
Sensorbasiertes Monitoring und Entscheidungshilfe für den integrierten Pflanzenschutz in Gewächshauskulturen (IPMaide) - Teilprojekt 1

Zuwendungsempfänger:

Julius Kühn-Institut

Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen

Erwin-Baur-Str. 27

06484 Quedlinburg

Deutschland

Geschäftszeichen:

321-06.01-28-1-85.06A-18

Förderkennzeichen:

2818506A18

Berichtszeitraum:

15.11.2019 bis 31.12.2023

Laufzeit des Vorhabens:

15.11.2019 bis 31.12.2023

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	3
I.1 Aufgabenstellung	3
I.2 Voraussetzungen	3
I.3 Ablauf des Vorhabens	3
I.4 Wesentliche Ergebnisse	4
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
II. Eingehende Darstellung.....	5
II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	5
II.1.1 AP1 Anforderungsprofil sowie Daten- und Modellintegration über Schnittstellen.....	5
II.1.2 AP3 Schaderregererfassung mit akustischen Sensoren	6
II.1.3 AP3.2: Schaderregererfassung mit akustischen Sensoren in Vertical Farm Systemen .	10
II.1.4 AP4 Schaderregererfassung mit bildgebenden spektrometrischen Verfahren	10
II.1.5 AP4.2: Konzeptentwicklung zur Anwendbarkeit von Hyperspektralkameras im VF.....	13
II.1.6 AP 7 Koordination, Praxiseinsatz und Wirkmessungen.....	13
II.1.7 AP7.2: Koordination, Praxiseinsatz und Wirkmessungen	14
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	14
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	15
II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse	16
II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	16
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	17

I. Kurze Darstellung

I.1 Aufgabenstellung

Zielsetzung des Gesamtprojektes war die Entwicklung eines Assistenzsystems in Form einer App zur Entscheidungsunterstützung im PS im Gewächshaus. Automatisiertes Schädlingsmonitoring, das Einbinden von Datenbanken und das intelligente Verknüpfen von Informationen sollten zur Reduktion des PSM-Einsatzes und der Verbesserung des Anwenderschutzes beizutragen. In einer halbjährigen Projekterweiterung wurde darüber hinaus die Übertragbarkeit der erarbeiteten Ansätze auf zukünftige Anwendung in Vertical Farming (VF) Anlagen untersucht. Am JKI wurden dazu im Wesentlichen die Arbeitspakete bearbeitet, die sich mit der Schaderregererfassung mit akustischen Sensoren und mit bildgebenden spektrometrischen Verfahren befassen.

I.2 Voraussetzungen

Voraussetzung für die Arbeiten zur akustischen Insektenerkennung waren Erfolge in der akustischen Schädlingserkennung im Vorratsschutz (Mueller-Blenkle et al. 2018). Voraussetzung für die Arbeiten mit bildgebenden spektrometrischen Verfahren war das Projekt SmartIPM, in dem erfolgreich gezeigt werden konnte, dass durch spektrale Messungen (Pfaff et al. 2020), sowie auch visuell in einer hyperspektralen Messung, Unterschiede im Gesundheitszustand von Pflanzen durch pathogenen Befall sichtbar gemacht werden konnten (Pfaff, unveröffentlichte Daten). Voraussetzung für die Aussicht auf die erfolgreiche Verarbeitung der hochkomplexen Daten in beiden Arbeitspaketen, waren die Erfolge auf dem Gebiet des Machine Learning (Goodfellow et al. 2016).

I.3 Ablauf des Vorhabens

Für die akustischen Messungen wurde geeignete Messtechnik ausgewählt und eine schall- und halldämmende Box entwickelt. Innerhalb dieser Box wurden Insektenzuchtkäfige mit jeweils mehreren Individuen einer Insektenart vor den Mikrofonen positioniert. Alle Aufnahmen erfolgten simultan mit einem Messtechnik-Mikrofonarray und einem Low-Cost Mikrofonarray. Durch Vermischen der Laboraufnahmen mit Hintergrundgeräuschaufnahmen aus einem Gewächshaus konnten Gewächshausbedingungen simuliert werden. Die Datensätze wurden zum Training verschiedener Deep Learning Modelle verwendet. Durch die Aufnahme von Hintergrundgeräuschen in einer VF-Anlage, konnten auch hier die Hintergrundbedingungen simuliert werden.

Für die Schaderregererfassung mit bildgebenden Verfahren wurden hyperspektrale Bilddatensätze von Einzelblättern und Einzelpflanzen von Paprika und Tomatenpflanzen erstellt. Die Aufnahmen wurden in einer lichtabgeschlossenen Box mit einheitlichem

Hintergrund durchgeführt. Die Pflanzen wurden einzeln in Netzkäfigen angezogen und entweder als Kontrolle ohne Infektion belassen oder im Fall von Tomate mit Tomatenrostmilbe oder mit Gewächshaus-Weiße Fliege beimpft. Bei Paprika erfolgte die Beimpfung entweder mit der Grünen Pfirsichblattlaus oder dem Kalifornischen Blütenthrips. Auf Basis dieser Bilddatensätze wurden KI-Modelle zur Unterscheidung von drei Klassen trainiert. Hierfür wurden je Kultur zwei verschiedenen Schädlinge und eine schädlingsfreie Kontrolle verwendet. Zusätzlich wurde eine mobile Trägerplattform aufgebaut, mit der hyperspektrale Aufnahmen eines, zuvor bereichsweise kontrolliert mit den Schädlingen innokulierten, Pflanzenbestandes im Gewächshaus gemacht werden konnten. Bezüglich der Nutzung dieser Methode in einer VF-Anlage wurde ein theoretisches Konzept ausgearbeitet.

I.4 Wesentliche Ergebnisse

Es konnte ein akustischer Datensatz (1000 Stunden, 12 verschiedenen Schad- und Nutzinsekten) erstellt und veröffentlicht werden. Die entwickelten KI-Modelle, die mit reinen Laboraufnahmen der Messmikrofone trainiert und getestet wurden, erzielten sehr gute Erkennungsgenauigkeiten. Im simulierten Gewächshaus stellt die Erkennung kleiner und leiser Insekten jedoch eine große Herausforderung dar. Generell erwiesen sich die Messmikrofone als besser geeignet, als die Low-Cost-Variante. Die Nutzung von Mikrofonarrays und die damit mögliche räumliche Filterung der Geräusche konnte den negativen Einfluss der Störgeräusche minimieren. Das Schallpegel der Hintergrundgeräusche in der VF-Anlage erwies sich als sehr viel lauter als im Gewächshaus, was die erfolgreiche Nutzung der akustischen Erkennung im VF unwahrscheinlich macht.

Bei der Schaderregererfassung mit bildgebenden Verfahren konnte bei kontrollierten Licht- und Hintergrundbedingungen hohe Erkennungsgenauigkeiten erzielt werden. Diese waren bei den Einzelblättern am höchsten, aber auch eine Übertragung auf Einzelpflanzen unter kontrollierten Bedingungen erzielte noch aussagekräftige Ergebnisse. Ein direkter Übertrag der entwickelten Algorithmen auf die Auswertung, der mit der mobilen Messplattform unter praxisnahen Bedingungen erstellten Daten, war jedoch nicht erfolgreich, so dass weiterer Forschungsbedarf besteht. Die VF-Konzeptentwicklung konnte Potential zur Integration hyperspektraler Schädlingserkennung aufzeigen, da die Bedingungen in VF-Anlagen günstig sind (einheitliche Hintergründe und Pflanzenaufbau, kleine Pflanzen).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die externen Aufträge zur Auswertung der hyperspektralen Daten wurden an die Firma Wolution GmbH vergeben. Diese arbeitete außerdem mit dem Projektpartner GID zusammen um ein Übergabeprotokoll für die ausgewerteten Hyperspektraldaten an die IPMaide WebApp zu etablieren.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

II.1.1 AP1 Anforderungsprofil sowie Daten- und Modellintegration über Schnittstellen

Als Grundlage für die Zusammenarbeit innerhalb des Projektes wurde zunächst mit allen Projektbeteiligten die Gliederung der Datenstruktur des Assistenzsystems in Form eines Input-Output-Diagramms erarbeitet. Durch den GID wurde zudem ein Wiki zur Dokumentation der Schnittstellen erstellt. Im nächsten Schritt erfolgte in Zusammenarbeit mit allen Projektbeteiligten die Erstellung einer Hierarchie der Handlungsempfehlungen mit fünf Ebenen. Die Ebenen lauten dabei wie folgend:

1. Darstellung und Visualisierung der Daten
2. Empfehlung zum Handeln (Alarmer)
3. Vorschlägen geeigneter Maßnahmen
4. Ranking geeigneter Maßnahmen
5. Ausgabe von quantitativen Empfehlungen (Aufwandmenge, wie viele Nützlinge, Anwendungshäufigkeit)

Darauf aufbauend wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern eine Mindmap entwickelt, welche jeder dieser Ebenen den für deren Umsetzung in der IPMaide App notwendigen Input und den daraus zu generierenden Output zuordnet. Auf Basis dieser Mindmap wurde die Zielsetzung für die Umsetzung von Handlungsempfehlungen im Rahmen der IPMaide App diskutiert. Die Diskussion ergab das Ziel, in der IPMaide App die Ebenen 1. bis 3. und wenn möglich auch die 4. Ebene abzubilden. Eine Umsetzung von quantitativen Empfehlungen (Ebene 5) erschien, besonders vor dem Hintergrund der notwendigen Beachtung wirtschaftlicher Aspekte, im Rahmen dieses Projektes nicht darstellbar.

Im Rahmen der Datenbeschaffung begleitete das JKI Gespräche zwischen dem GID und PSInfo. Ziel der Gespräche war die Einrichtung einer maschinenlesbaren Schnittstelle seitens PSInfo, um den direkten Zugriff der IPMaide App auf die Inhalte von PSInfo zu ermöglichen. Nach mehreren Gesprächen konnte hier jedoch keine zielführende Kooperation zwischen den Projekten aufgebaut werden. Um die Integration der für die IPMaide App essenziellen Daten aus PS-Info dennoch zu ermöglichen, wurde durch die GID ein Daten-Scraper entwickelt, der die Daten von PS-Info über das Webinterface abrufen. Diese Lösung ist allerdings nur für Versuchszwecke geeignet und steht aufgrund ihrer Instabilität einer Marktreife der App im Wege. Die weiteren Aufgaben in diesem AP wurden durch den Projektpartner GID bearbeitet. An dieser Stelle sei daher auf den Abschlussbericht des GID verwiesen.

II.1.2 AP3 Schaderregererfassung mit akustischen Sensoren

Für die Untersuchung der akustischen Schaderregererkennung wurden zunächst die nötigen Insektenzuchten angelegt. Auf Basis einer Literaturrecherche wurde anschließend ein Dreipunkteplan zur konkreten Bearbeitung des Arbeitspaketes aufgestellt, welcher die folgenden Punkte vorsah:

1. Erstellung eines Insektengeräuschdatensatzes und Entwicklung einer dafür geeigneten Methodik.
2. Training von Deep Learning Modellen zur Unterscheidung der Insektengeräusche und Aufbau einer Umgebungsgeräuschsimulation.
3. Validierung der Simulationsergebnisse mit Aufnahmen im Versuchsgewächshaus.

Diesem Plan folgend, erfolgte zunächst der Aufbau einer akustischen Laborumgebung, mit der unter schallgeschützten Bedingungen nahezu störgeräuschfreie Aufnahmen der Insekten gemacht werden konnten. Dazu erfolgte die akustische Auslegung, der Entwurf und der Aufbau einer schall- und halldämmenden (anechoischen) Box.

Anschließend erfolgte die Beschaffung eines ersten geeigneten akustischen Sensors, sowie der notwendigen Messtechnik. Dieses Equipment wurde für erste Messungen von Insektengeräuschen unter Laborbedingungen genutzt. Diese dienten als Basis zur genaueren Definition der Anforderungen (Frequenzbereich, Schallpegel) an die finale Messtechnik. Zur Charakterisierung der Messbedingungen wurde außerdem eine experimentelle Bestimmung der Schallabsorptionsleistung der Box durchgeführt. Anschließend erfolgte der Entwurf eines geeigneten Versuchsaufbaus innerhalb der schall- und halldämmenden Box. Dazu wurden die akustischen Eigenschaften verschiedener möglicher Insektenbehälter sowie deren Handhabung im Versuchsbetrieb im Rahmen von Vorversuchen mit Insekten und künstlichen Geräuschquellen untersucht. Auf dieser Basis wurde ein Versuchsaufbau für die Aufnahme des Datensatzes innerhalb der anechoischen Box entwickelt. Als Messumgebung wurden Insektenzuchtkäfige ausgewählt. Passende rechteckige Blumentöpfe wurden aus PVC angefertigt und mit je zwei Tomatenpflanzen bepflanzt. Insgesamt wurden sechs solcher Käfige aufgebaut und mit verschiedenen Insektenzuchten bestückt.

Als finale Messtechnik für die Datensatzerstellung und die Praxisversuche wurden nach dem Test verschiedener Produkte vier hochempfindliche low-noise Mikrofone der Firma Bruel&Kjaer vom Typ 4955 sowie das notwendige Zubehör für den Betrieb ausgewählt. Um den Zielkonflikt zwischen hochwertigen aber auch kostengünstigen Geräten aufzulösen, wurden alle Aufnahmen im Projekt zusätzlich mit einem Low-Cost-Gerät, dem Seed Respeaker Core V2.0, mit insgesamt sechs kostengünstigen Mikrofonen durchgeführt. Um dieses Gerät, welches als rohe Platine vertrieben wird, im Gewächshaus einsetzen zu können, wurde ein praxistaugliches Gehäuse entworfen und als 3D-Druckteil gefertigt. Ebenso wurde

für die Messmikrofone eine geeignete Halterung entworfen und als 3D-Druckteil gefertigt. In umfangreichen Vorversuchen wurden anschließend die optimalen Einstellungen der einzelnen Komponenten der Messmikrofon-Messkette ermittelt.

Mit Hilfe des so entwickelten Messaufbaus in der anechoischen Box konnte im Folgenden mit dem Messmikrofon-Array und parallel dazu mit dem Respeaker ein umfassender Datensatz von insgesamt über 1000 Stunden akustischer Aufnahmen höchster Qualität erstellt werden. Die Aufnahmen erfolgten dabei über Nacht, um den Einfluss von Störgeräuschen auf die Aufnahmen zu minimieren. Dabei wurden folgende Insekten jeweils mehrere Nächte lang aufgenommen:

- Tomatenminiermotte (*Tuta Absoluta*)
- Weiße Fliege (*Trialeurodes vaporariorum*)
- Grüne Pfirsichblattlaus (*Myzus persicae*)
- Trauermücken (*Bradysia difformis*)
- Erdhummel (*Bombus terrestris*)
- Marmorierte Baumwanze (*Halyomorpha halys*)
- Graue Gartenwanze (*Rhaphigaster nebulosa*)
- Grüne Reisswanze (*Nezara viridula*)
- Grüne Stinkwanze (*Palomena prasina*)
- Siebenpunkt-Marienkäfer (*Coccinella septempunctata*)
- Schwebfliege (*Episyrphus balteatus*)
- Gallmücke (*Aphidoletes aphidimyza*)

Gegenüber der ursprünglichen Planung wurde hier auf die Aufnahme von Thrips verzichtet, da die Aufnahme jeglicher Geräusche dieser sehr kleinen Insekten, selbst mit den verwendeten Messmikrofonen in der anechoischen Box, in Vorversuchen nicht erfolgreich war. Ebenso wurde auf die Aufnahme von Minierfliegen verzichtet. Wenn auch technisch möglich, wurde aufgrund der geringen gartenbaulichen Relevanz auf den Aufbau einer Zucht dieser Schadinsekten verzichtet.

Aus den Messmikrofonaufnahmen in der Box konnten mit Hilfe eines eigens entwickelten Python-Programms über 165.000 Beispiele mit einer Dauer von jeweils 2,5 Sekunden für Geräusche der einzelnen Insekten extrahiert werden. Aus den Respeakeraufnahmen aus der Box ließen sich über 13.000 solcher Soundbeispiele extrahieren. Die so erzeugten Datensätze wurden anschließend zum Training verschiedener Deep Learning Modelle verwendet. Die Modelle zeigten dabei sehr gute Erkennungsgenauigkeiten der Insektengeräusche aus dem akustischen Labor, aufgenommen mit den Messmikrofonen. Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Insekten sich nicht nur an ihren Fluggeräuschen unterscheiden lassen, was dem Stand der Wissenschaft entspricht. Viel mehr konnte auch gezeigt werden, dass auch leisere

Geräusche, wie etwa Putz- oder Laufgeräusche in entsprechend leiser Umgebung zur Erkennung der Insekten ausreichen (Branding et al. 2023).

Um darauf aufbauend durch das Vermischen von Aufnahmen praxisnahe Bedingungen simulieren zu können, wurden mit beiden Mikrofonen Hintergrundgeräusche in einem Versuchsgewächshaus auf dem Gelände des JKI aufgenommen. Mit Hilfe der Hintergrundgeräusche wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, in der verschiedene Deep Learning Modelle bei verschiedenen Niveaus von Umgebungslärm trainiert und getestet werden konnten. In der Simulationsumgebung konnte ein Modell entwickelt werden, das die Signale aller vier Messmikrofone nutzen kann, um die Insektengeräusche räumlich aus dem Lärm herauszufiltern. Dadurch konnte die Erkennungsgenauigkeit gegenüber herkömmlichen Modellen verbessert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass ein Großteil der im Labor mit den Messmikrofonen aufgenommenen Geräusche zu leise ist, um diese unter den simulierten Gewächshausbedingungen zu erkennen. Laute Insektengeräusche, wie etwa das Fluggeräusch der Hummel, können aber auch im Gewächshaus sicher erkannt werden.

Der Vergleich des Low-Cost Mikrofon-Arrays „Respeaker“ mit der hochwertigen Messtechnik zeigte sehr deutliche Auswirkungen auf die möglichen Aufnahmen und deren Auswertung. Bereits der deutlich kleinere Umfang des Respeaker-Datensatzes zeigt den drastischen Einfluss einer geringeren Mikrofonempfindlichkeit und eines höheren Eigenrauschpegels auf die Schwierigkeiten die Insektengeräusche überhaupt erfassen zu können. Die mit dem Respeaker aufgenommenen Geräusche lassen sich in der Regel allerdings leicht klassifizieren, da der Respeaker leise Geräusche, die in der Umgebungsgeräuschsimulation dann vom Lärm verschluckt werden, gar nicht erst aufnimmt. Problematisch ist hier nur, dass die sehr geringe Anzahl der Geräuschbeispiele im Respeakerdatensatz das erfolgreiche Training der Erkennung leiser Insekten verhindert. Im Rahmen des Vergleichs der zwei Mikrofon-Arrays und der damit erstellten Datensätze wurde außerdem die Nutzung des größeren, höherwertigeren Messmikrofon-Datensatzes zur Verbesserung eines Modells, welches die Respeaker-Daten verarbeitet, untersucht. Auch wenn erste Ergebnisse hier die erhofften Effekte nur vermuten lassen, bleibt ein solcher Transferlearning-Ansatz, bei dem die Entwicklung von guten Modellen, die auf kostengünstiger Hardware operieren und durch das Training mit hochwertigen Labordaten aus der Forschung unterstützt wird, ein vielversprechendes Konzept für die Zukunft (Branding et al. 2024).

Um die im Arbeitspaket vorgesehene Bestimmung der Reichweite der akustischen Sensoren durchzuführen, wurde zunächst eine Methode zur Messung des Fluggeräuschpegels unterschiedlicher Insekten entwickelt. Diese sah vor, dass die Insekten in definiertem Abstand vor dem Mikrofon innerhalb der geschlossenen anechoischen Box an einem Pferdehaar fixiert wurden. Durch das elektrische Absenken eines Podestes, auf dem die Insekten in der

Ausgangsposition saßen, sollte der Flugreiz ausgelöst werden. In den durchgeführten Versuchen erwies sich dieser Versuchsaufbau allerdings als ungeeignet. Das korrekte Fixieren der Insekten bei uneingeschränkter Flugfähigkeit erwies sich besonders bei kleineren Insekten als sehr schwierig. Zudem konnte der Flugreiz durch das Absenken des Podestes nicht zuverlässig ausgelöst werden. Die Auswertung der wenigen brauchbaren Messdaten erwies sich auf Grund des Einflusses von Störgeräuschen als sehr ungenau.

Die Experimente in der Umgebungsgeräuschsimulation zeigten, dass der Einfluss der Störgeräusche (Pegel und Frequenzbereich) auf die Detektierbarkeit der Geräusche so immens ist, dass eine Abschätzung der praktischen Reichweite der Sensoren in einem echten Gewächshaus ohnehin nur sehr grob möglich ist. Weitere Tastversuche zur Obergrenze der Reichweite zeigten unter anderem, dass der Flug einer Erdhummel (*Bombus terrestris*) auch noch in über 7 m Entfernung in einem leisen Bürogebäude deutlich für Menschen und Mikrofone zu hören ist. Die Auswertung der Laboraufnahmen zeigte auf der anderen Seite, dass die Fluggeräusche der Blattlausgallmücke (*Aphidoletis aphidimyza*) teilweise nicht einmal von allen 4 Mikrofonen des Messmikrofonarrays mit einem Mikrofonabstand von maximal 95,2 mm erfasst werden konnten.

Ein weiterer Versuch zur Abschätzung des in der Praxis nötigen Schallpegels zur erfolgreichen Erkennung eines Insektengeräusches durch die untersuchten KI-Modelle wurde unternommen, indem der Schallpegel der korrekt und der falsch klassifizierten Testsamples in der Umgebungsgeräuschsimulation gegenübergestellt wurden. Dabei zeigten sich zunächst für jedes untersuchte Insekt individuelle Grenzwerte. Die Auswertung eines simpleren, binären Klassifikationsmodells, das mit dem Ziel trainiert wurde lediglich Insektengeräusche von Umgebungslärm zu unterscheiden, ohne dabei das Insekt konkret zu benennen, zeigte einen Grenzwert von ca. 30 dB. Oberhalb dieses Grenzwertes wurden fast alle Geräusche auch im simulierten Gewächshaus korrekt erkannt. Unterhalb des Grenzwertes wurde die Unterscheidung zunehmend unsicherer. Ein Absenken des simulierten Lärmpegels, senkte entsprechend auch diesen Grenzwert.

Um schlussendlich die Simulationsergebnisse zur Insektengeräuscherkennung validieren zu können, wurden Aufnahmen einiger Insekten in verschiedenen Versuchsaufbauten im Versuchsgewächshaus durchgeführt. Zur Auswertung dieser Aufnahmen wurde ein zweistufiges Modell entwickelt. Im ersten Schritt dieses praxisnahen Modells wird lediglich zwischen Insektengeräuschen und Hintergrundgeräuschen unterschieden. Erkennt das Modell ein Insektengeräusch, wird dies erst in einem zweiten Schritt von einem zweiten Modell genauer als eines der trainierten Insekten klassifiziert. Eine detaillierte Auswertung und Validierung des entwickelten Modells mit den Aufnahmen aus dem Gewächshaus konnte im Projekt jedoch aus zeitlichen Gründen nicht mehr erfolgen, da die komplexe Entwicklung der

nötigen Modelle in der Umgebungsgeräuschsimulation deutlich mehr Zeit in Anspruch nahm als erwartet.

II.1.3 AP3.2: Schaderregererfassung mit akustischen Sensoren in Vertical Farm Systemen

Im Rahmen der Vertical Farming (VF) Projekterweiterung konnten drei VF Anlagen in Deutschland (OrbiPlant, Fraunhofer), Niederlande (Brightbox) und Dänemark (Nordic Harvest) besichtigt werden. Die Anlagen in Deutschland und den Niederlanden sind dabei als Forschungsanlagen einzuordnen, so dass deren Geräuschkulissen nicht repräsentativ für die akustischen Anforderungen an ein Detektionssystem im Einsatz in einer VF Anlage im Produktionsbetrieb einzuordnen ist. In der für den Markt produzierenden Anlage in Dänemark konnten jedoch Aufnahmen realistischer Hintergrundgeräusche gemacht werden. Bereits der subjektive Höreindruck ließ einen deutlich höheren Lärmpegel als bei den Hintergrundgeräuschaufnahmen im Gewächshaus erkennen. Dies wurde durch die Datenauswertung von Testaufnahmen in der VF-Anlage bestätigt. Vergleichende Versuche bei denen Deep Learning Modelle für die Insektenerkennung unter simulierten Gewächshaus- und VF-Bedingungen trainiert wurden zeigten, dass eine Erkennung von Insektengeräuschen in der Anlage in Dänemark wenig Erfolgsaussichten hat. Bereits bei einer Beimischung von Hintergrundgeräuschen mit nur 10% des tatsächlich in der VF-Anlage aufgenommenen Pegels zu den Insektengeräuschaufnahmen konnten die Modelle keine Insektengeräusche mehr korrekt zuordnen. Die Geräusche von Lüftern zur Klimasteuerung und Pumpen für die Hydro- oder Aeroponiksysteme in einer VF-Anlage sorgen für ein deutlich höheres konstantes Hintergrundgeräuschniveau. Ob die Nutzung akustischer Systeme zur Insektenerkennung in Zukunft in VF-Anlagen möglich sein wird, hängt daher maßgeblich von dem Lärmpegel der in solchen Anlagen verbauten Technik ab. Dieser ist im Rahmen des Projekts nicht vorherzusagen. Eine gezielte Entwicklung leiser VF-Anlagen Technik ist allerdings als unwahrscheinlich zu betrachten.

II.1.4 AP4 Schaderregererfassung mit bildgebenden spektrometrischen Verfahren

Die erarbeiteten Methoden des AP4 innerhalb dieses Projekts bilden die Grundlage, um hyperspektrale Bildgebung zur frühen Erkennung von Schadsymptomen an Gemüsekulturen zu nutzen. Eine frühe Erkennung von Pflanzenschäden kann wirtschaftlich relevante Maßnahmen ermöglichen, wie beispielsweise gezielte lokale Applikation von Pflanzenschutzmitteln oder den frühzeitigen Nützlingseinsatz. Schadarthropoden wie etwa Tomatenrostmilben sind mit bloßem Auge nicht zu erkennen und werden in der Praxis aktuell meist erst durch die zeitlich verzögert sichtbaren Schäden im Anbau erkannt.

Ein grundlegender Teil des Arbeitspaketes bestand in der Erhebung von Daten zur Erstellung spektrometrischer Profile verschiedener Schadarthropoden. Diese Daten hyperspektraler Bilddateien wurden von Versuchspflanzen aufgenommen, die entweder gezielt mit Schädlingen infiziert wurden oder als Kontrollpflanzen ohne Schädlingsbesatz, in Netzkäfigen angezogen wurden. Der verwendete Messaufbau war der „PhenoScan“-Messstand, der von JKI Institut RS für das Projekt zur Verfügung gestellt wurde. Der vom Fraunhofer Institut entwickelte PhenoScan beinhaltet zwei Hyperspektral-Kameras des Herstellers „HySpex by Neo“ aus Norwegen, die in einem lichtundurchlässigen Gehäuse mit definierter Beleuchtung eingebaut sind. Diese Kameras sind in der Lage das Reflexionsspektrum im Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 Nanometer zu erfassen. Die Messfunktionsweise basiert darauf, dass die Kameras mittels eines Linearmotors über ein zu messendes Objekt gefahren werden, um in einem definierten Abstand über eine definierte Länge eine Zeilenaufnahme zu erzeugen. Diese Zeilenaufnahme enthält in Nanometerschritten von 3 bis 5 nm in jedem aufgezeichneten Pixel die Informationen für das genannte Reflexionsspektrum. Für die Aufgaben des AP4 wurde der PhenoScan benutzt, um Hyperspektralbilder von gesunden Kontrollpflanzen sowie mit Schädlingen inokulierten Tomaten- und Paprikapflanzen zu erzeugen. Für die ersten Versuche wurde sich für die Kultur Paprika entschieden, da diese glatte Pflanzenblätter mit großer Oberfläche besitzt, an denen Schadsymptome zu erkennen sind und die ebenfalls gut für Messungen präpariert werden können.

Die Versuchspflanzen wurden im Versuchsbetrieb des Julius-Kühn-Institutes angezogen. Im Rahmen der geplanten Versuche wurden die Pflanzen in geschlossenen Netzkäfigen isoliert kultiviert, um sie vor Fremdbefall zu schützen. Nach einer gewissen Wachstumszeit wurden die Pflanzen gezielt mit den zu untersuchenden Schädlingen innerhalb der Käfige beimpft. Nach zwei Wochen Inkubationszeit wurden die Pflanzen aus den Käfigen herausgenommen und zunächst optisch auf Befall und Schaden bonitiert. Anschließend wurden Aufnahmen mit dem PhenoScan aufgenommen. Dafür wurde zuerst die gesamte Pflanze liegend und danach die einzelnen Blätter der Pflanze zuerst von der Oberseite und dann von der Unterseite in je einer Zeilenaufnahme abgebildet. So konnten Bilder von mehr als 800 Blättern und den zugehörigen Einzelpflanzen generiert werden. Ziel der so erzeugten Bilddaten war die Entwicklung eines „machine learning“ Algorithmus durch die Firma Wolution im Rahmen eines Unterauftrags. Die Erstellung des hyperspektralen Datensatzes wurde 2021 in Quedlinburg und 2022 in Braunschweig durchgeführt. Die zeitaufwendigen Messungen am PhenoScan wurden randomisiert und über mehrere Tage verteilt erarbeitet. Das Verfahren wurde für Paprika- und Tomatenpflanzen vergleichbar durchgeführt. Bei den Datensätzen mit kontrollierten Licht- und Hintergrundbedingungen konnten hohe Erkennungsgenauigkeiten erzielt werden. Diese waren bei den Einzelblättern am höchsten, aber auch eine Übertragung

des Modells auf Einzelpflanzen unter kontrollierten Bedingungen erzielte noch aussagekräftige Ergebnisse.

Weiterer Bestandteil des Arbeitspaketes war die Erprobung des von der Firma Wolution erstellten Auswertungsalgorithmus unter praxisnahen Bedingungen oder in Praxisbetrieben. Dafür musste eine Vorrichtung geschaffen werden, die es ermöglichte spektrale Messungen an einem Pflanzenbestand im Gewächshaus durchzuführen. Im Rahmen der Planung fiel die Wahl auf die Nutzung einer Spritzroboterplattform, die in spezialisierten Betrieben mit erdlosen Anbausystemen zum Einsatz kommt. Die Spritzroboterplattform fährt dabei auf dem Heizschienensystemen automatisch durch die Gewächshausanlage. Um diese Plattform als Träger für die Hyperspektralkamera für Zeilenaufnahmen im Gewächshausbestand nutzen zu können, wurde eine Doppelschiene konstruiert, die in den vorhandenen in Erde kultivierten Beständen des JKI ausgelegt wurde. Auf diesem Schienensystem konnte dann die Spritzroboterplattform im Versuchsgewächshaus die hyperspektrale Kamera tragen und so in einem Pflanzenbestand Messungen durchführen.

Durch Umbau des genannten Spritzroboters wurde ein mobiler hyperspektraler Messstand realisiert. Als Vorlage diente hier der bereits bestehende Messstand „PhenoScan“. Der Aufbau wurde entsprechend dieses Vorbilds ebenfalls aus Aluminiumprofilen und Verdunkelungsmaterial auf die Spritzroboter-Plattform konstruiert. Die Planung, Materialbeschaffung und Konstruktion wurden vollständig von den Projektmitarbeitern des JKI durchgeführt und der Prototyp konnte im Spätsommer 2021 erstellt und erstmals erprobt werden. Zusätzlich wurde ein Umlenkspiegel in die Konstruktion integriert, um den benötigten Abstand vom Pflanzenbestand zu den Hyperspektralkameras zu ermöglichen. Mit dem mobilen Messstand wurden in Absprache mit dem Unterauftragnehmer Wolution verschiedene Belichtungsvarianten (natürliches Umgebungslicht, Dunkelheit, mit Gewächshausbeleuchtung) sowie auch in Paprika zusätzlich verschiedene Hintergründe (Schattierpappe hinter Einzelreihe, Schattierpappe hinter der Doppelreihe, keine Schattierpappe) eingemessen. Nach jeder Messung folgte eine optische Schädlingsbonitur. So konnte je ein Bild-Datensatz für Paprika und Tomate erstellt werden, an denen der Auswertungsalgorithmus auf praxisnahen Bilder getestet werden kann. Eine direkte Übertragung der entwickelten Algorithmen auf die Auswertung der mit der mobilen Messplattform unter praxisnahen Bedingungen erstellten Daten war jedoch nicht erfolgreich. Gründe für eine bisher fehlende Korrelation der Vorhersage des Algorithmus mit den Handbonituren im Bestand wurden diskutiert. Einige Gründe sind

- 1) Probleme mit dem Aufrechterhalten befallsfreier Kontrollen im Bestand, es kam zum Einwandern von Blattläusen in die Kontrollen von Beginn an;

- 2) Veränderung der Bildauflösung durch Nutzung des mobilen Messtands, wahrscheinlich verursacht durch die fehlende Kopplung zum Linearmotor des Labormesstands;
- 3) Veränderungen von Licht, Hintergrund und Struktur der aufgenommenen Pflanzen im Vergleich zur Einzelblattaufnahme im Labor;
- 4) fehlendes Training bei Mischinfektionen im Labor, die dann im Gewächshaus unbeabsichtigt auftraten.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf um diese vielversprechende Methodik in der Praxis nutzbar zu machen.



II.1.5 AP4.2: Konzeptentwicklung zur Anwendbarkeit von Hyperspektralkameras im VF

Die Arbeiten zur Konzeptentwicklung werden in dem mitgelieferten Dokument „Concept development of using hyperspectral technology in vertical farming production system in Germany“ zusammenfassend dargestellt.

II.1.6 AP 7 Koordination, Praxiseinsatz und Wirkmessungen

Im Laufe des Projektes wurden insgesamt fünf Projekttreffen organisiert und durchgeführt. Bei den Treffen bei verschiedenen Projektpartnern (JKI Braunschweig, iotec GmbH Osnabrück, Leibniz Universität Hannover) wurden die Versuchsaufbauten der verschiedenen Projektpartner besichtigt und diskutiert.

Innerhalb des Projektzeitraums konnte keine betriebssichere Schnittstelle zu PSInfo in das Assistenzsystem implementiert werden. Da diese Schnittstelle für die Funktionalität der App

notwendig ist, konnte eine Prüfung und Bewertung des Systems nach technischen Kriterien im Praxiseinsatz nicht zielführend durchgeführt werden. Daher war es auch nicht möglich eine Bewertung nach pflanzenbaulichen Kriterien auf Ebene eines Praxisbetriebs sowie eine Betrachtung nach wirtschaftlichen Kriterien durchzuführen.

Die Erstellung der Zwischen- und des Abschlussberichtes wurde vom JKI koordiniert. Zudem erfolgte die Teilnahme an den Veranstaltungen des Vernetzungs- und Transfervorhabens HortiCo4.0. Hierfür wurden die nötigen projektinternen Absprachen sowie die Ausarbeitung von Beiträgen und deren Vorstellung durch das JKI koordiniert und durchgeführt.

II.1.7 AP7.2: Koordination, Praxiseinsatz und Wirkmessungen

Im Rahmen der VF Projekterweiterung wurde vom JKI weiter die Koordination übernommen und zwei Projekttreffen zum Vertical Farming durchgeführt. Die Betrachtungen zur Anwendbarkeit von akustischer Schaderregererkennung wurde in der Projektverlängerung durch Messungen simuliert. Das bildgebende spektrometrische Verfahren für den Einsatz in VF-Anlagen wurde während der Projektlaufzeit konzeptionell erarbeitet und bewertet. Die Ergebnisse sind bei der Darstellung der einzelnen Arbeitspakete aufgeführt. Zudem liegt dem Projektträger ein Bericht über die Besichtigungen der Anlagen in Deutschland, den Niederlanden und Dänemark vor.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Mit über 66% entfiel der Großteil der Kosten auf die Personalkosten für die zwei Wissenschaftlerstellen bei JKI-AT und JKI-G. Weitere 20% der Kosten entfielen auf die Personalkosten für technisches Personal an beiden Instituten. Weitere nennenswerte Kostenpunkte im Projekt waren vor allem die Vergabe von Aufträgen für die KI-Entwicklung zur Auswertung der hyperspektralen Bilddaten von Paprika- und Tomatenpflanzen an die Firma Wolution GmbH durch JKI-G im Rahmen des AP4. Im AP3 wurden nennenswerte Mittel besonders für die Beschaffung der vier low-noise Messmikrofone und das notwendige Messzubehör für den Betrieb verwendet. Im AP4 ist als größere Sachausgabe die Beschaffung eines gebrauchten Spritzroboters als Grundlage für den Aufbau der mobilen Messplattform zu nennen.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die zu Beginn des Projektes durchgeführte Literaturrecherche zeigte deutlich, dass die Anwendung von Deep Learning Algorithmen zur Erkennung der akustischen Fingerabdrücke der verschiedenen Insekten der sinnvollste Ansatz ist. Das Training solcher Algorithmen erfordert große Mengen an eindeutig gelabelten Daten. Nur durch die strikte Entwicklung einer geeigneten Methode zur reproduzierbaren und skalierbaren Erzeugung eines hochwertigen Datensatzes konnte eine solche hinreichende Datengrundlage geschaffen werden. Die selbst entwickelte anechoische Box und die Tonaufnahmen bei Nacht reduzierten dabei den Einfluss von Störgeräuschen, während die bewusste Auswahl aller Gegenstände innerhalb der Box den Einfluss der direkten Hallumgebung auf die Aufnahmen minimierte. Nur so konnte ein großer gelabelter Datensatz erstellt werden, in dem jeweils allen Geräuschen einer Nachtaufnahme dasselbe Label (Insektenart) zugewiesen werden konnte.

Um den gewünschten Proof of Concept erbringen zu können, war ebenfalls eine gezielte Auswahl der besten verfügbaren Messtechnik nötig. Nur so erlaubten die Versuche echte Aussagen über die Machbarkeit der akustischen Insektenerkennung, ohne Zweifel an dem Einfluss der verwendeten Messtechnik auf die Aussagen zuzulassen.

Der Aufbau der Umgebungsgeräuschsimulation, durch Vermischen der Laboraufnahmen mit Hintergrundgeräuschaufnahmen aus dem Gewächshaus, stellte folgerichtig die einzige Möglichkeit dar, sich Schrittweise an praxisnahe Bedingungen anzunähern. Darüber hinaus erwies sich die Umgebungsgeräuschsimulation als fruchtbare Entwicklungsumgebung zur Entwicklung störgeräusch-robuster Modelle. Die geleisteten Arbeiten bilden damit eine wichtige Grundlage für die zukünftige weitere Forschung und Entwicklung hin zur Praxisreife der akustischen Insektenerkennung. Durch die potentiell sehr niedrigen Hardwarekosten und die Ergebnisse dieses Projektes ist die akustische Insektenerkennung als wichtige mögliche Alternative zu optischen Verfahren zu sehen, um den Pflanzenschutz der Zukunft gezielter und effizienter zu gestalten.

Zur Erzeugung eines hyperspektralen Datensatzes, der einem automatisierten Auswertungsalgorithmus als Grundlage dient, waren die Pflanzenversuche an Paprika in den Jahren 2020 und 2021 unabdingbar. Durch die so geleisteten Arbeiten war es der Firma Wolution erst möglich Algorithmen zu erzeugen, die an hyperspektralen Bildern bestimmter Kulturen Schadsymptome ausgewählter Schädlinge erkennen können.

Der im Rahmen des Vorhabens entwickelte und erprobte Prototyp eines mobilen hyperspektralen Messsystems war zur Validierung des Auswertungsalgorithmus nötig, ebenso als Einstieg in die Praxis. Durch die Entwicklung der Algorithmen an getopferten Einzelpflanzen konnten wichtige Grundlagen für die späteren Untersuchungen in praxisnahen Beständen an

Paprika und Tomate erarbeitet werden und die Einsetzbarkeit des Algorithmus validiert werden.

Die dazu geleistete Arbeit bezüglich Konzeption, Entwicklung, Praxiseinsatz und Erprobung war angemessen und notwendig. Automatische Sensorsysteme, die Daten für digitale Assistenzsysteme liefern, eröffnen neue Möglichkeiten im geschützten Gemüseanbau. Sie können bei der Reduktion und zielgenauen Applikation von Pflanzenschutzmitteln helfen und als Grundlage für Handlungsempfehlungen für Nützlingseinsätze dienen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der im AP3 erstellte umfangreiche Geräuschdatensatz ist veröffentlicht worden und stellt somit auch über das Projektende hinaus eine wichtige, zuvor nicht dagewesene, Grundlage für die weitere Forschung auf dem Gebiet der akustischen Insektenerkennung dar. Die erzielten Ergebnisse durch das Training verschiedener Deep Learning Modelle in der Umgebungsgeräuschsimulation erbrachten zum einen den generellen Proof of Concept, konnten aber auch den weiteren Forschungsbedarf aufdecken sowie die Umgebungsgeräuschsimulation als geeignete Entwicklungsumgebung für derartige Fragestellungen einführen. Die erfolgreiche Untersuchung der Mikrofonarrays als Methode zur Minimierung des Störgeräuscheinflusses konnte dabei einen wichtigen Ansatz für zukünftige Projekte hin zur Entwicklung in Richtung Praxisreife aufzeigen. Der Vergleich der zwei Mikrofonarrays deckte den Bedarf an anwendungsspezifisch entwickelter Hardware in diesem Forschungsfeld auf.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem AP4 dienen als Grundlage für den Ausbau und die Weiterentwicklung eines praktisch verwendbaren, mobilen, hyperspektralen Messstandes. Die erstellten spektralen Datensätze zweier Gemüsekulturen bieten auch zukünftigen Untersuchungen an Paprika und Tomate eine nutzbare Datengrundlage für Machine Learning oder Deep Learning Auswertungen. Speziell für die Tomatenkultur werden diese Grundlagen in dem Folgeprojekt Emsig direkt weiter verwertet. Der Datensatz basierend auf Paprika bietet nach Veröffentlichung neben der Darstellung des Potentials der hyperspektralen Messtechnik für Schaderregererkennung in Gemüsekulturen wertvolle Ansätze für die Forschung, um nachfolgende Projekte gezielt Richtung Praxisverwendbarkeit ausrichten zu können.

II.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf dem engverwandten Gebiet der akustischen Erkennung von Vorratsschädlingen konnte in der Zwischenzeit mit einem Projekt am JKI, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz, ein weiterer Fortschritt hin zu einem praxisreifen System gemacht werden.

Im Projekt „Beetle Sound Tube“ wurde ein geeigneter Prototyp entwickelt und auf verschiedenen Praxisbetrieben erfolgreich getestet (Müller-Blenkle et al. 2023). Im Rahmen des „HumBug“ Projektes konnte 2021 ein Datensatz von verschiedenen Mückengeräuschen veröffentlicht werden und dessen Nutzen zum erfolgreichen Training von verschiedenen Machine Learning basierten akustischen Mückenerkennungs-Modellen gezeigt werden (Kiskin et al. 2021).

Mit den Datensätzen SINA (2020), InsectSet32 (2022) und InsectSet47 (2023) wurden während der Projektlaufzeit drei Insektengeräusch Datensätze veröffentlicht (Walker und Yawn 2020; Faiß 2022, 2023). Keiner der Datensätze enthält dabei jedoch in relevantem Maße Insekten, die als Schädlinge oder Nützlinge im Gartenbau in Deutschland vorkommen. Außerdem ist keiner der Datensätze mehrkanalig aufgenommen, was zur Umsetzung einer räumlichen Störgeräuschunterdrückung nötig ist. Der Nutzen einer solchen räumlichen Störgeräuschunterdrückung konnte im Projekt IPMaide gezeigt werden (Branding et al. 2023). Lemos Escola et al. präsentierte 2020 in einer Veröffentlichung ein Low-Cost-System zur Erfassung und Verarbeitung von Zikadengeräuschen in Kaffeeplantagen. Die Datenauswertung erfolgte dabei auf Basis von händisch entwickelten Features und einer Support Vector Machine zur Klassifikation. Dabei wurde lediglich die Anwesenheit von Zikaden in der Plantage akustisch erkannt und nicht deren Art spezifiziert (Escola et al. 2020).

In der Zeit des Vorhabens wurden zwei Veröffentlichungen zur Schädlingserkennung mit hyperspektraler Kameratechnik publiziert (Nguyen und Nansen 2020; Peignier et al. 2023). Eine der Veröffentlichungen befasst sich mit der Detektion von Minierern an Pak Choi, die zweite mit der Erkennung von Blattläusen. Hier ging es jedoch um die Erkennung und Unterscheidung der Blattläuse selber und nicht um die hervorgerufenen Veränderungen an Pflanzen durch deren Befall. Beide Arbeiten zeigen die Aktualität und Relevanz der Technik für den Pflanzenschutz im Gartenbau, ohne jedoch die im Projekt erarbeiteten Ergebnissen direkt zu betreffen.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Veröffentlichungen mit Peer-Review-Verfahren

Branding, J., von Hörsten, D., Wegener, J. K., Böckmann, E., & Hartung, E. (2023). [Towards noise robust acoustic insect detection: from the lab to the greenhouse](https://doi.org/10.1007/s13218-023-00812-x). *Künstliche Intelligenz : KI: Organ des Fachbereichs "Künstliche Intelligenz" Der Gesellschaft Für Informatik E.V.* <https://doi.org/10.1007/s13218-023-00812-x>

Branding, J., von Hörsten, D., Wegener, J.K., Böckmann, E., Hartung, E. (2024): InsectSound1000 An Insect Sound Dataset for Deep Learning based Acoustic Insect Recognition In: Scientific Data. DOI: 10.1038/s41597-024-03301-4

Branding, J., von Hörsten, D., Wegener, J.K., Böckmann, E., Hartung, E. (2024): On the influence of microphone quality on the prospects of acoustic insect detection systems In: Applied Acoustics (draft)

Krüger, M., Serfling, A., Zemanek, T., Wuttke, D., Dinkel, M., Böckmann, E. (2024): Hyperspectral imaging for pest symptom detection on bell pepper, In: Plant Methods. (under review)

Veröffentlichungen in weiteren Zeitschriften

Jahncke, D. (2024) Integrierten Pflanzenschutz im Gewächshaus durch sensorgestütztes Monitoring und Entscheidungshilfesystem effektiv anwenden In: Gemüse, Ausgabe 02/2024

Schäffer M. (2023) Im dritten Projektjahr: Wo steht IPMaide? In: <https://www.hortico40.de/ipmaide-statusupdate/>

Schäffer M. (2021) Auf dem Weg zum Gartenbau 4.0 – Wie Pflanzenschutz in Zukunft gelingen kann In: Gemüse, Ausgabe 02/2021

Buchbeiträge / Beiträge zu Sammelwerken

Branding, J., von Hörsten, D., & Wegener, J. K. (2023). Insektengeräusche im Gewächshaus - Die KI hört genau hin. In Julius Kühn-Institut (ed.), 63. Deutsche Pflanzenschutztagung: Pflanzenschutz morgen - Transformation durch Wissenschaft; 26. bis 29. September 2023, - Kurzfassungen der Vorträge und Poster - (Vol. 475, pp. 441–442). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/20230803-074309-0>

Branding, J., von Hörsten, D., & Wegener, J. K. (2022). Akustische Insektenerkennung – Deep Learning zur Klassifikation leisester Fluggeräusche: Acoustic insect detection – deep learning for classification of low level flight sounds. In: 42. GIL-Jahrestagung, Künstliche Intelligenz in der Agrar- und Ernährungswirtschaft, Gesellschaft für Informatik e.V.

Branding, J., von Hörsten, D., & Wegener, J.-K. (2021). Acoustic insect detection for horticulture. In 13th Young Scientists Meeting 2021: 11th – 13th October - Abstracts - (Vol. 213, p. 40). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/20211001-083036>

Branding, J., von Hörsten, D., Böckmann, E., & Wegener, J.-K. (2021). Akustische Insektendetektion im Gewächshaus: eine Methodenentwicklung. In Julius Kühn-Institut (ed.), 62. Deutsche Pflanzenschutztagung: Gesunde Pflanzen in Verantwortung für unsere Welt; 21.

- 23. September 2021, -Kurzfassungen der Vorträge und Poster- (Vol. 467, p. 424). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/20210721-093221>

Branding, J., von Hörsten, D., Böckmann, E., Bisutti, I., Meyhöfer, R., Grupe, B., Jahncke, D., Mentrup, D., & Wegener, J.-K. (2021). Verbundprojekt IPMaide: Sensorbasiertes Monitoring und Entscheidungshilfe für den integrierten Pflanzenschutz in Gewächshauskulturen. In Julius Kühn-Institut (ed.), 62. Deutsche Pflanzenschutztagung: Gesunde Pflanzen in Verantwortung für unsere Welt; 21. - 23. September 2021, -Kurzfassungen der Vorträge und Poster- (Vol. 467, p. 393). Julius Kühn-Institut. <https://doi.org/10.5073/20210721-093221>

Literaturverzeichnis

Branding, Jelto; Hörsten, Dieter von; Wegener, Jens Karl; Böckmann, Elias; Hartung, Eberhard (2023): Towards noise robust acoustic insect detection: from the lab to the greenhouse. In: *Künstl Intell*. DOI: 10.1007/s13218-023-00812-x.

Branding, Jelto; Hörsten, Dieter von; Wegener, Jens Karl; Böckmann, Elias; Hartung, Eberhard (2024): On the influence of microphone quality on the prospects of acoustic insect detection systems. In: *Applied Acoustics*.

Escola, João Paulo Lemos; Guido, Rodrigo Capobianco; Da Silva, Ivan Nunes; Cardoso, Alexandre Moraes; Maccagnan, Douglas Henrique Bottura; Dezotti, Artur Kenzo (2020): Automated acoustic detection of a cicadid pest in coffee plantations. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 169, S. 105215. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105215.

Faiß, Marius (2022): InsectSet32: Dataset for automatic acoustic identification of insects (Orthoptera and Cicadidae). Unter Mitarbeit von Baudewijn Odé, Ed Baker und Dan Stowell.

Faiß, Marius (2023): InsectSet47 & InsectSet66: Expanded datasets for automatic acoustic identification of insects (Orthoptera and Cicadidae). Unter Mitarbeit von Baudewijn Odé, Ed Baker und Dan Stowell.

Goodfellow, Ian; Bengio, Yoshua; Courville, Aaron (2016): Deep Learning: MIT Press. Online verfügbar unter <http://www.deeplearningbook.org>.

Kiskin, Ivan; Sinka, Marianne; Cobb, Adam D.; Rafique, Waqas; Wang, Lawrence; Zilli, Davide et al. (2021): HumBugDB: A Large-scale Acoustic Mosquito Dataset. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/2110.07607v1>.

Mueller-Blenkle, Christina; Kirchner, Sascha; Szallies, Isabell; Adler, Cornel (Hg.) (2018): A new approach to acoustic insect detection in grain storage. Julius-Kühn-Archiv, Nr. 463

(2018): Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWSPP) in Berlin, Germany. Berlin.

Müller-Blenkle, Christina; Simon, Ulrich; Meyer, Ralf; Szallies, Isabell; Lorenz, Daniela; Prozell, Sabine et al. (2023): A method for acoustic storage pest detection and its challenges. In: *Journal of Cultivated Plants* (Bd. 75 Nr. 09-10), S. 235–247. DOI: 10.5073/JFK.2023.09-10.02.

Nguyen, Hoang Dd; Nansen, Christian (2020): Hyperspectral remote sensing to detect leafminer-induced stress in bok choy and spinach according to fertilizer regime and timing. In: *Pest management science* 76 (6), S. 2208–2216. DOI: 10.1002/ps.5758.

Peignier, Sergio; Lacotte, Virginie; Duport, Marie-Gabrielle; Baa-Puyoulet, Patrice; Simon, Jean-Christophe; Calevro, Federica et al. (2023): Detection of Aphids on Hyperspectral Images Using One-Class SVM and Laplacian of Gaussians. In: *Remote Sensing* 15 (8), S. 2103. DOI: 10.3390/rs15082103.

Pfaff, Alexander; Gabriel, Doreen; Böckmann, Elias (2020): Mitespotting: approaches for *Aculops lycopersici* monitoring in tomato cultivation. In: *Experimental & applied acarology* 80 (1), S. 1–15. DOI: 10.1007/s10493-019-00448-3.

Walker, Thomas J.; Yawn, Teresa Marie (2020): Singing Insects of North America (SINA). Online verfügbar unter <http://entnemdept.ufl.edu/Walker/buzz/>, zuletzt aktualisiert am 13.02.2020, zuletzt geprüft am 13.07.2020.