.; Stützel, H. (Hg.) (2002): Gemüseproduktion. Ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis. Unter Mitarbeit von Jürgen Bender. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.

- Kubinger, W.; Peschak, B.; Wöber, W.; Sulz, C. (2017): Bildgebende Sensorsysteme für robotische Systeme in der Agrar- und Landtechnik. In: *Elektrotech. Inftech.* 134 (6), S. 316–322. DOI: 10.1007/s00502-017-0513-3.
- Kühlke, D. (2011): *Optik. Grundlagen und Anwendungen; mit Abbildungen, Tabellen, Beispielen und Aufgaben mit Lösungen.* 3., überarb. und erw. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch.
- Kuśnierczyk, A.; Winge, P.; Jørstad, T. S.; Troczyńska, J.; Rossiter, J. T.; Bones, A. M. (2008): Towards global understanding of plant defence against aphids - timing and dynamics of early Arabidopsis defence responses to cabbage aphid (*Brevicoryne brassicae*) attack. In: *Plant, Cell & Environment* 31 (8), S. 1097–1115. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2008.01823.x.
- Kuśnierczyk, A.; Winge, P.; Midelfart, H.; Armbruster, W. S.; Rossiter, J. T.; Bones, A. M. (2007): Transcriptional responses of Arabidopsis thaliana ecotypes with different glucosinolate profiles after attack by polyphagous *Myzus persicae* and oligophagous *Brevicoryne brassicae*. In: *Journal of experimental botany* 58 (10), S. 2537–2552. DOI: 10.1093/jxb/erm043.
- Langer, F. (2021): Ist die Artenvielfalt zu bewahren? In: *GEO* (1), S. 85–106.
- Lazár, D.; Susila, P.; Naus, J. (2006): Early detection of plant stress from changes in distributions of chlorophyll a fluorescence parameters measured with fluorescence imaging. In: *Journal of Fluorescence* 16 (2), S. 173–176. DOI: 10.1007/s10895-005-0032-1.
- Lehmhus, J. (2001): Auswirkungen von Untersaaten in Weißkohlkulturen auf die Populationsdynamik der Schadinsekten, die Unkräuter und den Ertrag. Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau (LVG) Erfurt (2017): Kohlgemüse - große Artenvielfalt mit hohem Gesundheitswert. In: *Flyer des thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt.*
- Lenth, R. V. (2016): Least-Squares Means: The R Package lsmeans. In: *Journal of Statistical Software* 69 (1). DOI: 10.18637/jss.v069.i01.
- Lenth, R. V. (2018): estimability: Tools for Assessing Estimability of Linear Predictions. R package version 1.3. Online verfügbar unter <https://CRAN.R-project.org/package=estimability>.
- Lenthe, J.-H. (2006): Erfassung befallsrelevanter Klimafaktoren in Weizenbeständen mit Hilfe digitaler Infrarot-Thermografie. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Bonn.
- Lilienthal, H. (2014): Optische Sensoren in der Landwirtschaft: Grundlagen und Konzepte. In: *Journal für Kulturpflanzen* 2 (66), 34-41. DOI: 10.5073/JfK.2014.02.01.
- Lindemann-Zutz, K.; Block, R.; Banna-Köthemann, C.; Meyer, S. F.; Graaff, E.; Lessmann, C.; Kohl, M. (2021): Maßnahmen zur Steigerung der N-Effizienz im Freilandgemüsebau. Leitfaden für Beratung und Praxis.
- Lipinski, K. (2010): *Glossar. Bildsensoren.* Datacom-Buchverlag Gmb.
- Liu, T.-X.; Liang G.-M.; Haseeb, M.; Chen, W. (2006): Adoption of integrated management strategies for diamondback moth and other crucifer insect pests in Texas. In: *Proceedings of the 5th International Workshop, Beijing, China*, S. 321–337.
- López, O.; Rach, M. M.; Migallon, H.; Malumbres, M. P.; Bonastre, A.; Serrano, J. J. (2012): Monitoring pest insect traps by means of low-power image sensor technologies. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 12 (11), S. 15801–15819. DOI: 10.3390/s121115801.

- López Gutiérrez, N. (Hg.) (2018): Biotechnische Hilfsmittel zur Überwachung von wichtigen Schädlingen im Gemüsebau. *Informationen der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt*. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt.
- Lüling, N.; Reiser, D.; Griepentrog, H. W. (2021a): Volume and leaf area calculation of cabbage with a neural network-based instance segmentation. In: J. V. Stafford (Hg.): Precision agriculture '21, Bd. 86. 13th European Conference on Precision Agriculture. Budapest, Hungary, 19-22 July, 2021. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, S. 719–726.
- Lüling, N.; Reiser, D.; Stana, A.; Griepentrog, H. W. (2021b): Using depth information and colour space variations for improving outdoor robustness for instance segmentation of cabbage. In: 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China, 30.05.2021 - 05.06.2021: IEEE, S. 2331–2336.
- Mahlein, A.-K. (2011): Detection, identification, and quantification of fungal diseases of sugar beet leaves using imaging and non-imaging hyperspectral techniques. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn.
- Matyssek, R.; Herppich, W. B. (2019): Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl.: Springer-Verlag GmbH.
- Maxwell, K.; Johnson, G. N. (2000): Chlorophyll fluorescence - a practical guide. In: *Journal of experimental botany* 51 (345), S. 659–668. DOI: 10.1093/jxb/51.345.659.
- McCravy, K. W. (2018): A Review of Sampling and Monitoring Methods for Beneficial Arthropods in Agroecosystems. In: *Insects* 9 (4). DOI: 10.3390/insects9040170.
- Meier, U. (Hg.) (1997): Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. BBCH-Monograph. Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft in Berlin und Braunschweig. Berlin, Wien u.a.: Blackwell-Wiss.-Verl.
- Miluch, C. E. (2010): Development of a Semiochemical-based Monitoring System for Diamondback Moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae) in Canola in Alberta. Dissertation. University of Alberta, Edmonton, Alberta. Department of Agricultural, Food and Nutritional Science.
- Mohr, K.-H. (2006): Erdflöhe. (Col. Chrys. Halticinae). Nachdr. der 1. Aufl. Wittenberg Lutherstadt, Ziemsen, 1960. Hohenwarsleben: Westarp-Wiss.-Verl.-Ges (Die neue Brehm-Bücherei, H. 261).
- Molet, T. (2011): CPHST Pest Datasheet for *Pieris brassicae*. USDA-APHIS-PPQ-CPHST.
- Morishita, M.; Azuma, K. (1990): Effect of temperature on consumption of cabbage leaves by larvae of diamondback moth (*Plutella xylostella* L.). In: *Japanese journal of applied entomology and zoology* 34 (2), S. 169–171. DOI: 10.1303/jjaez.34.169.
- Moriuti, S. (1986): Taxonomic notes on the diamondback moth. In: *International Workshop on Diamondback Moth Management, 1st Tainan Mar 11-15, 1985 Taiwan*, S. 83–88.
- Morley, K.; Finch, S.; Collier, R. H. (2005): Companion planting - behaviour of the cabbage root fly on host plants and non-host plants. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 117 (1), S. 15–25. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2005.00325.x.
- Muirhead-Thomson, R. C. (1991): Trap responses of flying insects. The influence of trap design on capture efficiency. London u.a.: Acad. Pr.
- Noack, P. O. (2018): Einsatz von Multi- und Hyperspektralsensoren in der Landwirtschaft. In: *38. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF (27)*, S. 840–850.

- Nofemela, R. S. (2010): The ability of synthetic sex pheromone traps to forecast *Plutella xylostella* infestations depends on survival of immature stages. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 136 (3), S. 281–289. DOI: 10.1111/j.1570-7458.2010.01029.x.
- Olfati, J. A.; Peyvast, G.; Shabani, H.; Nosratie-Rad, Z. (2010): An Estimation of Individual Leaf Area in Cabbage and Broccoli Using Non-destructive Methods. In: *Journal of Agricultural Science and Technology* (12), S. 627–6352.
- Ouden, H. den; Theunissen, J. (1988): Preference and non-preference in monitoring cabbage root fly, *Delia radicum*/ *D. brassicae*/, oviposition by traps. In: *Acta Horticulturae* (219), S. 11–14. DOI: 10.17660/ActaHortic.1988.219.1.
- Palmer, C. M.; Siebke, K.; Yeates, D. K. (2004): Infrared video thermography: a technique for assessing cold adaptation in insects. In: *BioTechniques* 37 (2), 212-4, 216-7. DOI: 10.2144/04372BI01.
- Paulus, S. (2017): Potentiale von Laserscannern zur Phänotypisierung von Pflanzen für den Einsatz im Hochdurchsatz-Screening. Dissertation. Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn, Bonn.
- Paulus, S.; Dupuis, J.; Schumann, H.; Kuhlmann, H. (2013): Automatische Parameterextraktion aus hochauflösenden Laserscans – ein wichtiger Schritt bei der Phänotypisierung. In: *19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft* 81, S. 241–249.
- Paulus, S.; Mahlein, A.-K. (2020): Technical workflows for hyperspectral plant image assessment and processing on the greenhouse and laboratory scale. In: *GigaScience* 9 (8). DOI: 10.1093/gigascience/giaa090.
- Pflanz, M.; Nordmeyer, H.; Schirrmann, M. (2018): Weed Mapping with UAS Imagery and a Bag of Visual Words Based Image Classifier. In: *Remote Sensing* 10 (10), S. 1–17. DOI: 10.3390/rs10101530.
- PflSchG (06.02.2012): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz - PflSchG). PflSchG.
- Poehling, H.-M.; Verreet, J.-A. (Hg.) (2013): Lehrbuch der Phytomedizin. 41 Tabellen. Unter Mitarbeit von Joseph-Alexander Verreet. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Pogue, M. G.; Simmons, R. B. (2008): A New Pest Species of *Copitarsia* (Lepidoptera: Noctuidae) from the Neotropical Region Feeding on *Asparagus* and Cut Flowers. In: *Annals of the Entomological Society of America* 101 (4), S. 743–762. DOI: 10.1603/0013-8746(2008)101[743:ANPSOC]2.0.CO;2.
- Pohl, J.-P.; Hörsten, D. von; Wegener, J. K.; Golla, B.; Karpinski, I.; Rajmis, S. et al. (2020): Assistenzsystem für den teilflächenspezifischen Einsatz von Herbiziden. In: *Tagungsband 29. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und - bekämpfung* (464), S. 216–221. DOI: 10.5073/jka.2020.464.033.
- Preti, M.; Moretti, C.; Scarton, G.; Giannotta, G.; Angeli, S. (2021a): Developing a smart trap prototype equipped with camera for tortricid pests remote monitoring. In: *Bulletin of Insectology* 1 (74), S. 147–160.
- Preti, M.; Verheggen, F.; Angeli, S. (2021b): Insect pest monitoring with camera-equipped traps: strengths and limitations. In: *Journal of Pest Science* 94 (2), S. 203–217. DOI: 10.1007/s10340-020-01309-4.
- Priya, C. T.; Praveen, K.; Srividya, A. (2013): Monitoring Of Pest Insect Traps Using Image Sensors & Dspic. In: *International Journal of Engineering Trends and Technology* 4 (9), S. 4088–4093.

- Prokopy, R. J.; Collier, R. H.; Finch, S. (1983a): Leaf color used by cabbage root flies to distinguish among host plants. In: *Science* 221 (4606), S. 190–192. DOI: 10.1126/science.221.4606.190.
- Prokopy, R. J.; Collier, R. H.; Finch, S. (1983b): Visual detection of host plants by cabbage root flies. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 34 (1), S. 85–89. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1983.tb03294.x.
- R Core Team (2021): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Version 4.1.0. Online verfügbar unter <https://www.R-project.org/>.
- Radcliffe, E. B.; Hutchison, W. D.; Cancelado, R. E. (Hg.) (2009): Integrated pest management. Concepts, tactics, strategies and case studies. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rajmis, S.; Karpinski, I.; Kehlenbeck, H. (2021): Ökonomische Kennzahlen und betriebswirtschaftliche Bewertung von teilflächenspezifischen Pflanzenschutz-mittelapplikationen mit Direkteinspeisung und Assistenzsystem. Themenheft: Assistenzsysteme für den Pflanzenschutz. In: *Journal für Kulturpflanzen* 73 (5-6), S. 159–170. DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.08.
- Reddy, G. V. P.; Guerrero, A. (2001): Optimum timing of insecticide applications against diamondback moth *Plutella xylostella* in cole crops using threshold catches in sex pheromone traps. In: *Pest Management Science* 57 (1), S. 90–94. DOI: 10.1002/1526-4998(200101)57:1%3C90::aid-ps258%3E3.0.co;2-n.
- Rettig, A. M. (2022): Digitale Gelbschalen als Monitoringsystem im Raps für Landwirtschaft und Forschung. Bachelorarbeit. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde.
- Reynolds, D. R.; Riley, J. R. (2002a): Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: a survey of existing and potential techniques. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 35 (2-3), S. 271–307. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00023-6.
- Reynolds, D. R.; Riley, J. R. (2002b): Remote-sensing, telemetric and computer-based technologies for investigating insect movement: a survey of existing and potential techniques. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 35 (2-3), S. 271–307. DOI: 10.1016/S0168-1699(02)00023-6.
- Richtlinie 2009/128/EG (21.19.2009): Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden.
- Riley D. G. (2011): Economic Injury Level (EIL) and Economic Threshold (ET) Concepts in Pest Management. In: SpringerReference. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Roessingh, P.; Städler, E. (1990): Foliar form, colour and surface characteristics influence oviposition behaviour in the cabbage root fly *Delia radicum*. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 57 (1), S. 93–100. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1990.tb01419.x.
- Roessingh, P.; Städler, E.; Bauer, R.; Hurter, J.; Ramp, T. (1997): Tarsal chemoreceptors and oviposition behaviour of the cabbage root fly (*Delia radicum*) sensitive to fractions and new compounds of host-leaf surface extracts. In: *Physiol Entomol* 22 (2), S. 140–148. DOI: 10.1111/j.1365-3032.1997.tb01151.x.
- Roessingh, P.; Städler, E.; Fenwick, G. R.; Lewis, J. A.; Nielsen, J. Kvist; Hurter, J.; Ramp, T. (1992): Oviposition and tarsal chemoreceptors of the cabbage root fly are stimulated by glucosinolates and host plant extracts. In: *Entomologia Experimentalis et Applicata* 65 (3), S. 267–282. DOI: 10.1111/j.1570-7458.1992.tb00680.x.

- Rosario, C.; Cruz, C. (1986): Life cycle of Diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae), in Puerto Rico. In: *JAUPR* 70 (4), S. 229–234. DOI: 10.46429/jaupr.v70i4.7099.
- Rösch, C.; Dusseldorp, M.; Meyer, R. (2007): Precision agriculture. Landwirtschaft mit Satellit und Sensor. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag (Berichte des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB)).
- Rosemann, T.; Bilgels, K.; Mentrup, D.; Kerksen, S. (2015): Pflanzenaufnahmen mit dem OEOS 800 Sensor. OEOS vs. Kamera. iotec electronic solution.
- Roßberg, D.; Hommes, M. (2014): NEPTUN-Gemüsebau 2013. Unter Mitarbeit von Dietmar Roßberg. Hg. v. Julius Kühn-Institut (Berichte aus dem Julius Kühn-Institut, 175).
- Ruckelshausen, A. (2014): Neue Sensorentwicklungen - ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. In: *Journal für Kulturpflanzen* 2 (66), S. 73–79. DOI: 10.5073/JFK.2014.02.06.
- Ruckelshausen, A. (2016): Sensorik-die Schlüsseltechnologie für dem Pflanzenbau. Bildgebende Sensorsysteme auf dem Vormarsch. In: *LOP* (11), S. 20–29.
- Ruckelshausen, A.; Busemeyer, L.; Klose, R.; Linz, A.; Moeller, K.; Thiel, M. et al. (2010): Sensor and system technology for individual plant crop scouting. In: *10th International Conference on precision agriculture*.
- Rydmer, K.; Bick, E.; Still, L.; Strand, A.; Luciano, R.; Helmreich, S. et al. (2021): Automating insect monitoring using unsupervised near-infrared sensors. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2108.05435>.
- Sannino, L.; Espinosa, B. (1999): Morphological notes on *Mamestra brassicae* (Lepidoptera Noctuidae). In: *Il Tabacco* (7), S. 13–24. Online verfügbar unter <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.615.4579&rep=rep1&type=pdf>.
- Sauer, C.; Fähndrich, S. (2010): Die Kohldrehherzgallmücke (*Contarinia nasturtii*) (Kieffer). In: *Agroscope-Merkblatt*, S. 1–6. Online verfügbar unter https://www.biocontrol.ch/media/downloads/796/infoblatt_kohl_drehherzgallmuecke.pdf, zuletzt geprüft am 20.08.2021.
- Sauer, C.; Fischer, S. (2013): Schadschwellen im Deutschschweizer Gemüsebau. Teil 1: Kohlgewächse. Hg. v. Agroscoop. Agroscoop.
- Schnieper, S. (2017): Hackroboter im Gemüsebau. Projekt/Publication im Rahmen des Projekts "Betriebswirtschaftliche Unterstützung für den Gemüsebau 2015-17". Hg. v. Landwirtschaftliches Zentrum, Gemüse und Beeren.
- Scholz, C.; Ferhadbegovic, B.; Hinck, S.; Litfin, T.; Ruckelshausen, A. (2016): Modellbasierte Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Bestimmung von Bodenparametern durch die Verwendung des autonomen Feldroboters BoniRob. In: *Aktueller Stand der Technik im Bereich der Sensoren für Precision Agriculture:36. GIL-Jahrestagung am 22.-23. Februar 2016, Osnabrück* (253), S. 15–18.
- Scholz, C.; Igelbrink, M.; Strothmann, W.; Ruckelshausen, A. (2019): Multi-wavelength laser line profiling (MWLP) System zur feldbasierten Bestimmung von 3D Strukturen, spektralen Eigenschaften und Wachstumsparametern von Pflanzen. In: *Bornimer Agrartechnische Berichte 2019. 25. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft, Bonn, Germany*, (102), S. 127–135.
- Schramowski, P.; Stammer, W.; Teso, S.; Brugger, A.; Shao, X.; Luigs, H.-G. et al. (2020): Making deep neural networks right for the right scientific reasons by interacting with their explanations.
- Schröder, G.; Treiber, H. (2014): Technische Optik. 11. Auflage, bearbeitete Ausgabe. Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG (Kamprath-Reihe).

- Scotford, I. M.; Miller, P.C.H. (2005): Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review. In: *Biosystems Engineering* 90 (3), S. 235–250. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.11.010.
- Seljåsen, R.; Meadow, R. (2006): Effects of neem on oviposition and egg and larval development of *Mamestra brassicae* L: Dose response, residual activity, repellent effect and systemic activity in cabbage plants. In: *Crop Protection* 25 (4), S. 338–345. DOI: 10.1016/j.cropro.2005.05.007.
- Shelton, A. M.; Sears, M. K.; Wyman, J. A.; Quick, T. C. (1983): Comparison of Action Thresholds for Lepidopterous Larvae on Fresh-Market Cabbage¹. In: *Journal of Economic Entomology* 76 (1), S. 196–199. DOI: 10.1093/jee/76.1.196.
- Smith, D. T.; Harris, M. K.; Liu, T.-X. (2002): Adoption of Pest Management Practices by Vegetable Growers: A Case Study. In: *American Entomologist* 48 (4), S. 236–242. DOI: 10.1093/ae/48.4.236.
- Smith, J. P.; Shepard, B. M. (2004): A binomial sequential sampling plan using a composite threshold for caterpillar management in fresh market collard. In: *Journal of Agricultural and Urban Entomology* 21 (3), S. 171–184.
- Söndgerath, D. (1987): Eine Erweiterung des Lesliemodells für die Beschreibung populationsdynamischer Prozesse bei Spezies mit mehreren Entwicklungsstadien. Dissertation. Universität Dortmund.
- Söndgerath, D.; Müller-Pietralla, W. (1996): A model for the development of the cabbage root fly (*Delia radicum* L.) based on the extended Leslie model. In: *Ecological Modelling* 91 (1-3), S. 67–76. DOI: 10.1016/0304-3800(95)00167-0.
- Southwood, T. R. E.; Henderson, P. A. (2007): *Ecological methods*. 3. ed., 7. pr. Oxford u.a.: Blackwell Science.
- Städler, E.; Schöni, R. (1990): Oviposition behavior of the cabbage root fly, *Delia radicum* (L.), influenced by host plant extracts. In: *Journal of Insect Behavior* 3 (2), S. 195–209. DOI: 10.1007/BF01417912.
- Stafford, J. V. (Hg.) (2021): Precision agriculture '21. 13th European Conference on Precision Agriculture. Budapest, Hungary, 19-22 July, 2021. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers.
- Stan, G. (1996): Pheromon-Forschungen in Siebenbürgen. In: *Stapfia* 45, S. 221–258. Online verfügbar unter https://www.zobodat.at/pdf/STAPFIA_0045_0221-0258.pdf, zuletzt geprüft am 20.08.2021.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Gemüseerhebung - Anbau und Ernte von Gemüse und Erdbeeren - 2020. In: *Fachserie 3 Reihe 3.1.3*, S. 1–79.
- Sterry, P.; Mackay, A. (2005): Schmetterlinge. 325 Arten entdecken und bestimmen. Starnberg: Dorling Kindersley (DK-Naturführer).
- Strothmann, W. (2016): Multi-wavelength laser line profile sensing for agricultural applications. Dissertation. Universität Osnabrück.
- Strothmann, W.; Kielhorn, A.; Sellmann, F.; Möller, K.; Hänsel, D. T.; Ruckelshausen, A. (2013): Mensch–Maschine–Schnittstelle zur Bildverarbeitung im RemoteFarming. In: *19. Workshop Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft und 2. Workshop Unbemannte autonom fliegende Systeme (UAS) in der Landwirtschaft* (81), S. 41–49.
- Sulifoa, J. B.; Ebenebe, A. A. (2007): Evaluation of pheromone trapping of diamondback moth (*Plutella xylostella*) as a tool for monitoring larval infestations in cabbage crops in Samoa. In: *S. Pac. J. Nat. App. Sci.* 25 (1), S. 43. DOI: 10.1071/SP07007.

- Sullivan, M.; Molet, T. (2014): CPHST Pest Datasheet for *Autographa gamma*. USDA-APHIS-PPQ-CPHST.
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2008): Plant physiology. Das Original mit Übersetzungshilfen. 4. ed., [Nachdr.]. Berlin, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verl. (Easy reading). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz267699468cov.htm>.
- Terytze, K.; Adam, H. (1981): Zur Verwendung von Pheromonfallen für die biologische Bekämpfung der Kohleule (*Barathra brassicae* L.) mittels Eiparasiten der Gattung *Trichogramma* (*Trichogramma evanescens* Westw.) (Lepidoptera, Noctuidae; Hymenoptera, Trichogrammatidae). In: *Archives Of Phytopathology And Plant Protection* 17 (6), S. 387–396. DOI: 10.1080/03235408109438803.
- Terytze, K.; Adam, H.; Kovaljev, B. (1987): Einsatz von Pheromonfallen zur Überwachung von schädlichen Lepidopteren-Arten im Kohlgemüseanbau. In: *Archives Of Phytopathology And Plant Protection* 23 (6), S. 465–473. DOI: 10.1080/03235408709437754.
- Theunissen, J.; Ouden, H. den (1987): Tolerance levels and sequential sampling tables for supervised control in cabbage crops. In: *Mitteilungen der Schweizerische Entomologische Gesellschaft* 60 (3-4), S. 243–248. DOI: 10.5169/seals-402272.
- Thiel, L.; Haberlah-Korr, V.; Mergenthaler, M.; Gerowitt, B. (2019): „Ich würde wohl das meiste Geld mit Spaziergängen über den Acker verdienen“ – Die Sicht von Betriebsleitenden zum Einsatz von Insektiziden im integrierten Pflanzenschutz. *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Aktuelle Beiträge*. DOI: 10.12767/buel.v97i3.251.
- Thiel, L.; Mergenthaler, M.; Haberlah-Korr, V. (2021): Wahrgenommene Umsetzung des integrierten Pflanzenschutzes bei landwirtschaftlichen Betrieben in Nordwestdeutschland. In: *Gesunde Pflanzen* 73 (2), S. 119–134. DOI: 10.1007/s10343-021-00548-4.
- Tseng, C.-L.; Lee, R.-G.; Jiang, J.-A.; Lu, F.-M.; Chang, C.-H.; Chen, Y.-S. et al. (2004): An automatic Diamondback moths monitoring system. In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Machinery and Mechatronics for Agriculture and Biosystems Engineering*, S. 153–156. Online verfügbar unter <https://scholar.google.com/citations?user=cmdzr1maaaaj&hl=en&oi=sra>.
- Varis, A.-L. (1967): Studies on the biology of the cabbage root fly (*Hylemya brassicae* Bouché) and the turnip root fly (*Hylemya floralis* Fall.). In: *Annales Agriculturae Fenniae. Seria Animalia nocentia Maatalouden tutkimuskeskuksen aikakauskirja* 6 (23), S. 1–13.
- Venables, W. N.; Ripley, B. D. (2002): *Modern applied statistics with S*. 4. ed. New York, Berlin, Heidelberg, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer (Statistics and computing).
- Verordnung (EG) Nr.396/2005 (23.02.2005): Verordnung (EG) Nr. 396/2005 des Europäischen Parlaments und des Rates über Höchstgehalte an Pestizidrückständen in oder auf Lebens- und Futtermitteln pflanzlichen und tierischen Ursprungs und zur Änderung der Richtlinie 91/414/EWG des Rates.
- Verordnung (EU) Nr. 1308/2013 (17.12.2013): Verordnung (EU) Nr. 1308/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates – über eine gemeinsame Marktorganisation für landwirtschaftliche Erzeugnisse und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 922/72, (EWG) Nr. 234/79, (EG) Nr. 1037/2001 und (EG) Nr. 1234/2007. Verordnung (EU) Nr. 1308/2013.
- Wagenitz, G. (2003): Wörterbuch der Botanik. Die Termini in ihrem historischen Zusammenhang ; mit einem englisch-deutschen und einem französisch-deutschen

- Register. 2., erweiterte Auflage. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Walker, G. P.; Cameron P..J.; Berry N. A. (2001): Implementing of an IPM programme for vegetable brassicas in New Zealand. In: *Proceedings of the 4th International Workshop, Melbourne, Australien*, S. 365–370.
- Walker, G. P.; Wallace, A. R.; Bush, R.; MacDonald, F. H.; Suckling, D. M. (2003): Evaluation of pheromone trapping for prediction of diamondback moth infestations in vegetable brassicas. In: *NZPP* 56, S. 180–184. DOI: 10.30843/nzpp.2003.56.6039.
- Wickham, H. (2016): ggplot2. Elegant graphics for data analysis. Unter Mitarbeit von Carson Sievert. Second edition. Cham: Springer international publishing (Use R!). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4546676>.
- Willert, D. J. von; Matyssek, R.; Herppich, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen. Stuttgart, New York: Thieme.
- Wilson, B. E.; Beuzelin, J. M.; VanWeelden, M. T.; Reagan, T. E.; Way, M. O. (2017): Monitoring Mexican Rice Borer (Lepidoptera: Crambidae) Populations in Sugarcane and Rice With Conventional and Electronic Pheromone Traps. In: *Journal of Economic Entomology* 110 (1), S. 150–156. DOI: 10.1093/jee/tow264.
- Wiltshire, J.; Clark, W. S.; Riding, A.; Steven, M.; Holmes, G.; Moore, M. (2002): Spectral reflectance as a basis for in-field sensing of crop canopies for precision husbandry of winter wheat (The SPARTAN project). Project Report No. 288. Hg. v. HGCA.
- Wyenandt, C. A.; Kuhar, T. P.; Hamilton, G. C.; van Gessel, M. J.; Sanchez, E. (2017): 2016-2017 Mid-Atlantic Commercial Vegetable Production Recommendation. Hg. v. Virginia Tech und Virginia State University (Virginia Cooperative Extension) (VT/0217/456-420/AREC-203).
- Wyss, E.; Daniel, C. (2004): Die Wirksamkeit von Einflugbarrieren gegen die Besiedlung von Broccoli und Kohlrabi durch die Kohldrehherz gallmücke *Contarinia nasturtii* (Diptera: Cecidomyiidae). In: *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie* 14, S. 387–390.
- Young, S. L.; Pierce, F. J. (Hg.) (2014): Automation: The Future of Weed Control in Cropping Systems. Dordrecht, s.l.: Springer Netherlands.
- Zhong, Y.; Gao, J.; Lei, Q.; Zhou, Y. (2018): A Vision-Based Counting and Recognition System for Flying Insects in Intelligent Agriculture. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (5). DOI: 10.3390/s18051489.
- Zohren, E. (1968): Laboruntersuchungen zu Massenanzucht, Lebensweise, Eiablage und Eiablageverhalten der Kohlflye, *Chortophila brassicae* Bouché (Diptera, Anthomyiidae). In: *Zeitschrift für Angewandte Entomologie* 62 (1-4), S. 139–188. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1968.tb04118.x.
- Zuur, A.; Ieno, E. N.; Walker, N.; Saveliev, A. A.; Smith, G. M. (2009): Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. New York, NY: Springer New York (Statistics for Biology and Health). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1497729>.
- Zuur, A. F.; Hilbe, J. M.; Ieno, E. N. (2013): A beginners guide to GLM and GLMM with R. A frequentist and bayesian perspective for ecologists. Newburgh: Highland Statistics Ltd.
- <https://www.floragard.de/de-de/pflanzeninfothek/pflanze/gemuese/brassica-oleracea-var-capitata-f-alba>

7. Anhang

7.1 Bodenuntersuchungen

Tabelle 54: Bodenuntersuchungsergebnisse von den Parzellen in Braunschweig (B) und Hötzum (H), auf denen Versuche stattfanden. Die Untersuchungen wurden durch die LUFA Nord-West durchgeführt. Gehaltstufen: A = sehr niedrig, B = niedrig, C = optimal bzw. anzustreben, D = hoch, E = sehr hoch

Jahr	Ort	Kalkversorgung			Phosphor P mg/100g	Gehaltstufe	Kalium		Magnesium	
		pH- Wert	pH- Stufe	Optimum pH- Bereich			K mg/100g	Gehaltstufe	Mg mg/100g	Gehaltstufe
2013	B	6,9	D	6,1-6,7	17,2	E	10,5	C	4	B
	H	7,0	C	6,4-7,2	11,2	D	6,8	B	7	C
2014	B	6,7	E	5,4-5,8	19,8	E	13,4	D	6	C
	H	7,0	C	6,3-7,0	12,2	D	14,9	C	12	D
2015	B	6,3	C	6,1-6,7	13	D	13	B	4	A
	H	6,9	D	5,8-6,5	8	C	8	B	13	D

Tabelle 55: Bodenuntersuchungsergebnisse für Stickstoff von den Parzellen in Braunschweig (B) und Hötzum (H), auf denen Versuche stattfanden. Die Untersuchungen wurden durch die LUFA Nord-West durchgeführt

Jahr	Ort	Bodentiefe (cm)	Stickstoff		
			NO ₃ -N (kg/ha)	NH ₄ -N (kg/ha)	N-Gesamt
2013	B	0-30	13	< 0,01	40
	H	0-30	15	< 0,01	57
2014	B	0-30	-	-	-
	H	0-30	24	26	50
2015	B	0-30	-	-	-
	H	0-30	55	13	68

7.2 Statistik

7.2.1 Untersuchungen zur Mehligigen Kohlblattlaus

Tabelle 56: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligigen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Jahr (2014 bzw. 2015) und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 40)

Vergleich	Ort	p-Wert
Herz 2014 - Umblatt 2014	BS	0,0454
Herz 2014 - Außenblatt 2014	BS	<0,0001
Umblatt 2014 - Außenblatt 2014	BS	<0,0001
Herz 2015 - Umblatt 2015	BS	0,9713
Herz 2015 - Außenblatt 2015	BS	0,0057
Umblatt 2015 - Außenblatt 2015	BS	0,0725
Herz 2014 - Umblatt 2014	HO	<0,0001
Herz 2014 - Außenblatt 2014	HO	<0,0001
Umblatt 2014 - Außenblatt 2014	HO	0,0018
Herz 2015 - Umblatt 2015	HO	<0,0001
Herz 2015 - Außenblatt 2015	HO	<0,0001
Umblatt 2015 - Außenblatt 2015	HO	0,0192

Tabelle 57: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligigen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 41)

Pflanzenzonen Vergleich	Jahr	Versuchsstandort	Entwicklungsstadium	p-Wert
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	1 (BBCH 12-18)	0,0205
Herz-Außenblatt				1,000
Umblatt- Außenblatt				0,0205
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	1 (BBCH 12-18)	1,000
Herz-Außenblatt				1,000
Umblatt- Außenblatt				1,000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	1 (BBCH 12-18)	1,000
Herz-Außenblatt				1,000

7. Anhang

Umblatt- Außenblatt				1,000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	1 (BBCH 12-18)	1,000
Herz-Außenblatt				1,000
Umblatt- Außenblatt				1,000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	2 (BBCH 19-40)	0,7168
Herz-Außenblatt				0,7168
Umblatt- Außenblatt				0,7168
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	2 (BBCH 19-40)	0,7168
Herz-Außenblatt				0,7168
Umblatt- Außenblatt				0,7168
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	2 (BBCH 19-40)	<0,0001
Herz-Außenblatt				0,7168
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	2 (BBCH 19-40)	<0,0001
Herz-Außenblatt				0,7168
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	3 (BBCH 41-46)	0,3480
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	3 (BBCH 41-46)	0,9784
Herz-Außenblatt				0,0216
Umblatt- Außenblatt				0,0039
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	3 (BBCH 41-46)	0,0096
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	3 (BBCH 41-46)	0,0008
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				0,2821
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	4 (BBCH 47-49)	0,5696
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	4 (BBCH 47-49)	0,9187
Herz-Außenblatt				0,0234
Umblatt- Außenblatt				0,5696
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	4 (BBCH 47-49)	0,5696
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	4 (BBCH 47-49)	0,9187
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001

Tabelle 58: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Blattseiten (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 42)

Vergleich	Ort	p-Wert
o 2014 - u 2014	BS	<0,0001
o 2015 - u 2015	BS	<0,0001
o 2014 - u 2014	HO	<0,0001
o 2015 - u 2015	HO	<0,0001

Tabelle 59: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Mehligen Kohlblattlaus in Abhängigkeit von Blattseiten (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzenzonen, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 43)

Vergleich	Ort	p-Wert
o 2014 Herz - u 2014 Herz	BS	0,9777
o 2014 Umblatt - u 2014 Umblatt	BS	0,0002
o 2014 Außenblatt - u 2014 Außenblatt	BS	<0,0001
o 2015 Herz - u 2015 Herz	BS	0,9777
o 2015 Umblatt - u 2015 Umblatt	BS	0,9777
o 2015 Außenblatt - u 2015 Außenblatt	BS	<0,0001
o 2014 Herz - u 2014 Herz	HO	0,9777
o 2014 Umblatt - u 2014 Umblatt	HO	<0,0001
o 2014 Außenblatt - u 2014 Außenblatt	HO	<0,0001
o 2015 Herz - u 2015 Herz	HO	0,9777
o 2015 Umblatt - u 2015 Umblatt	HO	<0,0001
o 2015 Außenblatt - u 2015 Außenblatt	HO	<0,0001

Tabelle 60: Im Versuchszeitraum zu bestimmten Terminen vorkommende Pfirsichblattläuse

Datum	Ort	Anzahl Pfirsichblattläuse (<i>Myzus persicae</i> , Sulzer) pro 50 Weißkohlpflanzen
27.05.2014	Braunschweig	7
03.06.2014	Braunschweig	8
12.05.2015	Braunschweig	2
19.05.2015	Braunschweig	3
26.05.2015	Braunschweig	1
11.05.2015	Hötzum	1
26.05.2015	Hötzum	2
08.06.2015	Hötzum	64
15.06.2015	Hötzum	50
22.06.2015	Hötzum	37
29.06.2015	Hötzum	3

7.2.2 Untersuchungen zu Schmetterlingslarven

Tabelle 61: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 46)

Vergleich	Ort	p-Wert
Herz 2014 - Umblatt 2014	BS	0,0792
Herz 2014 - Außenblatt 2014	BS	0,5793
Umblatt 2014 - Außenblatt 2014	BS	0,0035
Herz 2015 - Umblatt 2015	BS	0,0006
Herz 2015 - Außenblatt 2015	BS	0,1391
Umblatt 2015 - Außenblatt 2015	BS	0,3243
Herz 2014 - Umblatt 2014	HO	0,0035
Herz 2014 - Außenblatt 2014	HO	0,1306
Umblatt 2014 - Außenblatt 2014	HO	0,5793
Herz 2015 - Umblatt 2015	HO	0,5793
Herz 2015 - Außenblatt 2015	HO	0,0066
Umblatt 2015 - Außenblatt 2015	HO	0,0001

Tabelle 62: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 47)

Pflanzenzonen Vergleich	Jahr	Versuchsstandort	Entwicklungsstadium	p-Wert
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	2 (BBCH 19-40)	0,0002
Herz-Außenblatt				0,5540
Umblatt- Außenblatt				0,1064
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	2 (BBCH 19-40)	0,0032
Herz-Außenblatt				0,9228
Umblatt- Außenblatt				0,0265
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	2 (BBCH 19-40)	0,9228
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	2 (BBCH 19-40)	0,0563
Herz-Außenblatt				0,9228
Umblatt- Außenblatt				0,8503
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	3 (BBCH 41-46)	0,1263
Herz-Außenblatt				<0,0001
Umblatt- Außenblatt				<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	3 (BBCH 41-46)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	3 (BBCH 41-46)	0,0004
Herz-Außenblatt				0,0034
Umblatt- Außenblatt				1,0000

7. Anhang

Herz-Umblatt	2015	Hötzum	3 (BBCH 41-46)	0,0034
Herz-Außenblatt				0,0082
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig	4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum	4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum	4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt				1,0000
Umblatt- Außenblatt				1,0000

Tabelle 63: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohlmotten- bzw. Kleinen Kohlweißlinglarven in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (Abbildung 48; Abbildung 49)

Pflanzenzonen Vergleich	Jahr	Versuchsstandort	Schmetterlingsart	Entwicklungsstadium	p-Wert
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlmotte	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlmotte	2 (BBCH 19-40)	0,0340
Herz-Außenblatt					0,0143
Umblatt- Außenblatt					0,8673
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		2 (BBCH 19-40)	0,0009
Herz-Außenblatt					<0,0001
Umblatt- Außenblatt					0,8673
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	0,1732
Herz-Außenblatt					0,0768
Umblatt- Außenblatt					<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	0,8673
Herz-Außenblatt					0,8673
Umblatt- Außenblatt					0,8673
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlmotte	3 (BBCH 41-46)	0,3998
Herz-Außenblatt					0,8906
Umblatt- Außenblatt					0,0382
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		3 (BBCH 41-46)	0,8906
Herz-Außenblatt					0,8906
Umblatt- Außenblatt					0,8906
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	0,8906
Herz-Außenblatt					0,0004
Umblatt- Außenblatt					0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	0,0008
Herz-Außenblatt					0,8906
Umblatt- Außenblatt					0,8906
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlmotte	4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kleiner Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000

Herz-Umblatt	2014	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kleiner Kohlweißling	2 (BBCH 19-40)	0,2017
Herz-Außenblatt					<0,0001
Umblatt- Außenblatt					0,0153
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		2 (BBCH 19-40)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	<0,0001
Herz-Außenblatt					0,0135
Umblatt- Außenblatt					<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kleiner Kohlweißling	3 (BBCH 41-46)	<0,0001
Herz-Außenblatt					0,0004
Umblatt- Außenblatt					<0,0001
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		3 (BBCH 41-46)	1,0000
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	1,0000
Herz-Außenblatt					0,0968
Umblatt- Außenblatt					0,2705
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	1,0000
Herz-Außenblatt					0,2705
Umblatt- Außenblatt					1,0000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kleiner Kohlweißling	4 (BBCH 47-49)	0,8946
Herz-Außenblatt					0,8946
Umblatt- Außenblatt					0,8946
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		4 (BBCH 47-49)	0,8946
Herz-Außenblatt					0,8946
Umblatt- Außenblatt					0,8946
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	0,8946
Herz-Außenblatt					0,8946
Umblatt- Außenblatt					0,8946
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	0,0009
Herz-Außenblatt					0,0028
Umblatt- Außenblatt					0,8946

Tabelle 64: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohleule, Gammaeule, Großem Kohlweißling bzw. Kohlzünsler in Abhängigkeit von Pflanzenzonen (Tabelle 20), Entwicklungsstadien, Jahr und Ort (NaN=Aufgrund der Daten Struktur konnten die Daten nicht statistisch ausgewertet werden)

Pflanzenzonen Vergleich	Jahr	Versuchsstandort	Schmetterlingsart	Entwicklungsstadium	p-Wert
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohleule	1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig			NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum			NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum			NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohleule	2 (BBCH 19-40)	1,0000
Herz-Außenblatt					0,113
Umblatt- Außenblatt					0,113
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig			NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum			0,328
Herz-Außenblatt					0,904
Umblatt- Außenblatt					0,153
Herz-Umblatt	2015	Hötzum			0,22480
Herz-Außenblatt					0,00958
Umblatt- Außenblatt					0,40900
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohleule	3 (BBCH 41-46)	0,8986
Herz-Außenblatt					0,1827

7. Anhang

Umblatt- Außenblatt					0,0708
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig			NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum			0,994
Herz-Außenblatt					0,540
Umblatt- Außenblatt					0,476
Herz-Umblatt	2015	Hötzum			0,96834
Herz-Außenblatt					0,00114
Umblatt- Außenblatt					0,00253
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohleule	4 (BBCH 47-49)	0,595
Herz-Außenblatt					0,026
Umblatt- Außenblatt					0,238
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig			0,935
Herz-Außenblatt					0,999
Umblatt- Außenblatt					0,920
Herz-Umblatt	2014	Hötzum			0,235
Herz-Außenblatt					0,518
Umblatt- Außenblatt					0,857
Herz-Umblatt	2015	Hötzum			0,4819
Herz-Außenblatt					0,0488
Umblatt- Außenblatt					0,0013
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Gammaeule	1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Gammaeule	2 (BBCH 19-40)	1,00
Herz-Außenblatt					0,23
Umblatt- Außenblatt					0,23
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	0,0368
Herz-Außenblatt					1,0000
Umblatt- Außenblatt					0,0365
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	0,662
Herz-Außenblatt					0,662
Umblatt- Außenblatt					1,000
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Gammaeule	3 (BBCH 41-46)	0,101
Herz-Außenblatt					0,561
Umblatt- Außenblatt					0,561
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		3 (BBCH 41-46)	0,662
Herz-Außenblatt					0,662
Umblatt- Außenblatt					1,000
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	1,0000
Herz-Außenblatt					0,014
Umblatt- Außenblatt					0,0145
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Gammaeule	4 (BBCH 47-49)	0,662
Herz-Außenblatt					0,662
Umblatt- Außenblatt					1,000
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		4 (BBCH 47-49)	1,00000
Herz-Außenblatt					0,00199
Umblatt- Außenblatt					0,00192
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	0,329
Herz-Außenblatt					0,756
Umblatt- Außenblatt					0,756
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	1,00000
Herz-Außenblatt					0,000674
Umblatt- Außenblatt					0,000653
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Großer Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN

Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Großer Kohlweißling	2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	0,3448
Herz-Außenblatt					0,0226
Umblatt- Außenblatt					0,4262
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Großer Kohlweißling	3 (BBCH 41-46)	0,808
Herz-Außenblatt					0,427
Umblatt- Außenblatt					0,149
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Großer Kohlweißling	4 (BBCH 47-49)	0,101
Herz-Außenblatt					0,230
Umblatt- Außenblatt					0,911
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		4 (BBCH 47-49)	0,961
Herz-Außenblatt					0,374
Umblatt- Außenblatt					0,534
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	1,000
Herz-Außenblatt					0,439
Umblatt- Außenblatt					0,438
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlzünsler	1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		1 (BBCH 12-18)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlzünsler	2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		2 (BBCH 19-40)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlzünsler	3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		3 (BBCH 41-46)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN

7. Anhang

Herz-Umblatt	2014	Braunschweig	Kohlzünsler	4 (BBCH 47-49)	0,812
Herz-Außenblatt					1,000
Umblatt- Außenblatt					0,812
Herz-Umblatt	2015	Braunschweig		4 (BBCH 47-49)	NaN
Herz-Außenblatt					NaN
Umblatt- Außenblatt					NaN
Herz-Umblatt	2014	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	0,331
Herz-Außenblatt					0,331
Umblatt- Außenblatt					1,000
Herz-Umblatt	2015	Hötzum		4 (BBCH 47-49)	0,913
Herz-Außenblatt					0,515
Umblatt- Außenblatt					0,768

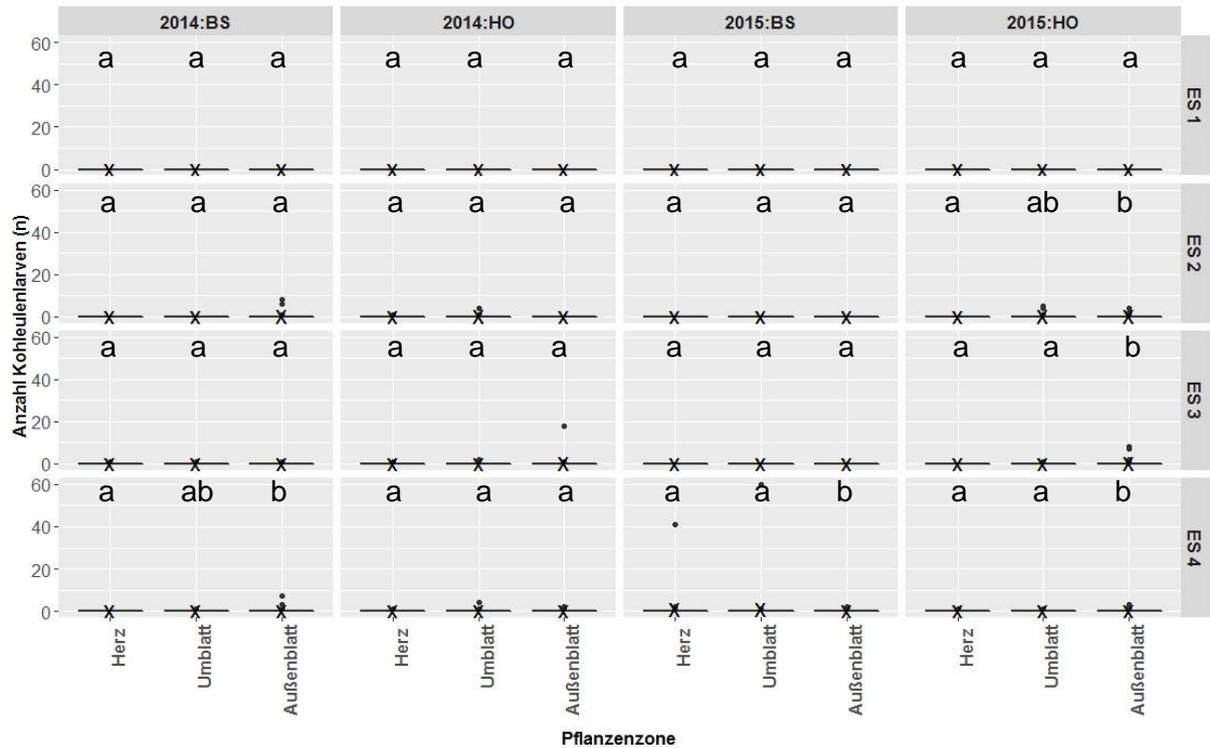


Abbildung 74: Absolute Verteilung der Larven der Kohleule an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlpflanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (n=50, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

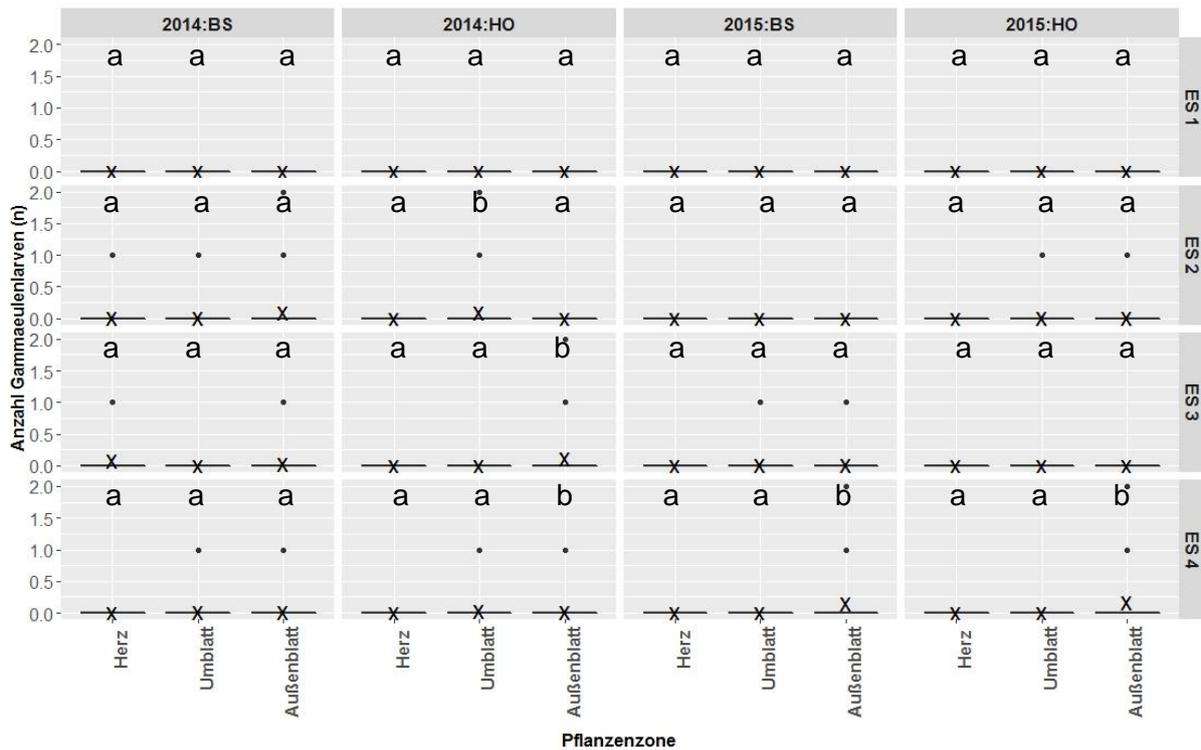


Abbildung 75: Absolute Verteilung der Larven der Gammaeulen an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlplanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=50$, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

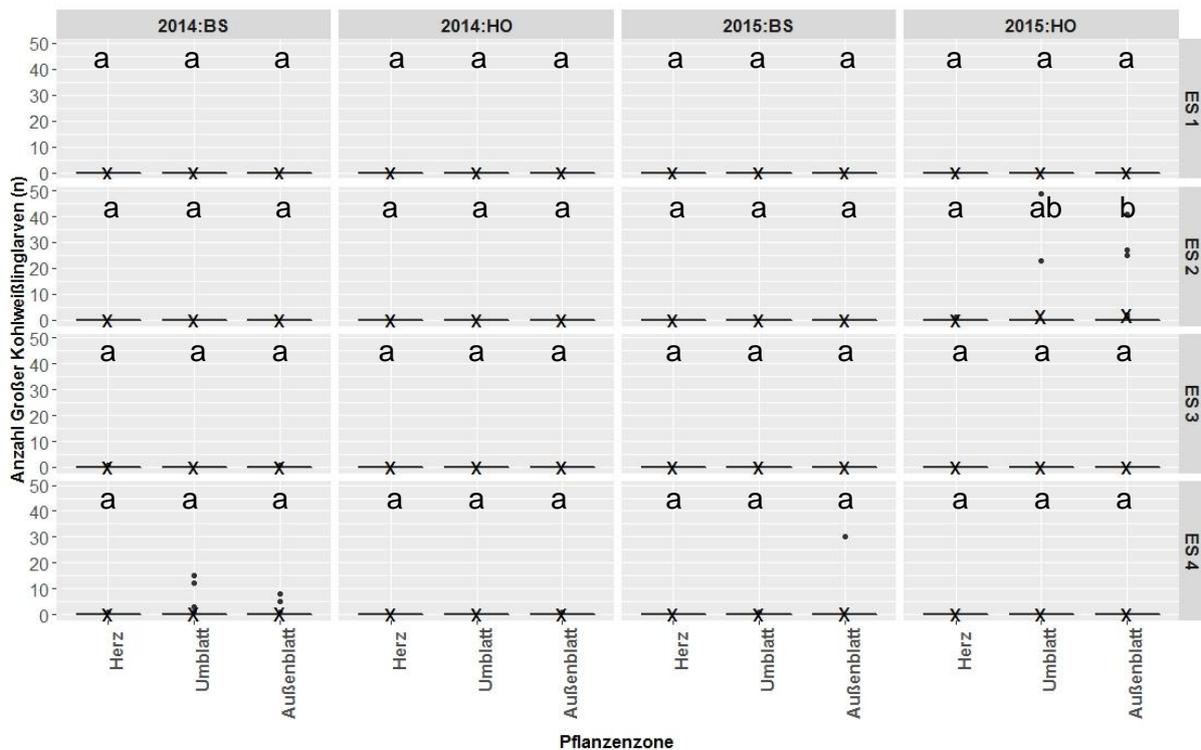


Abbildung 76: Absolute Verteilung der Larven des Großen Kohlweißlings an unterschiedlichen vertikalen Zonen einer Weißkohlplanze in Abhängigkeit von Jahr, Entwicklungsstufe (ES 1 \triangleq BBCH 12-18, ES 2 \triangleq BBCH 19-40, ES 3 \triangleq BBCH 41-46, ES 4 \triangleq BBCH 47-49) und Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum). Box-Plots mit verschiedenen Buchstaben unterscheiden sich signifikant mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($n=50$, LMER, LSMEANS, x = arithmetisches Mittel)

Tabelle 65: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO)

Vergleich	Ort	p-Wert
o 2014 - u 2014	BS	<0,0001
o 2015 - u 2015	BS	0,0709
o 2014 - u 2014	HO	<0,0001
o 2015 - u 2015	HO	<0,0001

Tabelle 66: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzzone, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 50)

Vergleich	Pflanzzone	Ort	p-Wert
o 2014 - u 2014	Herz	BS	0,8976
o 2015 - u 2015		BS	0,5721
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	<0,0001
o 2015 - u 2015		BS	0,7835
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	<0,0001
o 2015 - u 2015		BS	<0,0001
o 2014 - u 2014	Herz	HO	0,8976
o 2015 - u 2015		HO	0,8976
o 2014 - u 2014	Umblatt	HO	<0,0001
o 2015 - u 2015		HO	0,3347
o 2014 - u 2014	Außenblatt	HO	<0,0001
o 2015 - u 2015		HO	<0,0001

Tabelle 67: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Schmetterlingslarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Schmetterlingsart, Jahr und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 51)

Vergleich	Ort	Schmetterlingsart	p-Wert
o 2014 - u 2014	BS	Kohlmotte	<0,0001
o 2015 - u 2015			0,2458
o 2014 - u 2014	HO	Kohlmotte	<0,0001
o 2015 - u 2015			0,2458
o 2014 - u 2014	BS	Kleiner Kohlweißling	<0,0001
o 2015 - u 2015			0,0485
o 2014 - u 2014	HO	Kleiner Kohlweißling	<0,0001
o 2015 - u 2015			0,0039
o 2014 - u 2014	BS	Kohleule	0,2968
o 2015 - u 2015			0,6425
o 2014 - u 2014	HO	Kohleule	0,3532
o 2015 - u 2015			<0,0001
o 2014 - u 2014	BS	Kohlzünsler	1,0000
o 2015 - u 2015			1,0000
o 2014 - u 2014	HO	Kohlzünsler	1,0000
o 2015 - u 2015			0,2304
o 2014 - u 2014	BS	Großer Kohlweißling	0,8326
o 2015 - u 2015			0,8326
o 2014 - u 2014	HO	Großer Kohlweißling	0,8326
o 2015 - u 2015			0,0549
o 2014 - u 2014	BS	Gammaeule	0,3958
o 2015 - u 2015			0,0657
o 2014 - u 2014	HO	Gammaeule	0,0021
o 2015 - u 2015			0,0176

Tabelle 68: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohlmotten- bzw. Kleinen Kohlweißlinglarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzzone (Tabelle 20), Jahr, Entwicklungsstadium und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO) (Abbildung 52; Abbildung 53)

Vergleich	Pflanzzone	Ort	Schmetterlingsart	Entwicklungsstadium	p-Wert
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Kohlmotte	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	<0,0001

o 2015 - u 2015		BS			0,0142
o 2014 - u 2014		HO			0,0001
o 2015 - u 2015		HO			0,2060
o 2014 - u 2014		BS	3 (BBCH 41-46)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	4 (BBCH 47-49)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Kohlmotte	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	2 (BBCH 19-40)		<0,0001
o 2015 - u 2015		BS			0,8884
o 2014 - u 2014		HO			<0,0001
o 2015 - u 2015		HO			0,8884
o 2014 - u 2014		BS	3 (BBCH 41-46)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	4 (BBCH 47-49)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Kohlmotte	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	2 (BBCH 19-40)		<0,0001
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,0002
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	3 (BBCH 41-46)		<0,0001
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			<0,0001
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	4 (BBCH 47-49)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Kleiner Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	2 (BBCH 19-40)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	3 (BBCH 41-46)		<0,0001
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,0006
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	4 (BBCH 47-49)		0,7976
o 2015 - u 2015		BS			0,7976
o 2014 - u 2014		HO			0,2265
o 2015 - u 2015		HO			0,2265
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Kleiner Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	2 (BBCH 19-40)		0,0039
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			<0,0001
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	3 (BBCH 41-46)		0,1375
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			<0,0001
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS	4 (BBCH 47-49)		1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,4251
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Kleiner Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000

7. Anhang

o 2014 - u 2014	HO		1,0000
o 2015 - u 2015	HO		1,0000
o 2014 - u 2014	BS	2 (BBCH 19-40)	<0,0001
o 2015 - u 2015	BS		1,0000
o 2014 - u 2014	HO		<0,0001
o 2015 - u 2015	HO		1,0000
o 2014 - u 2014	BS	3 (BBCH 41-46)	<0,0001
o 2015 - u 2015	BS		0,7138
o 2014 - u 2014	HO		<0,0001
o 2015 - u 2015	HO		0,1768
o 2014 - u 2014	BS	4 (BBCH 47-49)	0,0064
o 2015 - u 2015	BS		<0,0001
o 2014 - u 2014	HO		0,9637
o 2015 - u 2015	HO		<0,0001

Tabelle 69: Statistische Vergleiche zur Verteilung der Kohleulen-, Gammaeulen-, Großer Kohlweißling- und Kohlzünslerlarven in Abhängigkeit von Blattseite (o = Blattoberseite, u = Blattunterseite; Tabelle 16), Pflanzenzone (Tabelle 20), Jahr, Entwicklungsstadium und Ort (Braunschweig=BS bzw. Hötzum=HO). NaN=Aufgrund der Daten Struktur konnten die Daten nicht statistisch ausgewertet werden

Vergleich	Pflanzenzone	Ort	Schmetterlingsart	Entwicklungsstadium	p-Wert
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Kohleule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,4773
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,4661
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	BS	4 (BBCH 47-49)	1,0000		
o 2015 - u 2015	BS		1,0000		
o 2014 - u 2014	HO		1,0000		
o 2015 - u 2015	HO		1,0000		
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Kohleule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,5576
o 2015 - u 2015		HO			0,0307
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	BS	4 (BBCH 47-49)	1,0000		
o 2015 - u 2015	BS		1,0000		
o 2014 - u 2014	HO		1,0000		
o 2015 - u 2015	HO		1,0000		
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Kohleule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	0,1471
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,0007
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,6845
o 2015 - u 2015		HO			0,0005
o 2014 - u 2014	BS	4 (BBCH 47-49)	0,1414		
o 2015 - u 2015	BS		0,9678		
o 2014 - u 2014	HO		0,9678		
o 2015 - u 2015	HO		0,0042		
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Gammaeule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO		NaN	
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000

o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	0,2946
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Gammaeule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,0063
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			0,4773
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,2171
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Gammaeule	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	0,0033
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			0,0029
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			0,0031
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,0006
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Großer Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,4773
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	0,4773
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	0,4773
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Großer Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,0658
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Großer Kohlweißling	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN

7. Anhang

o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	1.0000
o 2015 - u 2015		BS			1.0000
o 2014 - u 2014		HO			1.0000
o 2015 - u 2015		HO			0,0029
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	0,0041
o 2015 - u 2015		BS			1.0000
o 2014 - u 2014		HO			1.0000
o 2015 - u 2015		HO			1.0000
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	0,9680
o 2015 - u 2015		BS			0,9680
o 2014 - u 2014		HO			1.0000
o 2015 - u 2015		HO			1.0000
o 2014 - u 2014	Herz	BS	Kohlzünsler	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Umblatt	BS	Kohlzünsler	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			1,0000
o 2014 - u 2014	Außenblatt	BS	Kohlzünsler	1 (BBCH 12-18)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		2 (BBCH 19-40)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		3 (BBCH 41-46)	NaN
o 2015 - u 2015		BS			NaN
o 2014 - u 2014		HO			NaN
o 2015 - u 2015		HO			NaN
o 2014 - u 2014		BS		4 (BBCH 47-49)	1,0000
o 2015 - u 2015		BS			1,0000
o 2014 - u 2014		HO			1,0000
o 2015 - u 2015		HO			0,0110

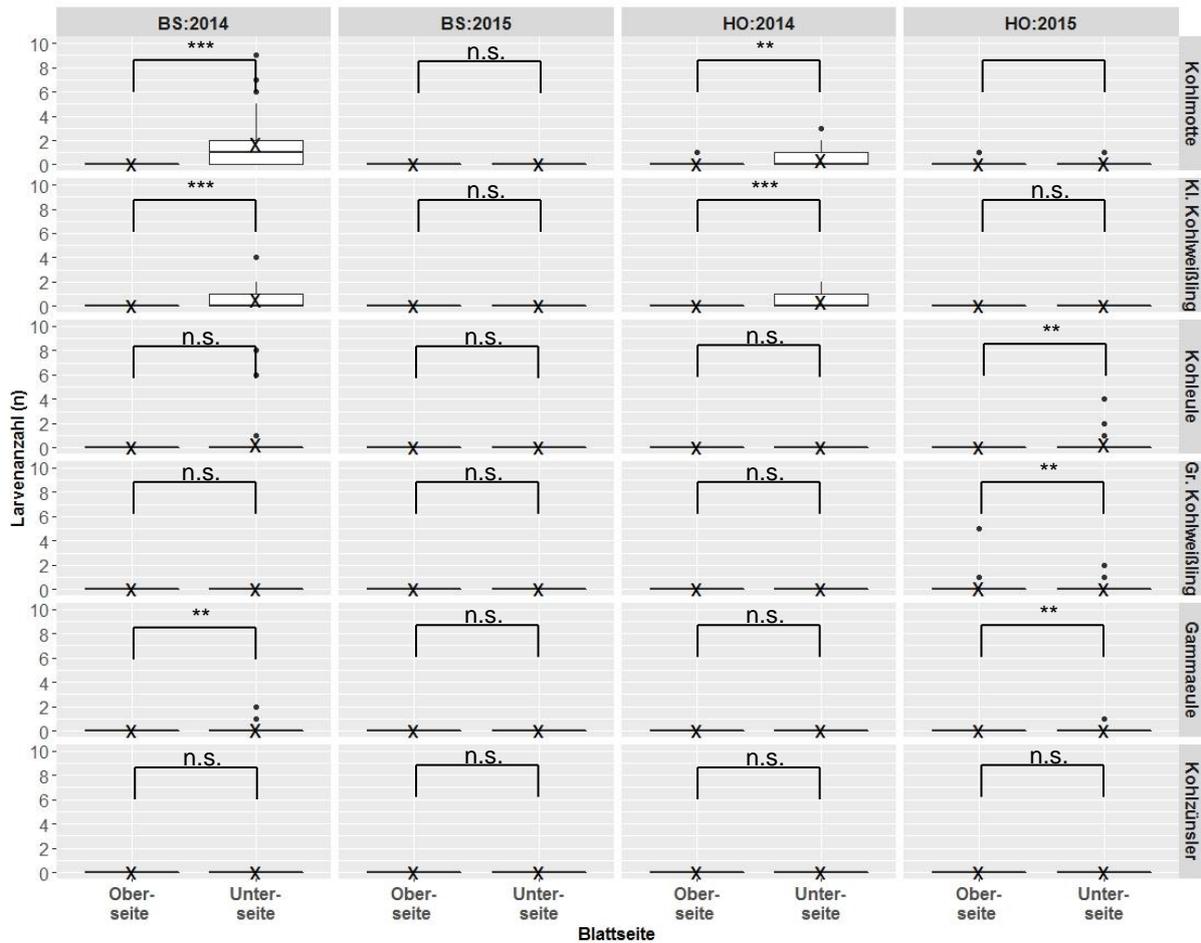


Abbildung 77: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblätter einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 2 (\triangleq BBCH 19-40) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert ($n=50$, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: '****' < 0,001; '***' < 0,01; '*' < 0,05; n.s.=nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)

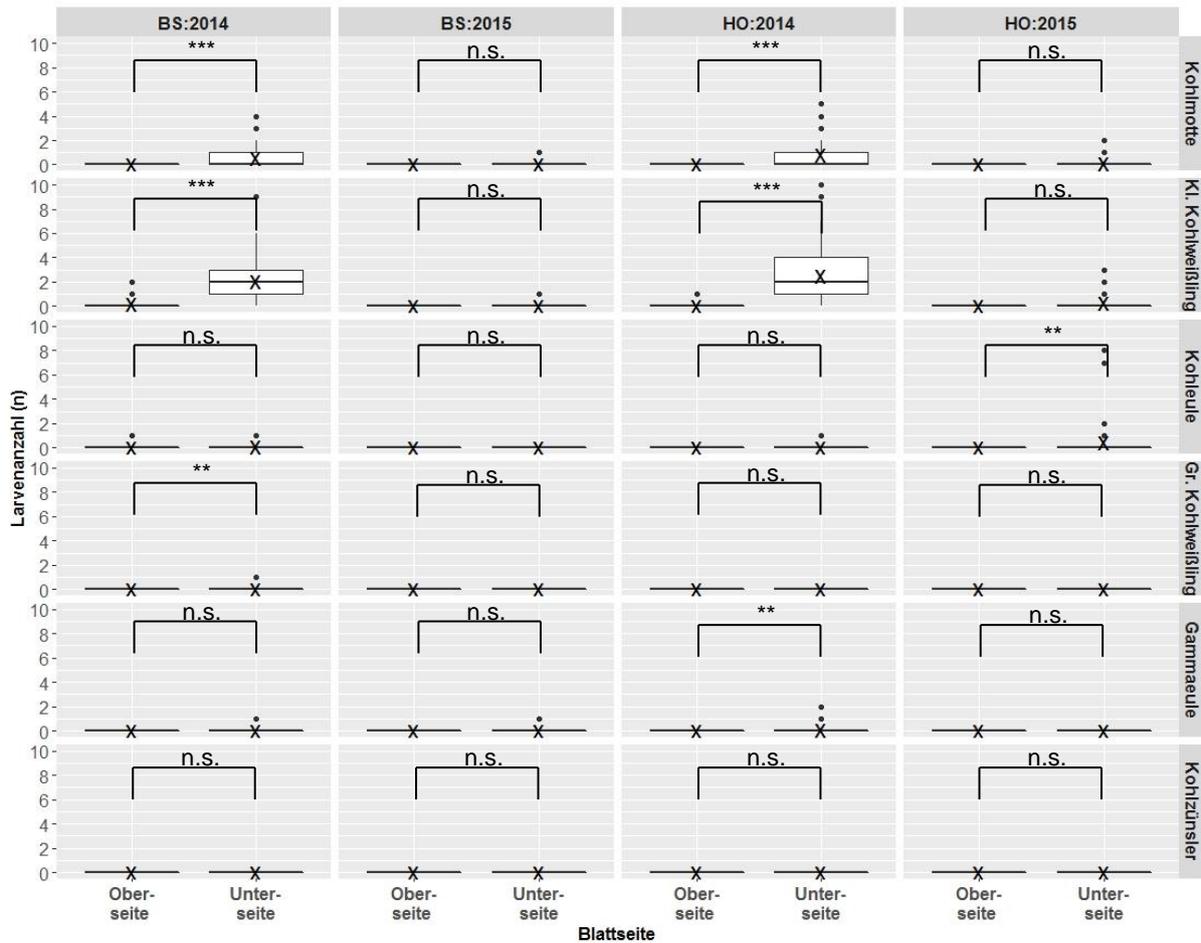


Abbildung 78: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblätter einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 3 (Δ BBCH 41-46) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert ($n=50$, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: **** $< 0,001$; *** $< 0,01$; ** $< 0,05$; n.s.=nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)

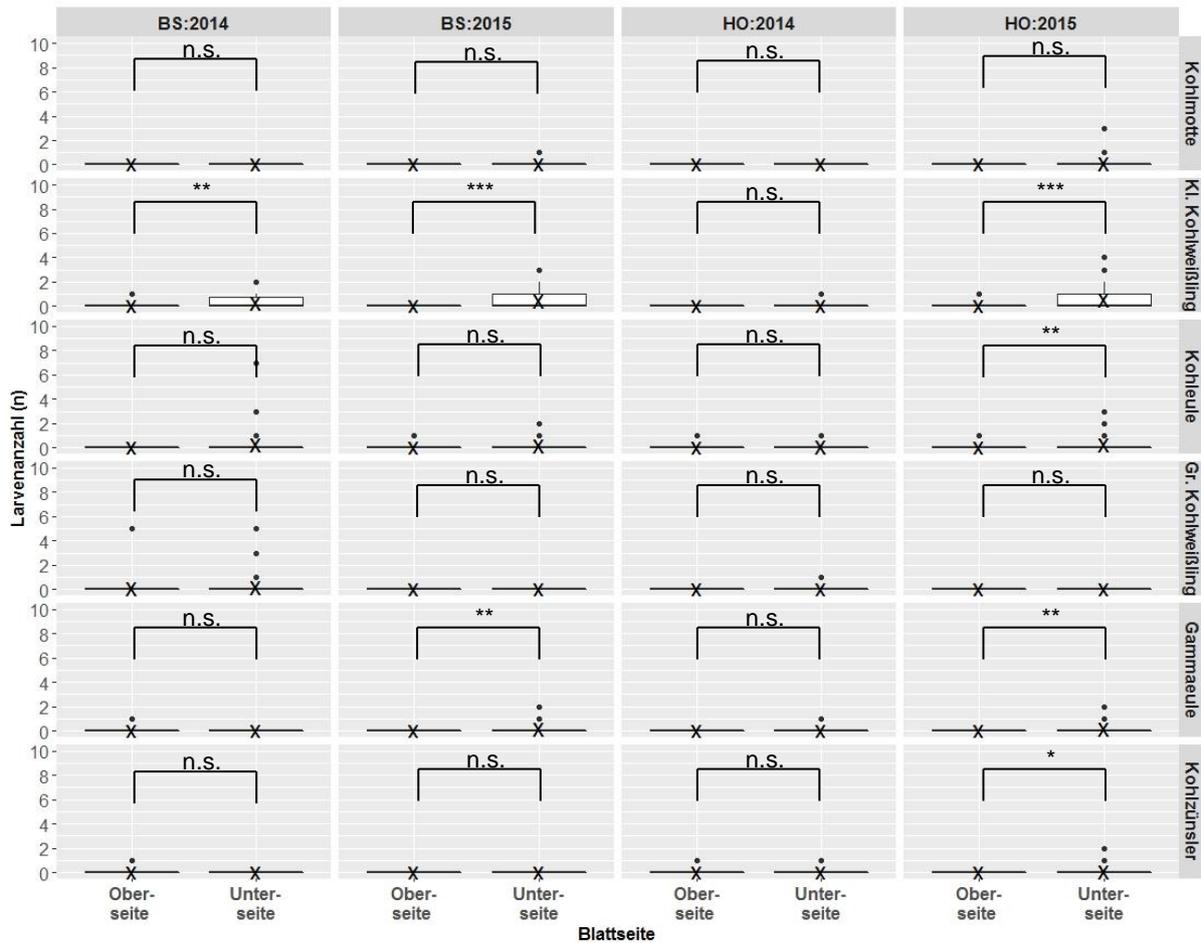


Abbildung 79: Absolute Verteilung der Schmetterlingslarven an Blattober- bzw. Blattunterseite der Außenblätter einer Weißkohlpflanze im Entwicklungsstadium 4 (\triangleq BBCH 47-49) in Abhängigkeit von Ort (BS=Braunschweig und HO=Hötzum) und Schmetterlingsart. Die Daten wurden für die statistische Auswertung über die 17 Boniturtermine akkumuliert ($n=50$, LMER, LSMEANS, Signifikanzcodes: **** $< 0,001$; *** $< 0,01$; ** $< 0,05$; n.s.=nicht signifikant; x = arithmetisches Mittel)

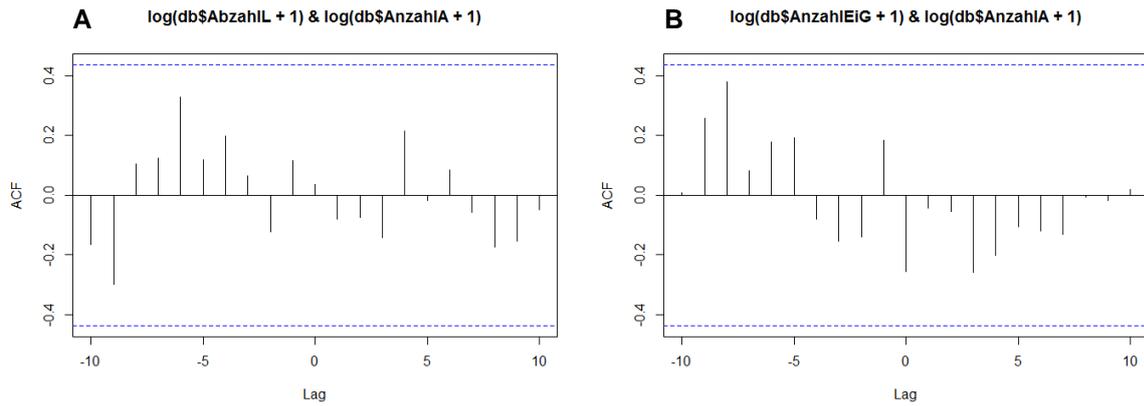


Abbildung 80: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen-Eigelegeanzahl (B) in Braunschweig im Jahr 2014 (s. 3.2.2.4)

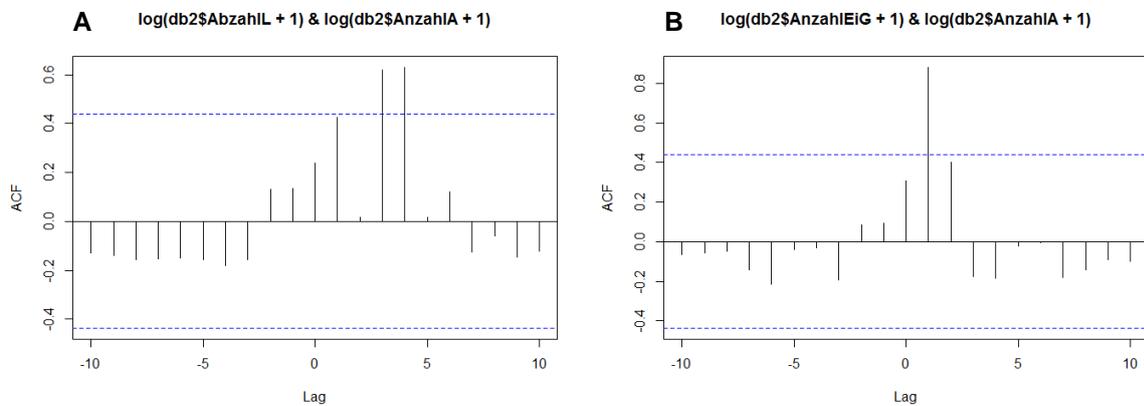


Abbildung 81: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen-Eigelegeanzahl (B) in Braunschweig im Jahr 2015 (s. 3.2.2.4)

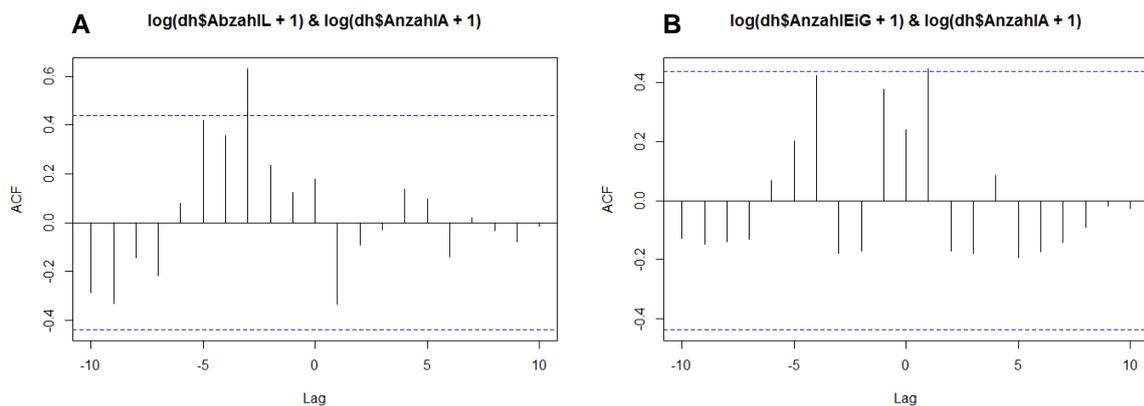


Abbildung 82: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen-Eigelegeanzahl (B) in Hötzum im Jahr 2014 (s. 3.2.2.4)

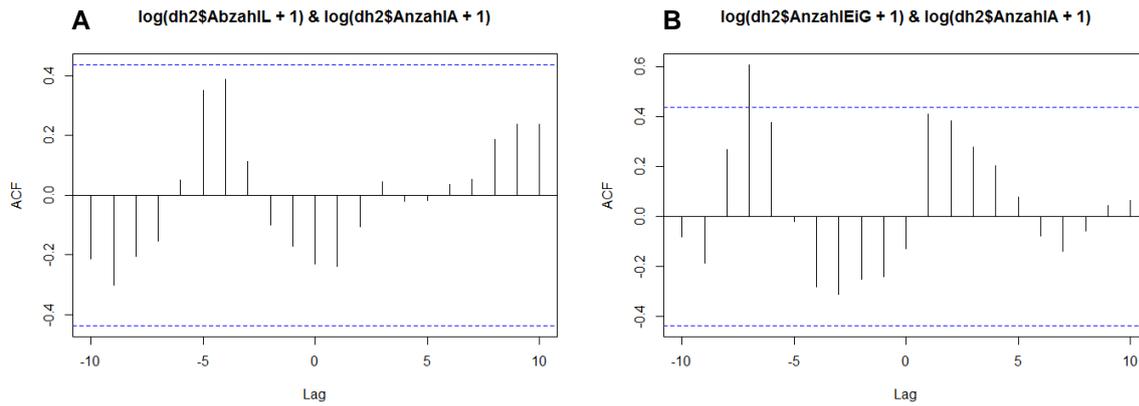


Abbildung 83: Test auf Kreuzkorrelation zwischen der Anzahl der männlichen Kohleulen im Vergleich zur Anzahl der Kohleulenlarven (A) bzw. zwischen der Anzahl an männlichen Kohleulen und der Kohleulen-Eigelegeanzahl (B) in Hötzum im Jahr 2015 (s. 3.2.2.4)

7.2.3 Untersuchungen zur Kleinen Kohlflye

Tabelle 70: Statistische Vergleiche zum Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye in Abhängigkeit von bestimmten Zeitperioden (Tabelle 23) und Datum (Abbildung 56)

Vergleich	Datum	p-Wert	Vergleich	Datum	p-Wert
2-1	16.07.2013	0,90743	2-1	13.09.2013	0,90729
3-1		0,84162	3-1		0,84144
4-1		0,00317	4-1		0,00314
5-1		0,99978	5-1		0,99978
6-1		0,99996	6-1		0,99996
7-1		0,18634	7-1		0,18583
8-1		0,94328	8-1		0,94321
3-2		1,00000	3-2		1,00000
4-2		0,17203	4-2		0,17263
5-2		0,99269	5-2		0,9927
6-2		0,98475	6-2		0,98475
7-2		0,91892	7-2		0,91897
8-2		1,0000	8-2		1,00000
4-3		0,24054	4-3		0,24104
5-3		0,97922	5-3		0,97922
6-3		0,96277	6-3		0,96278
7-3		0,95970	7-3		0,95971
8-3		0,99999	8-3		0,99999
5-4		0,01724	5-4		0,01724
6-4		0,01224	6-4		0,01234
7-4		0,89372	7-4		0,89379
8-4		0,13010	8-4		0,12951
6-5		1,00000	6-5		1,00000
7-5		0,44621	7-5		0,44651
8-5		0,99727	8-5		0,99726
7-6		0,37744	7-6		0,37758
8-6		0,99334	8-6		0,99334
8-7		0,87462	8-7		0,87463
2-1	22.07.2013	0,9074	2-1	02.09.2014	0,90739
3-1		0,8415	3-1		0,84157
4-1		<0.01	4-1		0,00308
5-1		0,9998	5-1		0,99978
6-1		1,0000	6-1		0,99996
7-1		0,1857	7-1		0,1862
8-1		0,9433	8-1		0,94323
3-2		1,0000	3-2		1,00000
4-2		0,1721	4-2		0,17229
5-2		0,9927	5-2		0,99269
6-2		0,9847	6-2		0,98475
7-2		0,9189	7-2		0,9189
8-2		1,0000	8-2		1,0000
4-3		0,2404	4-3		0,24034
5-3		0,9792	5-3		0,97923
6-3		0,9627	6-3		0,96275

7. Anhang

7-3		0,9597	7-3		0,9597
8-3		1,0000	8-3		0,99999
5-4		0,0178	5-4		0,01749
6-4		0,0120	6-4		0,01204
7-4		0,8937	7-4		0,89371
8-4		0,1294	8-4		0,12989
6-5		1,0000	6-5		1,00000
7-5		0,4465	7-5		0,44655
8-5		0,9973	8-5		0,99726
7-6		0,3775	7-6		0,37733
8-6		0,9933	8-6		0,99334
8-7		0,8747	8-7		0,87456
2-1	12.09.2013	0,9073	2-1	03.09.2014	0,9074
3-1		0,8416	3-1		0,8417
4-1		<0,01	4-1		<0,01
5-1		0,9998	5-1		0,9998
6-1		1,0000	6-1		1,0000
7-1		0,1866	7-1		0,187
8-1		0,9432	8-1		0,9433
3-2		1,0000	3-2		1,0000
4-2		0,172	4-2		0,1717
5-2		0,9927	5-2		0,9927
6-2		0,9847	6-2		0,9847
7-2		0,9189	7-2		0,919
8-2		1,0000	8-2		1,000
4-3		0,2404	4-3		0,2402
5-3		0,9792	5-3		0,9792
6-3		0,9627	6-3		0,9628
7-3		0,9597	7-3		0,9597
8-3		1,0000	8-3		1,0000
5-4		0,0174	5-4		0,0175
6-4		0,0121	6-4		0,0121
7-4		0,8938	7-4		0,8938
8-4		0,130	8-4		0,1301
6-5		1,0000	6-5		1,0000
7-5		0,4463	7-5		0,4463
8-5		0,9973	8-5		0,9973
7-6		0,3775	7-6		0,3774
8-6		0,9934	8-6		0,9933
8-7		0,8746	8-7		0,8747

7.2.4 Untersuchungen zu optoelektronischen Sensorsystemen

Tabelle 71: Test auf Korrelation zwischen der Anzahl der überlappten Blätter im Vergleich mit Befallsdauer (3.1.1).

Schadinsekt	Vergleich	rho	p-Wert
Kohlmotte	Anzahl überlappte Blätter mit Schäden ~ Befallsdauer	0,294691	0,2072
Kohleule	Anzahl überlappte Blätter mit Schäden ~ Befallsdauer	0,562929	0,0079

Tabelle 72: Statistische Vergleiche der Fv/Fm-Werte der CFBA (3.1.3). Untersucht wurde, wie die Fv/Fm-Werte von bestimmten Schadinsekten sich von den befallsfreien Bereichen unterscheiden. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich Fv/Fm-Werte von geschädigten Bereichen durch Schadinsekten sich von den ungeschädigten Bereichen unterscheiden (glm (family=binomial); lsmeans)

Schadinsekt	Vergleich	p-Wert
Mehlige Kohlblattlaus (MK) Kolonien mit über 200 Individuen	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte ohne MK	0,0001
Mehlige Kohlblattlaus (MK) Kolonien mit bis zu 15 Individuen	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte ohne MK	1,0000
Schaden mit MK Kolonien mit über 200 Individuen	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte ohne MK	0,0001
Schaden mit MK Kolonien mit bis zu 15 Individuen	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte ohne MK	1,0000
Kohlmottenlarven (KL)	Fv/Fm-Werte der KL ~ Fv/Fm-Werte ohne KL	0,0001
Kohlmottenlarven (KL) Schäden	Fv/Fm-Werte der KL ~ Fv/Fm-Werte ohne KL	0,0001
Mehlige Kohlblattlaus (MK) Kolonien mit über 200 Individuen vs. Kohlmottenlarven (KL)	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte der KL	1,0000
Schaden mit MK Kolonien mit über 200 Individuen vs. Kohlmottenlarven (KL) Schäden	Fv/Fm-Werte der MK ~ Fv/Fm-Werte der KL	1,0000

Tabelle 73: Statistische Vergleiche der Temperaturunterschiede zwischen den Blattflächen mit Insekten (Mehlige Kohlblattlaus oder Schmetterlingslarven) und ohne Insekten bzw. zwischen den unterschiedlichen Gewebearten (geschädigtes bzw. symptomfreies Gewebe). Zwischen den unterschiedlichen Gewebearten bestanden keine statistisch signifikanten Unterschiede

Vergleich	Temperatur (°C)	p-Wert
Temperatur ~ Gewebeart (Blattläuse, Larven, ohne Symptome)	20	0,9637
Temperatur ~ Gewebeart (Blattläuse, Larven, ohne Symptome)	10	0,9289
Temperatur ~ Gewebeart (Blattläuse-, Larvenschäden, ohne Symptome)	20	0,5406
Temperatur ~ Gewebeart (Blattläuse-, Larvenschäden, ohne Symptome)	10	0,8695

Tabelle 74: Statistischer Vergleich der Anzahl männliche Kohlmotten im TrapView-System und konventionellen Delta-Sexualpheromonlockstofffallen (Abbildung 63). Zwischen Jahren und unterschiedlichen Orten bestanden keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Vergleich	p-Wert
Anzahl Kohlmotten in der TrapView ~ Anzahl Kohlmotten in der konventionellen Sexualpheromonfalle	0,5366

Tabelle 75: Statistische Vergleiche zum Eiablageverhalten der Kleinen Kohlflye in Abhängigkeit von Jahr und verschiedenen äußeren TCS-Rahmenfärbungen (s=silber; o=ohne Rahmen; b=braun; g=gelb; Abbildung 71)

Vergleich	Jahr	p-Wert
s-o	2015	0,2312
g-o	2015	0,0866
b-o	2015	0,0997
g-s	2015	0,9833
b-s	2015	0,9887
b-g	2015	1,0000
s-o	2014	0,989
g-o	2014	0,368
b-o	2014	0,979
g-s	2014	0,830
b-s	2014	1,000
b-g	2014	0,760

Tabelle 76: Statistische Vergleiche der schwarzen Pixelanzahl der schwarz-weiß Bilder der LLD-Datenblocks des OEOS in Abhängigkeit der Schadinsektenart (Abbildung 73) (Dr= Kleine Kohlflye; Px=Kohlmotte; Pr=Kleiner Kohlweißling; Mb=Kohleule)

Vergleich	p-Wert
Dr - Px	0,0050
Dr - Pr	<0,0001
Dr - Mb	<0,0001
Px - Pr	<0,0001
Px - Mb	<0,0001
Pr - Mb	<0,0001

7.2.5 Untersuchungen zu Kohlerdflöhen

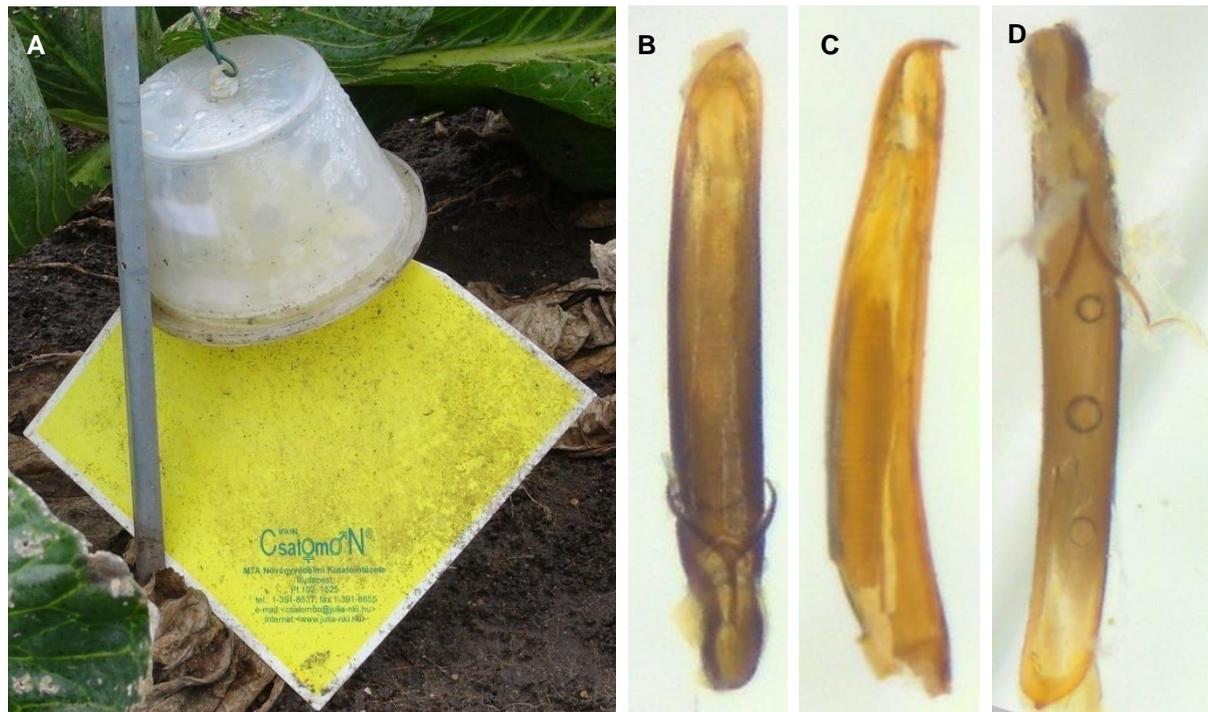


Abbildung 84: Hut-Falle mit einem Aggregationspheromon von Csalomon (Ungern) (A) zur Erfassung von Erdflöh spp. sowie präparierte Aedoeagus von *P. atra* (B); *P. undulata* (C) und *P. cruciferae* (D)

Tabelle 77: Im Jahr 2014 und 2015 vorkommende Kohlerdflöhenarten in drei Hut-Fallen (KLP+-Fallen) mit je einem Aggregationspheromon zu einem bestimmten Termin.

Datum	<i>P. undulata</i>	<i>P. nigripes</i>	<i>P. cruciferae</i>	<i>P. nemorum</i>	<i>P. atra</i>	<i>P. orchipes</i>	<i>P. vitula</i>
07.05.2014	2,0	9,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19.05.2014	1,0	10,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26.05.2014	286,0	105,0	743,0	5,0	176,0	11,0	0,0
02.06.2014	56,0	14,0	179,0	2,0	120,0	2,0	0,0
10.06.2014	158,0	40,0	317,0	0,0	297,0	1,0	1,0
16.06.2014	69,0	38,0	278,0	1,0	141,0	2,0	1,0
23.06.2014	35,0	43,0	131,0	6,0	118,0	2,0	0,0
30.06.2014	42,0	11,0	136,0	5,0	67,0	3,0	0,0
07.07.2014	82,0	6,0	77,0	12,0	89,0	6,0	0,0
14.07.2014	156,0	0,0	55,0	32,0	53,0	3,0	0,0
21.07.2014	131,0	1,0	20,0	18,0	40,0	1,0	0,0
28.07.2014	253,0	3,0	150,0	15,0	43,0	0,0	0,0
04.08.2014	83,0	6,0	130,0	12,0	35,0	0,0	0,0
11.08.2014	104,0	1,0	74,0	21,0	23,0	3,0	0,0
18.08.2014	37,0	0,0	51,0	4,0	12,0	0,0	0,0
25.08.2014	14,0	0,0	21,0	0,0	14,0	0,0	0,0
01.09.2014	23,0	2,0	10,0	0,0	13,0	0,0	0,0
08.09.2014	10,0	5,0	5,0	0,0	13,0	0,0	0,0
15.09.2014	5,0	3,0	4,0	0,0	8,0	0,0	0,0
22.09.2014	65,0	0,0	1,0	0,0	3,0	0,0	0,0
29.09.2014	21,0	0,0	3,0	0,0	2,0	0,0	0,0
06.10.2014	10,0	0,0	2,0	0,0	1,0	0,0	0,0
13.10.2014	17,0	0,0	2,0	3,0	2,0	0,0	0,0
20.10.2014	18,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0
27.10.2014	18,0	0,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
03.10.2014	26,0	2,0	1,0	2,0	0,0	0,0	0,0
15.05.2015	0	0	0	1	1	0	0
18.05.2015	1	0	0	0	0	0	0
21.05.2015	2	1	2	2	2	0	1
26.05.2015	39	2	4	0	10	0	1
01.06.2015	20	0	4	0	5	0	0
08.06.2015	38	10	16	0	21	0	2
15.06.2015	59	7	38	0	53	4	0
22.06.2015	8	3	16	0	15	0	0
29.06.2015	33	1	63	0	38	0	0
06.07.2015	105	1	106	2	117	0	11

13.07.2015	116	1	177	0	53	4	25
20.07.2015	279	3	186	2	76	1	114
27.07.2015	414	15	149	0	66	3	334
03.08.2015	181	17	76	2	18	2	97
10.08.2015	292	238	500	6	81	0	87
17.08.2015	250	196	1593	0	185	0	6
22.08.2015	305	98	699	0	80	0	2
31.08.2015	565	140	1202	0	239	0	6
07.09.2015	94	16	171	0	56	0	0
14.09.2015	19	0	71	0	9	0	0
21.09.2015	9	5	39	0	9	0	0
28.09.2015	14	0	51	0	4	0	0
03.10.2015	13	3	13	0	9	0	0
12.10.2015	4	1	12	0	14	0	0
19.10.2015	2	0	9	0	7	0	0

Tabelle 78: Anteil an vorkommenden Kohlerdfloharten

Jahr	<i>P. undulata</i>	<i>P. nigripes</i>	<i>P. cruciferae</i>	<i>P. nemorum</i>	<i>P. atra</i>	<i>P. orchipes</i>	<i>P. vitula</i>
2014	29	5	40	2	21	0,6	0,1
2015	26	7	48	0,1	11	0,1	6

8. Danksagung

Im Rahmen des Promotionsvorhabens habe ich vielseitige Unterstützung erfahren, wofür ich mich hiermit bedanken möchte:

Prof. Dr. Poehling danke ich herzlich für die Möglichkeit der Promotion in der Abteilung Phytomedizin, die Übernahme des Referats, fachliche Beratungen sowie für Unterstützung in den schwierigen Zeiten!

Dr. Martin Hommes danke ich für die Überlassung des Themas sowie die Betreuung meiner Promotion am JKI im Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst!

Apl. Prof. Dr. Meyhöfer sowie apl. Prof. Dr. Winkelmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bzw. des Korreferats und kritische Fragen zwischendurch!

Prof. Dr. Rückelhausen sowie seinem Team, Dr. Pflanz, Dr. Bauriegel und iotec GmbH danke ich für Bereitstellung der optoelektronischen Systeme und bei der Beratung zur Auswertung der Spektralinformation.

Mein Großer Dank gilt den Kollegen*Innen des Instituts für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, die meine Zeit im Institut zu was besonderem machten und die mich während meiner Promotionszeit tatkräftig unterstützt haben: Sabine Schamlott, Tina Drechsler, Elke Jeworutzki, Ales Dolezal, Dieter Gebelein, Achim Schröter, Kirsten Strauss, Margot Knur, Dr. Stefan Wagner, Dr. Ellen Richter Dr. Ute Vogler und Anna Köneke.

Aus dem Institut für Pflanzenschutz im Ackerbau und Grünland des JKI möchte ich mich bei Dr. Udo Heimbach, Dr. Meike Brandes und Ulrike Busch bedanken für die Sparziergänge am Teich, aufmunternde Worte und Korrektur lesen.

Dr. Schaarschmidt und Dr. Gabriel möchte ich danken, dass sie immer für mich Zeit hatten, wenn ich bei statistischen Auswertungen nicht weiterwusste.

Mein Großer Dank geht auch an meine Kollegen*innen aus dem Sachgebiet Pflanzenschutz in Obst und Gemüsebau des Pflanzenschutzamtes der Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Insbesondere Ulrike Weier!

Desweiteren möchte ich mich bei meinen Freundinnen (Kathrin und Marianne) bedanken, die mich in schwierigen Zeiten unterstützt haben.

Bei den Doktoranden aus der WeGa-Phd und den Nachwuchswissenschaftlern des JKI sowie des DPG bedanke ich mich für die schöne gemeinsame Zeit!

Diese Dissertation wurde im Rahmen des Agroclusters WeGa, des Verbundprojekts "Sicherheit durch nachhaltigen Pflanzenschutz" und "Freilandgemüse am Beispiel Brassica" erstellt. Die finanzielle Förderung erfolgte durch das BMBF.

9. Lebenslauf

Name Nelli Rempe-Vespermann
 Geburtsdatum 01.03.1981
 Geburtsort Krasnojarsk/ Russland

Promotionsvorhaben

seit 04/2013 Promotion im Institut für gartenbauliche Produktionssysteme in der Abteilung Phytomedizin, an der Leibniz Universität Hannover, Deutschland

- Promotionsthema: Automatisierte Erfassung von Kohlschädlingen als Basis für Interventionsmaßnahmen
- Durchführung: am Julius Kühn-Institut im Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, Braunschweig, Deutschland

Berufserfahrung

06/2022- Leiterin des Sachgebietes Gemüse- und Obstbau im Pflanzenschutzamt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Hannover, Deutschland

09/2016-11/2021 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am JKI in der Arbeitsgruppe Gemüsebau, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, Braunschweig, Deutschland

- Projekt "Entwicklung von integrierten Bekämpfungsverfahren gegen Minierfliegen an Freilandgemüseulturen"

06/2015-04/2016 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am JKI in der Arbeitsgruppe Entomologie und Nematologie, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Braunschweig, Deutschland

- Projekt "Entwicklung einer nachhaltigen Bekämpfung von Rapsschädlingen"

04/2012-06/2015 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am JKI, Institut für Pflanzenschutz in Gartenbau und Forst, Braunschweig, Deutschland

- Projekt „Schaderregerprognose mit Vorhersagemodellen bei Kohlgemüse“

Bildungsweg

10/2008-09/2011 Leibniz Universität Hannover, MSc. in Gartenbauwissenschaften, Hannover, Deutschland

- Schwerpunkt: Pflanzenkrankheiten
- Masterarbeit Thema: „Histologische Untersuchungen zum Vorkommen und den Ursachen von Verbräunungen an Spargelstangen“ in Kooperation mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen

10/2004-10/2008 Leibniz Universität Hannover, BSc. im Studiengang Gartenbauwissenschaften, Hannover, Deutschland

- Schwerpunkt: Pflanzenkrankheiten
- Bachelorarbeit Thema: „Zum Einfluss des Lagerungsprozesses auf die äußere Qualität von Spargel“ in Kooperation mit der Landwirtschaftskammer Niedersachsen

08/1995-06/2002 KGS-Ronnenberg, Hannover, Deutschland (Abschluss: Abitur)

10. Veröffentlichungen

Publikationen

Rempe-Vespermann, N. (2016): 60. Deutsche Pflanzenschutztagung in Halle/Saale: Interview mit JKI Präsident und Professor Dr. Georg F. Backhaus, Phytomedizin - 46. Jahrgang - Nr. 3 - 2016

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M.; Poehling, H.-M. (2016): Automatical detection of insect pests in cole crops (*Brassica oleracea*). (DGG-Proceedings (6), DOI: 10.5288/dgg-pr-06-12-nv-2016)

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M.; Peil, A.; Szentgyörgyi, E.; Vogt, I.; Ulrich, D.; Hanke, M. -V.; Dierend, W.; Werres, S.; Junker, C.; Ordon, F.; Zetsche, H. (2016): WeGa-Schlussbericht AP 1.2 Schorfresistenz durch markergestützte Selektion auf Vf-Resistenz bei *Malus* : AP 2.4 - Prävention von Latenzschäden - Ursachen bei *Rhododendron* : AP 4.1: Vernalisationseffekte - Alleldiversität bei *Brassica* : AP 4.12 (1.6) (vor und nach der Umstrukturierung): Schaderregerprognose mit Vorhersagemodellen bei *Brassica* : WeGa-Schlussbericht : Laufzeit des Vorhabens: AP 1.2: 01.03.2011-31.10.2013, AP 2.4: 01.07.2011-20.06.2014, AP 4.1: (01.09.2011) 01.03.2013-31.07.2014, AP 4.12 (1.6): 01.01.2011-31.07.2015

Gulidov, S.; Rempe-Vespermann, N.; Poehling, H.-M. (2016): Use of entomopathogenic nematodes and UV-reflecting mulches to control the cabbage fly *Delia radicum* L. on turnip cabbage. (under review, DGG Proceedings)

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M.; Ruckelshausen, A.; Mentrup, D. (2014): Digital monitoring methods for cabbage pests, IOBC-WPRS Bulletin (107): 125-129, Working Group "Integrated protection in Field Vegetables"

Rempe-Vespermann, N.; Grunewaldt-Stöcker, G.; von Alten, H. (2014): Histological characterization of browning and glassiness - quality deficiencies of white asparagus spears (*Asparagus officinalis*), Journal of Plant Diseases and Protection 121 (6): 250-259

Buchbeiträge/ Beiträge zu Sammelwerken

Rempe-Vespermann, N.; Vogler, U. K. (2021): Untersuchungen zur Biologie der Möhrenminierfliege. In: JKI (Hrsg.): 62. Deutsche Pflanzenschutztagung: 21. - 23. September 2021, digital; Kurzfassungen der Beiträge (Julius-Kühn-Archiv 467), Quedlinburg, 169-170.

Rempe-Vespermann, N.; Ibrahimi, N.; Vogler, U. K. (2021): Untersuchungen zur Biologie und Kontrolle der Lauchminierfliege. In: JKI (Hrsg.): 62. Deutsche Pflanzenschutztagung: 21. - 23. September 2021, digital; Kurzfassungen der Beiträge (Julius-Kühn-Archiv 467), Quedlinburg, 169-170.

Rempe-Vespermann, N.; Poehling, H.-M.; Hommes, M. (2016): Erprobung digitaler Techniken zur Erfassung von Schadinsekten in Gemüsekohl (*Brassica oleracea*) In: JKI (Hrsg.): 60. Deutsche Pflanzenschutztagung: 20. - 23. September 2016, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Kurzfassungen der Beiträge (Julius-Kühn-Archiv 454),

Quedlinburg, 228-229.

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M. (2016): Digital pests monitoring in cole crops (*Brassica oleracea*): IOBC Working Group "Integrated Protection in Field Vegetables": 04 - 07 October 2016, at Pflanzenschutzdienst, Hamburg; In Meadow R. (ads.): Working Group "Integrated Protection in Field Vegetables" IOBC-WPRS Bulletin Vol. 118, 4-5

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M.; Ruckelshausen, A.; Mentrup, D. (2015): Digital pests monitoring in cole crops (*Brassica oleracea*) In. IAPPS, DPG, JKI, IVA (Hrsg.): XVIII. International Plant Protection Congress: 24. - 27. August 2015, the Henry Ford Building, Berlin; book of abstracts, 162.

Hommes, M.; Rempe-Vespermann, N. (2015): Decision Support Systems for German Vegetable Growers. In: Sirca, S.; Geric Stare, B.; Razinger, J. (eds.): Plant health for sustainable agriculture: conference, 11 - 12 May 2015, Ljubliana, Slovenia; book of abstracts, 35.

Rempe-Vespermann, N.; Hommes, M.; Ruckelshausen, A.; Mentrup, D. (2014): Automatische Überwachung von Kohlschädlingen. In: JKI (Hrsg.): 59. Deutsche Pflanzenschutztagung : 23.-26. September 2014, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Kurzfassungen der Beiträge (Julius-Kühn-Archiv 447), Quedlinburg, 268.