

# Abschlussbericht

## Kurze Darstellung (Sachbericht Teil I) zum Teilvorhaben „Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“ – OCELI des FZI Forschungszentrum Informatik

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

Projekträger



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

### Konsortium:

FZI Forschungszentrum Informatik (Koordinator)	Christoph Zimmermann, Abteilungsleiter ESS-MIT, czimmer@fzi.de
apic.ai GmbH	Katharina Schmidt, Geschäftsführerin, katharina.schmidt@apic.ai
Eurofins Agrosience Services Ecotox GmbH	Dr. Silvio Knaebe, Teamleiter Ökotox Feldabteilung, silvioknaebe@eurofins.com
Disy Informationssysteme GmbH	Dr. Andreas Abecker, Leiter Innovationsmanagement, andreas.abecker@disy.net
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ	Prof. Dr. Volker Grimm, Ökologische Systemanalyse, volker.grimm@ufz.de



---

**Zuwendungsempfänger**

**FZI Forschungszentrum Informatik**

**Förderkennzeichen**

**281C307A19**

**Laufzeit / Berichtszeitraum des Vorhabens**

**07.06.2021 - 31.12.2024**

**Datum, Autor, Version**

**25.06.2025, FZI, 1.0**

---

## **Aufgabenstellung & Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand**

Das Verbundprojekt OCELI hatte zum Ziel, Honigbienen und Hummeln als Biosensoren für Umweltveränderungen in Agrarlandschaften nutzbar zu machen. Ziel war es ökologische Zusammenhänge zwischen landwirtschaftlicher Praxis, Nahrungsverfügbarkeit, Landschaftsstruktur und der Vitalität von Bestäuberpopulationen systematisch messbar und auswertbar zu machen. Hierfür sollte ein neuartiges, modulares Gesamtsystem aus Hardware, Software und Datenanalyse entwickelt werden, dass die Aktivität und den Zustand von Bestäubern automatisiert erfasst, mit Umwelt- und Geodaten kombiniert und mithilfe ökologischer Modelle wie BEEHAVE und Bumble-BEEHAVE ausgewertet. Das Projekt setzte an einem Stand an, der durch manuelle, aufwändige und oft invasive Verfahren geprägt war. Methoden wie Fallen, RFID-Markierungen oder manuelle Zählungen lieferten lediglich punktuelle Daten mit begrenzter Aussagekraft. Erste KI-basierte visuelle Systeme waren zwar vorhanden, jedoch durch hohe Rechenanforderungen und Cloudkosten noch nicht praxistauglich. Es fehlte zudem an einer funktionierenden Schnittstelle zwischen Monitoringdaten und ökologischer Modellierung.

## **Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben wurde vom FZI koordiniert. Nach einer Anforderungsanalyse wurden konkrete Anwendungsszenarien erarbeitet und ein technisches Konzept für eine skalierbare Monitoringplattform erstellt. Das FZI entwickelte KI-Algorithmen zur Erkennung von Pollenfarben, individuellen Bienenmarkierungen und Bewegungsmustern. Ein besonderes Merkmal war die Integration mehrerer Aufgaben in ein einziges neuronales Netz („Multinetz“), das lokal auf Edge-Geräten ohne Cloud-Anbindung lief. Am UFZ wurden parallel die Anbindung an ökologische Simulationsmodelle vorbereitet, während Disy Verfahren zur Verknüpfung mit Geodaten entwickelte. Eurofins brachte Expertise aus der ökotoxikologischen Praxis ein, insbesondere für die Validierung der Ergebnisse in regulatorischen Kontexten. Die entwickelten Komponenten wurden in mehreren Feldstudien getestet.

## **Wesentliche Ergebnisse**

Im Verlauf des Projekts konnten zentrale technische und wissenschaftliche Ziele erfolgreich erreicht werden. Dazu gehört die Entwicklung eines Algorithmus zur automatisierten Analyse von Blütenpollen auf Basis visueller Merkmale. Durch die Farberkennung der sogenannten „Pollenhöschen“ an den Beinen der Bienen gelang es, Rückschlüsse auf die florale Vielfalt im Umfeld des Bienenstocks zu ziehen. Diese Farbdifferenzierung stellt einen validen Indikator für das Pollenangebot dar und konnte im Projekt mithilfe neuronaler Netze präzise erfasst

werden. Ein weiteres Ergebnis war die zuverlässige Wiedererkennung individuell markierter Bienen. Das FZI entwickelte dafür ein System visueller Marker, mit dem es gelang, über 900 verschiedene Tiere eindeutig zu identifizieren. Diese visuelle Identifikation ermöglichte erstmals eine umfassende Analyse des individuellen Sammelverhaltens, ohne auf teure RFID-Technologie zurückgreifen zu müssen. Damit wurde eine flexible und kostengünstige Lösung geschaffen, die sich auch für groß angelegte Feldversuche eignet. Besonders hervorzuheben ist auch der Einsatz eines sogenannten „Multinetzes“, eines einzigen neuronalen Netzwerks, das gleichzeitig mehrere Aufgaben erfüllte, darunter die Erkennung von Pollen, Markern und das Tracking einzelner Bienen. Dieses KI-Modell konnte lokal auf ressourcenschwacher Hardware ausgeführt werden. Damit wurde ein entscheidender Beitrag zur Umsetzung einer energieautarken, skalierbaren Monitoringlösung geleistet. Die Möglichkeit, ohne permanente Cloud-Anbindung auszukommen, erhöht sowohl die Datensouveränität als auch die Robustheit des Systems unter Praxisbedingungen.

Im Bereich des Hummelmonitorings entwickelte das FZI gemeinsam mit apic.ai ein Sensor- und Kamerasystem mit kapazitiver Aktivierung, das den Energieverbrauch auf ein Minimum reduzierte und dennoch eine Erkennungsrate von über 97 % erreichte. Damit konnte das OCELI-System erstmals auch auf wildlebende Bestäuberarten ausgeweitet werden – eine Entwicklung mit hohem wissenschaftlichem Potenzial, insbesondere für die ökologische Freilandforschung.

Neben den technischen Entwicklungen lag ein Fokus des Projekts auf der Einbindung realer Monitoringdaten in ökologische Simulationsmodelle. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem UFZ konnten die Modelle BEEHAVE und Bumble-BEEHAVE mit empirischen Daten zur Pollenverfügbarkeit, Flugaktivität und Mortalität kalibriert und erweitert werden. Dies ermöglichte eine verbesserte Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Umweltbedingungen und dem Gesundheitszustand von Bestäuberpopulationen. Besonders im Bereich der multifaktoriellen Stressanalyse konnten so neue Erkenntnisse gewonnen und praxisrelevante Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

## Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In der Zusammenarbeit mit externen Stellen wie dem Bieneninstitut Celle, der Universität Graz und weiteren wurde zudem sichergestellt, dass die entwickelten Methoden wissenschaftlich validiert und praxisnah eingesetzt werden können.

**Abschlussbericht**  
**Eingehende Darstellung (Sachbericht Teil II) zum**  
**Teilvorhaben**  
**„Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der**  
**synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft**  
**und Bestäuberinsekten“ – OCELI**  
**des FZI Forschungszentrum Informatik**

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

Projektträger



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

**Konsortium:**

FZI Forschungszentrum Informatik (Kordinator)	Christoph Zimmermann, Abteilungsleiter ESS-MIT, czimmer@fzi.de
apic.ai GmbH	Katharina Schmidt, Geschäftsführerin, katharina.schmidt@apic.ai
Eurofins Agrosience Services Ecotox GmbH	Dr. Silvio Knaebe, Teamleiter Ökotox Feldabteilung, silvioknaebe@eurofins.com
Disy Informationssysteme GmbH	Dr. Andreas Abecker, Leiter Innovationsmanagement, andreas.abecker@disy.net
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ	Prof. Dr. Volker Grimm, Ökologische Systemanalyse, volker.grimm@ufz.de



---

<b>Zuwendungsempfänger</b>	<b>FZI Forschungszentrum Informatik</b>
<b>Förderkennzeichen</b>	<b>281C307A19</b>
<b>Laufzeit / Berichtszeitraum des Vorhabens</b>	<b>07.06.2021 - 31.12.2024</b>
<b>Datum, Autor, Version</b>	<b>25.06.2025, FZI, 1.0</b>

---

<b>1 Ergebnisse des Gesamtprojekts .....</b>	<b>3</b>
1.1 Überblick.....	3
1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	5
1.2.1 Algorithmenentwicklung.....	5
1.2.2 Monitoringtechnologie.....	9
1.2.3 Pflanzenschutzmitteltests .....	12
1.2.4 Geodatenanalyse.....	15
1.2.5 Ökologische Systemanalyse .....	17
<b>2 Publikationen und Wissenstransfer des Projekts .....</b>	<b>20</b>
2.1 Beiträge zur Wissenschaft und Projektkommunikation .....	20
2.1.1 Beiträge in wissenschaftlichen Journals.....	20
2.1.2 Vorträge.....	21
2.1.3 Poster für wissenschaftliche Konferenzen .....	22
2.1.4 Abschlussarbeiten .....	22
2.2 Öffentlichkeitsarbeit .....	23
<b>3 Ergebnisdarstellung des FZI Forschungszentrum Informatik.....</b>	<b>25</b>
3.1 Umsetzung der Arbeitspakete.....	25
3.1.1 Spezifikation der Gesamtlösung (AP1).....	25
3.1.2 Algorithmenentwicklung zur Merkmalsextraktion (AP2).....	25
3.1.3 Geodatenanalyse und Flächenbewertung (AP3) .....	37
3.1.4 Ökologische Systemanalyse (AP4).....	38
3.1.5 Systemintegration Monitoringtechnologie (AP5).....	38
3.1.6 Fallstudien (AP6) .....	38
3.1.7 Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination (AP7).....	38
3.2 Vergleich zu den ursprünglichen Zielen (Zielabweichungen begründen) .....	38
3.2.1 Erreichung der Meilensteine .....	39
3.3 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung.....	43
3.3.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	43
3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit.....	44
3.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	44
3.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	44
3.7 Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF. ....	45

## 1 Ergebnisse des Gesamtprojekts

Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel gemeinsam für das ganze Konsortium präsentiert, spätere Informationen beziehen sich nur auf das FZI Forschungszentrum Informatik.

### 1.1 Überblick

Das Ziel von OCELI bestand in der Erforschung und Entwicklung einer neuartigen Technologie, die entscheidend zur Realisierung einer nachhaltigen Landwirtschaft mit intakten Bestäuberpopulationen beitragen soll. Dafür sollte das Potenzial von Honigbienen und Hummeln als Bioindikatoren nutzbar gemacht werden. In diesem Abschnitt werden die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse zur Erreichung des Zieles vorgestellt. Zunächst in einem kurzen Überblick und anschließend im Detail mit Fokus auf die Schwerpunktgebiete der einzelnen Partner.

Zu Beginn des Projektes wurde OCELI definiert als innovatives technologisches Gesamtsystem, bestehend aus Hard- und Software sowie den Workflows zur Erfassung der Umgebungsdaten und der Interpretation der Daten mittels Simulationsmodellen. Mithilfe von OCELI sollten einzelne Gefahren für Bestäuberinsekten und ihre gegenseitigen Wechselwirkungen messbar gemacht und bewertet werden können. Dazu kombinierten die Projektpartner ihre Expertise in den Bereichen Künstliche Intelligenz (KI), vernetzte Sensorik, Entomologie, Geointelligenz, Ökotoxikologie und ökologische Modellierung.

Mithilfe visueller Monitoringtechnologie wurde das Potenzial von Bienen als Biosensoren erschlossen. apic.ai entwickelte ein energieautarkes, vernetztes Kamerasystem, welches am Eingang von Bienenstöcken oder Hummelkolonien installiert werden und dort kontinuierlich alle ein- und ausfliegenden Tiere filmen kann. Um die aufgenommene Aktivität qualitativ und quantitativ zu erfassen und zu verarbeiten, wurden neuronale Netze als eine Methode der Künstlichen Intelligenz (KI) eingesetzt. In enger Abstimmung von apic.ai und dem FZI wurde, teils aufbauend auf bestehenden Algorithmen und teils mit neuen Ansätzen, die hierfür notwendige Software entwickelt und optimiert. Der Fokus des FZI lag hierbei auf der Entwicklung von Algorithmen zur Erfassung neuartiger Parameter:

- die Extraktion von Farbwerten von Pollen
- die Erkennung von Hummeln
- die Erkennung von Markern auf den Bienen

apic.ai gelang es, die Algorithmen so zu optimieren, dass die Messwerte im Rahmen von experimentellen Fallstudien trotz der im Feld bestehenden Restriktionen (Strom,

Internetverfügbarkeit, beschränkte Rechenleistung) parallel, in Echtzeit und über lange Zeiträume hinweg zuverlässig erhoben werden konnten.

Die beiden zentralen Anwendungsgebiete für OCELI wurden zu Beginn des Projektes gemeinschaftlich entwickelt und festgehalten. Die Entscheidung für “Lebensraumbewertung” und “Bewertung von Risikofaktoren” fiel basierend auf umfangreichen Gesprächen mit unterschiedlichen potenziellen Kunden und Partnern, darunter Landmaschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Pflanzenschutzmittelhersteller, Hummelproduzenten und Entomologen. Bei der Auswahl wurden auch die wirtschaftlichen Verwertungspotenziale und die gesellschaftliche Relevanz der gewünschten Funktionen berücksichtigt. Für die beiden Anwendungsgebiete wurden relevante Merkmale definiert, deren Erhebung im Rahmen von Fallstudien erprobt werden sollten, um die Machbarkeit der Erhebung zu prüfen. Zur Konkretisierung und methodisch-technischen Umsetzung der Arbeitspakete in beiden Bereichen wurden inter- und transdisziplinärer sowie in praxisorientierter Weise Fragestellungen in einer prototypischen Gesamtlösung integriert. Zudem wurden Hypothesen zu Wirkmechanismen zwischen Land(wirt)schaft und Bestäubern aufgestellt. Die während der Feldsaisons durchgeführten Fallstudien lieferten neuartige Daten, um zur Überprüfung dieser Hypothesen beizutragen. Eurofins trug hierzu die Bestäuberexpertise bei und verantwortete die Planung und Durchführung der Feldstudien samt imkerlichen Eingriffen und Datenanalysen zu klassischen und OCELI-spezifischen Fragestellungen. Die am Bienenstock erfassten Daten wurden durch räumliche Daten über die Umgebung aus einem Geoinformationssystem (GIS) ergänzt. Durch die Analyse von Geodaten zur Landnutzung im Flugradius konnten Kausalzusammenhänge zwischen Veränderungen im Umfeld der Völker mit deren Entwicklung hergestellt werden. Von Interesse war hierbei insbesondere:

- die quantitative Erfassung von Sammelflügen,
- die Quantifizierung von Bienen, die aufgrund von Mortalität oder beeinträchtigter Orientierungsfähigkeit nicht zurückkehren,
- der Eintrag von Blütenpollen als Maß sowohl der Nahrungsverfügbarkeit als auch der Bestäubungsaktivität.
- die Möglichkeit, die farbliche Differenzierung des eingetragenen Blütenpollens als Indikator für die Vielfalt der blühenden Flora in der Umgebung nutzen zu können.

Die Synthese der Geodaten, Wetterdaten, Landnutzungs- und Flugmonitoringdaten im Hinblick auf die Vitalität und Überlebensfähigkeit der Bestäuber erfolgte mithilfe des etablierten Simulationsmodells “BEEHAVE”<sup>1</sup> durch das UFZ. Hier lag der Fokus auf folgenden Bereichen:

---

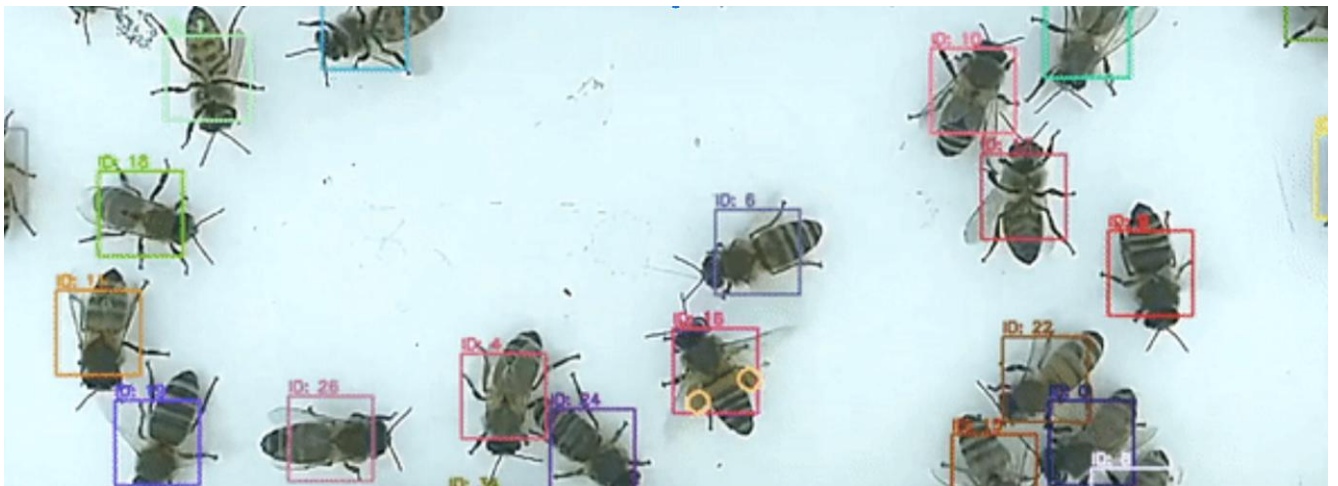
<sup>1</sup> Becher, M. A., Grimm, V., Thorbek, P., Horn, J., Kennedy, P. J., & Osborne, J. L. (2014). BEEHAVE: a systems model of honeybee colony dynamics and foraging to explore multifactorial causes of colony failure. *Journal of applied ecology*, 51(2), 470-482.

- Interpretation einer Feldstudie, in der der Einfluss eines Pestizids auf die Flugaktivität von Nektar- und Pollensammlerinnen erfasst wurde. Die Beobachtungen der Feldstudie konnten im Modell nachvollzogen werden und führten zu Hypothesen, die sich in einer weiteren Feldstudie, die um die Erfassung markierter Individuen ergänzt wurde, bewährten.
- Beurteilung des Bedarfs und Nektar und Pollen eines Bienenvolkes in einer bestimmten Landschaft, um ggfls. Empfehlungen für den Anbau zusätzlicher Blühpflanzen zu geben.
- Test des BEEHAVE Modells mit Daten der Realität, welche im Rahmen von Feldstudien generiert wurden. In diesem Zusammenhang wurden die Effekte untersucht von (1) Verlust von Sammelbienen, (2) Verlust der Brut, (3) Verlust der Honigreserven.

## 1.2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse des Projekts beschrieben. Detailliertere Ausführungen zur Erzielung der Ergebnisse finden sich in Kapitel 3 der jeweils in die Umsetzung eingebundenen Projektpartner.

### 1.2.1 Algorithmenentwicklung



*Abbildung 1: Visualisierung der Arbeit des Algorithmus beim Tracking der Bienen und der Pollenerkennung.*

Ein Ziel der technischen Arbeiten in OCELI war die visuelle Analyse der Kamerasysteme, um weitere Funktionen zu ergänzen und zu optimieren. Dazu wurde jeweils ein Proof-of-Concept durchgeführt:

1. Die Zuordnung von multispektral aufgezeichneten Pollenbilder zu Pflanzenarten

Bei der Sichtung historischer Videodaten von apic.ai wurde festgestellt, dass das apic.ai Kamerasystem auf das sichtbare Lichtspektrum und auf sich bewegende Objekte optimiert wurde, wodurch keine laborähnliche Aufnahme der Farben ermöglicht wird. Daher wurde im Sinne eines Proof-of-Concept ein optimales System zur Farbaufnahme konzipiert, aufgebaut und eine erste Studie mit Pollen vom Bieneninstitut in Mayen durchgeführt. Dabei konnte ein R2 Score von 0.72 erreicht werden. Parallel wurde auch eine direkte Farbanalyse auf den Kamerasystemen entwickelt, die einen R2 Score von 0,52 erzielte. Es konnte im Vergleich zum Stand der Technik<sup>2</sup> von R2 0,45 so in beiden Fällen eine erhebliche Steigerung erreicht werden und durch den Abgleich mit Laborergebnissen aus durchgeführten Pollen Sammlungen ein erster automatisch erzeugter Pollenkatalog erzeugt werden (siehe Abbildung 1). Die Ergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation der Fachwelt vorgestellt<sup>3</sup>. Durch ein weiteres Training könnte dieser Katalog erweitert und verfeinert werden und so eine automatisierte Dokumentation der Blühzeiten und Blühpflanzenzusammensetzung ermöglichen.

---

<sup>2</sup> BORLINGHAUS, Parzival; JUNG, Jakob; ODEMER, Richard. Smart Agricultural Technology.

<sup>3</sup> TAUSCH, Frederic; WAGNER, Jan; KLAUS, Simon. Pollinators as Data Collectors: Estimating Floral Diversity with Bees and Computer Vision. In: *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2023. S. 643-650.

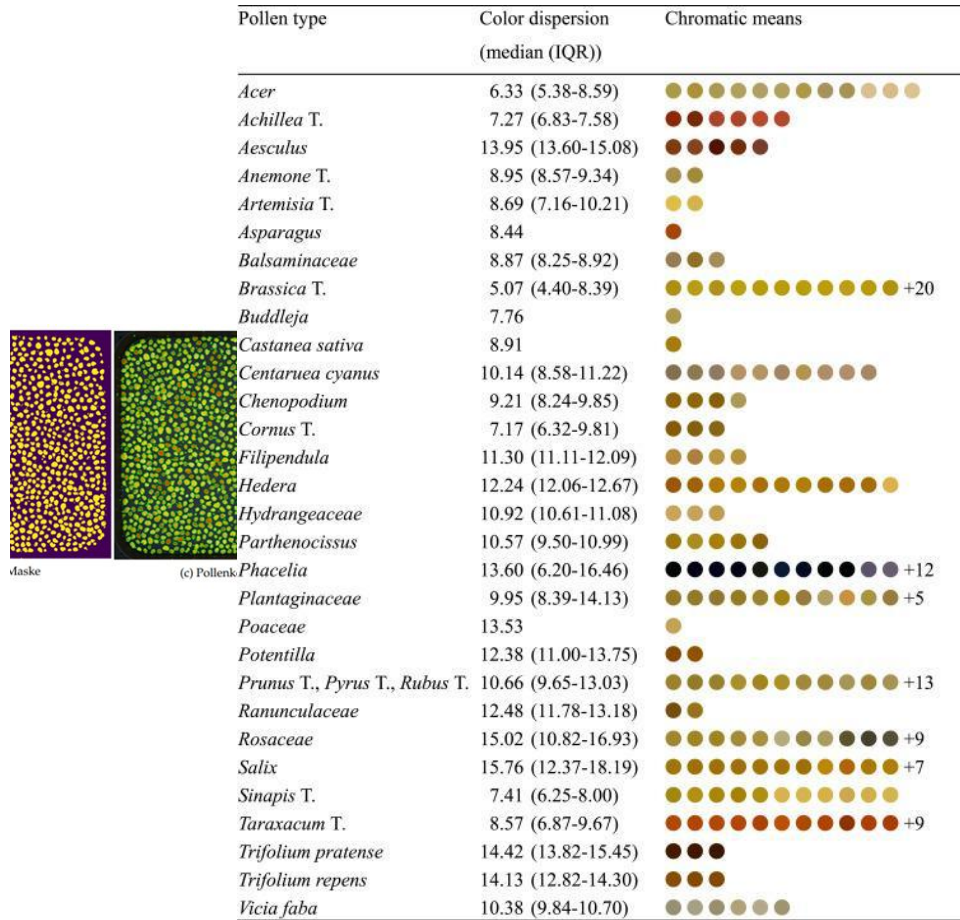


Abbildung 2: Prozess der Vorverarbeitung der Rohbilder (links) von oben nach unten: 1. Bildaufnahme, 2. Binäre Maske, 3. Pollenkontur, 4. Mittelwertdarstellung, Pollenkatalog (rechts)

## 2. Die automatisierte Erkennung von individuellen Bienen durch Marker

Im Rahmen des Projekts wurde die individuelle Beobachtung von Bienen als relevant identifiziert und durch die Verknüpfung der Projektpartnern-Expertisen realisiert. Im ersten Schritt markierte Eurofins Bienen mit Opalith-Plättchen, die anschließend durch das apic.ai Kamerasystem aufgezeichnet und mittels Algorithmen analysiert wurden. Der erste Proof of Concept (PoC) im Frühjahr 2022 verlief erfolgreich, sodass die Erkenntnisse in produktive Algorithmen für weitere Fallstudien übertragen wurden. Technische Anpassungen zur Verbesserung des Systems umfassten die Integration der Pollen- und Markerererkennung in einem einzigen Verarbeitungsschritt mit einer stabilen Bildverarbeitungsrate von über 20 fps. Zudem wurden neue, selbst gedruckte Marker entwickelt, die die Generierung von 992 unterscheidbaren Identifikationszeichen über zweistellige Buchstaben, Zahlen und Sonderzeichen ermöglichen.

Insgesamt bietet die Lösung einen erheblichen Mehrwert, indem sie eine detaillierte Verfolgung und Analyse des Flugverhaltens einzelner Bienen ermöglicht und im Vergleich zu einem Tracking über RFID-Tags eine einfachere Anbringung, geringere Kosten pro Tag und insbesondere die Möglichkeit bieten, zu erkennen, ob ein Individuum beim Einflug Pollen bei sich trägt oder nicht. Dieses neue Verfahren kann für zukünftige Forschungsarbeiten von großem Nutzen sein, um das Sammelverhalten zu untersuchen und auch detaillierte Einblicke in die Wirkmechanismen von Pflanzenschutzmitteln bei der Risikobewertung geben.

### 3. Übertragbarkeit auf Hummeln

Eine weitere Gattung mit ihren spezifischen Besonderheiten in das Monitoring zu integrieren, könnte einen erheblichen Mehrwert der technischen Gesamtlösung erbringen. Das apic.ai Kamerasystem wurde zwar in der Vergangenheit bereits an Hummelvolk eingesetzt, aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen scheint ein Einsatz mit hoher Stichprobe jedoch nicht wirtschaftlich sinnvoll. Daher wurde ein eigenes kompaktes Hummelsystem entwickelt, mit der Anforderung über 12 Wochen mit einem eingebauten Akku eine Hummelstudie zu begleiten und die Bildverarbeitung auf dem Gerät durchzuführen. Ein kapazitiver Sensor erwies sich als zuverlässiger und energieeffizienter Aktivitätssensor, mit einem Energieverbrauch von nur 58 mW im Standby-Modus. Das verwendete neuronale Netz der Kameraauswertung zeigte in einer Feldstudie eine Erkennungsrate von über 97% (> 66% bei verschmutzten Sichtfeld) bei einem Leistungsbedarf von nur 1,15 W. Durch weitere Trainingsdaten und Optimierung der Netzarchitektur könnte die Erkennungsrate noch weiter verbessert werden, zudem wäre eine Erweiterung des Netzes an verschiedene Hummelarten neben der untersuchten *Bombus terrestris* möglich. Das entwickelte System erfüllt die grundlegenden Anforderungen für die weitere Erforschung von Hummeln und deren Verhalten und könnte durch die geringeren Materialkosten eine Möglichkeit für großskalige, detaillierte Hummel Studien bieten.

## 1.2.2 Monitoringtechnologie

Zu Beginn des Projektes wurden die technischen Herausforderungen identifiziert, die mit der Implementierung des OCELI Systems zu lösen sein würden. Dazu zählten insbesondere die Minimierung des Energiebedarfs, limitierte Rechenleistung und Konformität mit der Guten Laborpraxis. Darüber hinaus wurden technischen Ziele definiert, deren Erreichbarkeit mit dem OCELI System demonstriert werden sollten. Dazu zählten die automatisierte Pollenfarberkennung, die on-Device Datenanalyse in Echtzeit und die Marker-Identifikation zum Zweck der Erkennung markierter Bienen. Iterativ wurde über mehrere Saisons in einem sich wiederholenden Zyklus aus Anforderungsanalyse, Prototypenbau, Feldtest und Ergebnisanalyse ein Demonstrator entwickelt, welcher alle Anforderungen erfüllt und die gewünschten Messwerte erheben kann.



*Abbildung 3: Demonstratoren im Einsatz einer Studie zur Landschaftsbewertung.*

Hier die wichtigsten Schritte:

- Realisierung der Echtzeitauswertung im Feld durch Optimierung von Softwarekomponenten und Erweiterung der Kameraeinheit um spezialisierte Beschleuniger zur visuellen KI-Analyse. Die entwickelten Systeme können dadurch simultan mehrere Datenströme erfassen und verarbeiten, wie etwa die Aktivität der Bienen, Polleneintrag und die Erkennung von Markern auf den Bienen.

- Automatisierte Kamerakalibrierung über Methoden der Optimierung. Dabei wurde der Messbereich der Kamera über die Kalibrierung von Belichtungszeit, Weißabgleich und Empfindlichkeit optimal auf das Spektrum der Pollenfarben angepasst. Hierbei war eine gute Abgrenzung zu den Tieren und zum Hintergrund zu gewährleisten. Es galt, die Bildqualität und Farbtreue der Datenbasis zu maximieren, um Kenntnisse über die Möglichkeiten der Differenzierung zu erlangen. <sup>3</sup>
- Optimierung der energieverbrauchenden Komponenten und intelligentes Energiemanagement, um den Dauerbetrieb der Systeme mit dem zu erwartenden Leistungsbedarf durch die höhere GPU-Leistung zu gewährleisten.
- Aufbau einer geeigneten Ablagestruktur für die Daten und Entwicklung eines Tools zur schnellen Analyse.
- Tests zur Validierung der Eignung des Monitoringsystems zum Zweck der Erfassung von Bienenverlusten.
- Re-identifikation von Bienen, die zuvor mit visuellen Markern beklebt wurden, in Zusammenarbeit mit dem FZI. Im Rahmen des Oomen Versuchs 2023 wurden über 18.000 Re-ID Bilder gespeichert und ausgewertet.



*Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Sichtfeld des Kamerasystems; Ausschnitt einer markierten Biene.*

- Visualisierung der Bienendaten in Echtzeit auf Dashboards. Hierdurch konnten auch Probleme erkannt und schneller behoben werden.

Prozesse, die jenseits der Technologie entwickelt wurden:

In enger Zusammenarbeit von apic.ai und Eurofins wurden Herausforderungen und Bedarfe für Prozesse betreffend die Konformität mit der Guten Laborpraxis (GLP) ausgearbeitet. Es wurden notwendige Optimierungen zur Erreichung von Konformität mit den Anforderungen definiert und umgesetzt. Für die folgenden, zuvor definierten Fragestellungen wurden Lösungen gefunden:

- (1) Aufteilung von Zuständigkeit, Berechtigungen und Restriktionen durch Service Level Agreements,
- (2) Dokumentation von Eingriffen bei technischen Problemen durch verschiedene Parteien in definierten Dokumenten, für Eingriffe vor Ort oder aus der Ferne,
- (3) Definition, Speicherung und Übergabe von “Rohdaten”; und Zuständigkeit für die Sicherung,
- (4) Maßnahmen zur Minimierung des Risikos von Datenverlusten, insbesondere die Möglichkeit zur Datensicherung während der Studien, sowie
- (5) die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit der Funktionalität der Systeme vor und während der Datenaufnahme sowie deren Dekommissionierung nach Studienende.

Test zu möglichen Erweiterungspotenzialen der Technologie:

Es wurde eine Machbarkeitsstudie zum Monitoring von Wildbienen (*Osmia* und *Megachile*) mittels eines prototypischen Hardware-Aufbaus durchgeführt, um die Übertragbarkeit des Analyseansatzes zu validieren.



*Abbildung 5: Prototypischer Aufbau eines Monitoringsystems für bestimmte Wildbienen.*

- Zudem gab es eine intensive Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten mittels automatisierten Monitorings von Bienen und anderen Indikatorspezies Biodiversitätsassessments durchzuführen. Es wurden zahlreiche Gespräche mit

möglichen Nutzergruppen durchgeführt, z.B. Immobilienentwickler und Baugenossenschaften. Es wurden ein Flyer und ein Siegel entwickelt, um die Möglichkeiten des Monitorings darzustellen und Feedback potenzieller Kunden zu sammeln. apic.ai wurde Teil der Expertengruppe Biodiversität der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (DGNB) und konnte im Rahmen mehrerer Sitzungen sehr viel über die Anforderungen der Landschaftsgestaltung von Betriebsgeländen und Firmenstandorten erfahren, sowie selbst zur Diskussion beitragen.

### 1.2.3 Pflanzenschutzmitteltests

Validierung von Möglichkeiten zur Verbesserung, Automatisierung und Erweiterung ökotoxikologischer Testmethoden, für die Prüfung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln.

- Empirische Tests zur Auswirkung letaler und insbesondere subletaler Effekte von Pestiziden würden eine Anzahl an Wiederholungen, d.h. Test-Völkern, erfordern, die nicht realisierbar ist. Der Grund hierfür ist die extreme hohe Vielfalt in den Merkmalen und Verhalten der Bienenvölker, die über eine Größenordnung höher ist als bei den meisten Tierarten. Das Modell BEEHAVE wurde deshalb bereits von der EFSA (European Food Safety Authority) eingesetzt, um die natürliche Variabilität der maximalen Volksgröße abschätzen zu können<sup>4</sup>. Mittels BEEHAVE wurde ein Feldversuch zu den Effekten eines Insektizides nachgestellt und interpretiert, und die resultierenden Hypothesen in einem neuen Versuch getestet und bestätigt. Dabei stellte ich heraus, dass der im Feld beobachtete Effekt reproduzierbar war, d.h. sowohl im Versuch 2019 also auch im Jahr 2023 auftrat. Somit ist erstmalig die Möglichkeit gegeben, mittels der von apic.ai im Rahmen von OCELI entwickelten Technologie und Software, reproduzierbare Risikobewertungen von Pestiziden im Feld, d.h. in Agrarlandschaften, mit frei fliegenden Honigbienen durchzuführen<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> European Food Safety Authority (EFSA), Ippolito, A., Focks, A., Rundlöf, M., Arce, A., Marchesi, M., ... & Auteri, D. (2021). Analysis of background variability of honey bee colony size (Vol. 18, No. 3, p. 6518E).

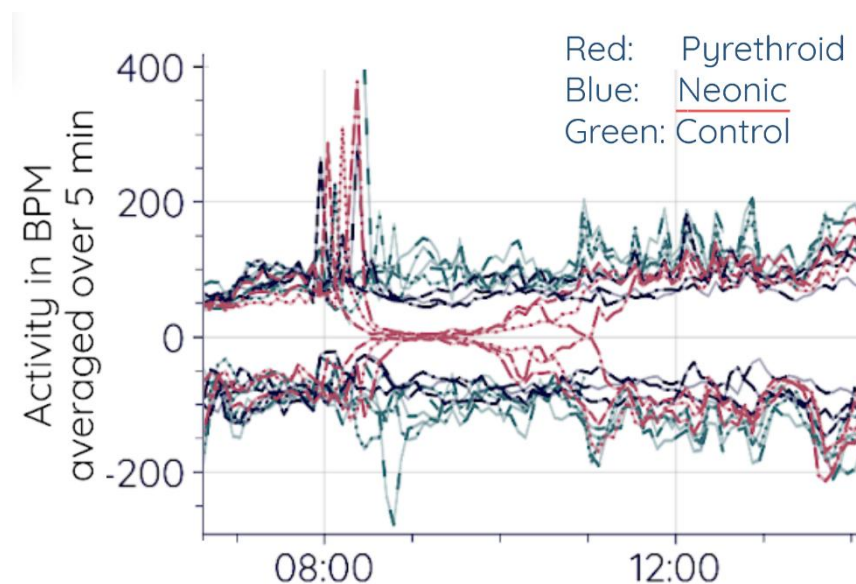
<https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/sp.efsa.2021.EN-6518>

<sup>5</sup> Wang M, Tausch F, Schmidt K, et al. Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation. *Environmental Science and Technology*. 2025; 59(10):4883-4892. doi:10.1021/acs.est.4c13656.



*Abbildung 6: Nachbeobachtungsphase einer Studie zur Messbarkeit von Effekten von Pflanzenschutzmitteln im Feld samt Demonstratoren und Wetterstation.*

- Messung von Repellenz-Effekten. Ziel: Prüfung, ob die Erfassung von Aktivität und Polleneintrag präzise und zuverlässig genug ist, um eine temporäre Nicht-Aktivität der Bienen zu messen, die für bestimmte Substanzen bereits nachgewiesen wurde. Die folgende Abbildung zeigt, dass dies erfolgreich war. In der Pyrethroid-Gruppe kehrten die Bienen nach der Applikation in ihren Stock zurück und verließen ihn für ca. 90 Minuten nicht mehr. Danach normalisierte sich die Aktivität binnen wieder. In der Gruppe wurde durch Eurofins eine deutlich geringere Mortalität gemessen.



*Abbildung 7: Visualisierung minütlich gemessener Bienenaktivität im Versuch mit drei Gruppen. Die vier Völker, die Kontakt mit der repellenten Substanz hatten (rot), stellten temporär die Aktivität ein.*

Der Versuch eröffnet die Perspektive Pflanzenschutzmittel in Kombination mit repellenten Substanzen zu applizieren, um den Kontakt von Bienen und anderen Bestäubern während der Applikation zu reduzieren und durch geringere Exposition unerwünschte Nebeneffekte (letal wie auch subletal) zu reduzieren. Dies könnte entscheidend dazu beitragen, die Bestäuberfreundlichkeit der Landwirtschaft zu erhöhen.

Integriert in den Versuch wurden die Effekte mittels Re-ID auch auf Ebene von Kohorten, frisch geschlüpfter Bienen und erfahrener Sammlerinnen untersucht. Der Versuch gelang und es konnten Auswirkungen auf das Überleben, das “Age of first foraging” und die Rekrutierung gemessen werden. Zu sehen ist dies auch in den Daten der frisch geschlüpften Bienen der Völker CA (Kontrollgruppe) und T2a (exponierte Gruppe) in Abbildung 8. Die Jungbienen der Kontrollgruppe begaben sich erst nach einigen Tagen aus dem Volk und übernahmen auch dann noch nur in geringem Umfang Sammelaufgaben. Die Bienen gleichen Alters in der exponierten Gruppe begannen gleich nach der Exposition intensiv zu sammeln und nahmen die Funktion deutlich älterer Bienen ein.

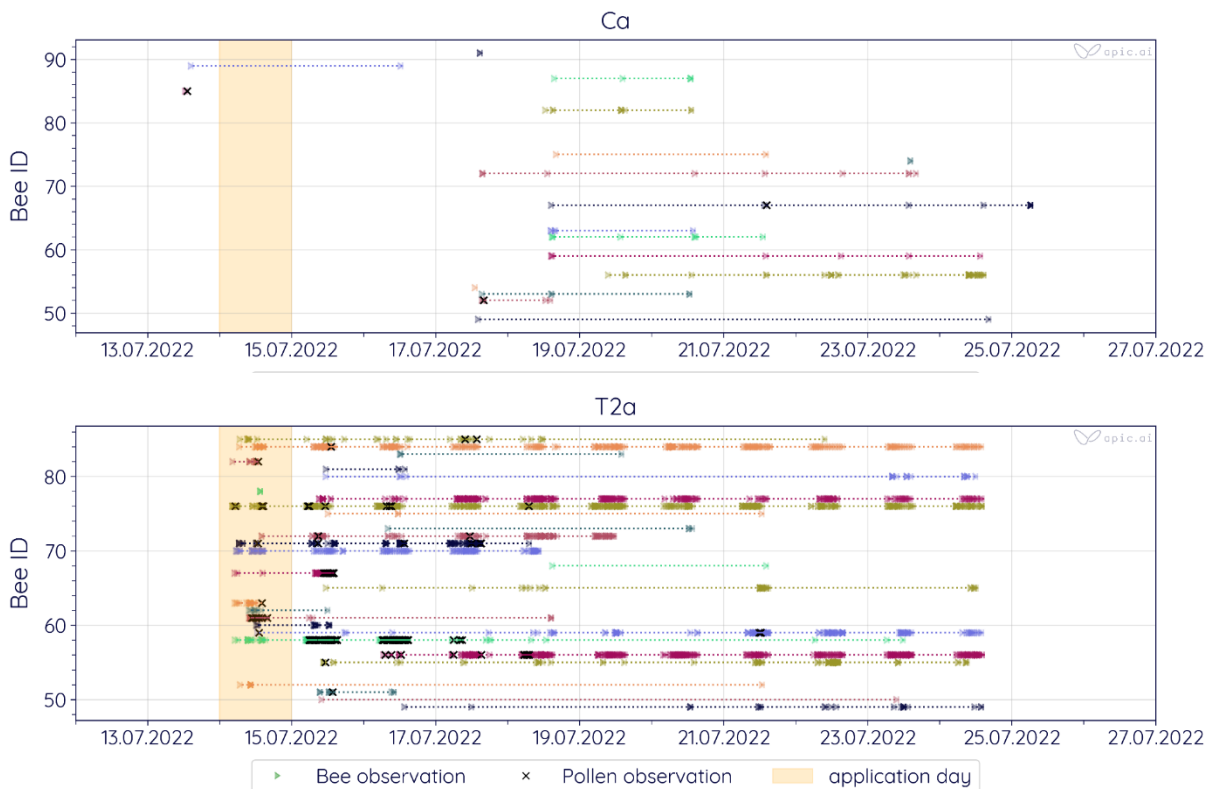


Abbildung 8: Darstellung der Aktivität von frisch geschlüpften Bienen der Kontrollgruppe (oben) und der exponierten Gruppe (unten).

Nach der Vorstellung der vielversprechenden Ergebnisse beim Beenovation Kick-off, kam es zu einem Austausch mit dem Deutschen Bauernverband. Dessen Vertreter zeigten sich sehr interessiert an den gemessenen Repellenz-Effekten. Daneben gab es einen Austausch mit einem großen Pflanzenschutzmittelhersteller über Anknüpfungsmöglichkeiten zur Hebung der Potenziale von Repellenz-Effekten. Das Interesse an dem Ansatz war groß, insbesondere bezüglich folgender Möglichkeiten:

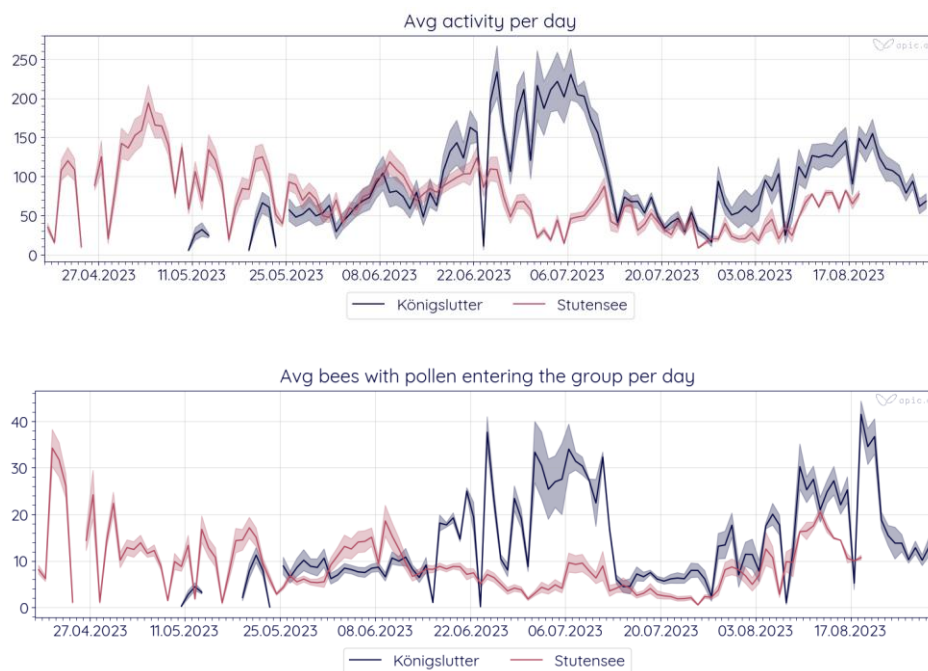
- Das Einsatzfenster der Applikation der Substanzen zu verändern, sodass sie nicht nur außerhalb des Bienenflugs eingesetzt werden können.
- Erneute Zulassung von Substanzen, welche diese verloren haben, insbesondere bezüglich Kleinkulturen wie verschiedener Gemüsesorten.

Unsere Gesprächspartner beim Bauernverband waren der Meinung, dass eine Proof-of-Concept Studie sinnvoll wäre. Gleichzeitig sehen sie die Verantwortung hierfür nicht bei sich, sondern bei den Produzenten der Pflanzenschutzmittel oder auf Seiten der Politik.

#### 1.2.4 Geodatenanalyse

Entwurf und prototypische Realisierung von kontextsensitiven, geo-temporalen Datenanalysen und Verknüpfung der Daten aus dem Bestäuber-Monitoring mit räumlichen Umgebungsdaten, um neuartige, automatisierte Methoden der Flächenbewertung und die Datenbereitstellung für die anderen Funktionen zu realisieren.

- Pilotierung eines Lebensraumvergleichs zur Erfassung der Bestäuberfreundlichkeit verschiedener Land(wirt-)schaftsstrukturen. Erfassung von Langzeitdaten aus dem KI-basierten Bestäubermonitoring und Kombination mit Gewichtswerten, Umgebungsdaten und Pollenanalysen. Die Erfassung von Langzeitdaten wurde im Jahr 2022 pilotiert und 2023 verfeinert. 2023 konnten erfolgreich Daten über mehrere Monate von je vier Bienenvölkern an zwei Standorten mit unterschiedlichen Landschaftsstrukturen gesammelt werden. Die Aktivitäten wurden hierzu auch mit dem JKI abgestimmt, welches die Datenerfassung in der großstrukturen Landschaft betreute. Es konnte gezeigt werden, dass ein Vergleich von Lebensräumen über die Aktivität, den Eintrag von Pollen und den Anteil der Pollensammlerinnen möglich ist. Die folgenden Grafiken legen nahe, dass die Bienen im großstrukturen geprägten Königslutter über weite Teile des Jahres aktiver waren und mehr Nahrung in Form von Pollen sammeln konnten als jene im kleinstrukturen Stutensee.



**Abbildung 9:** Darstellung der Messwerte von zwei Gruppen von Bienenvölkern an strukturell verschiedenartigen Standorten im Jahresverlauf - durchschnittliche Einflugaktivität in Bienen pro Minute (oben) und durchschnittlicher Polleneintrag in Bienen mit Pollen pro Minute (unten). Der schattierte Bereich zeigt Unsicherheit und Variabilität innerhalb jeder Gruppe. Qualitätskriterien: Zwischen Sonnenauf- und Untergang sind mindestens 90 % der Daten von mindestens 3 von 4 Völkern verfügbar, sonst werden Lücken dargestellt.

- Analyse von Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität: Die Langzeitdaten aus Stutensee in den Jahren 2022 und 2023 wurden mit räumlichen Umgebungsdaten, wie Wetterdaten, Landnutzungsdaten oder den Daten zur Biodiversität (Simpson-Index), die aus eigenen Pollenbeobachtungen abgeleitet wurden, angereichert. Auf verschiedenen Wegen wurden diese Daten vorverarbeitet. Anschließend wurden verschiedene Machine Learning-Ansätze angewendet, um den Einfluss der Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität zu modellieren. Durch die Anwendung von Methoden der Explainable AI konnte dann die Bedeutung der einzelnen Umweltfaktoren auf die Bienen- und Sammelaktivität abgeleitet werden. Grundlegend ergab sich eine sichtbare Variabilität darüber, welche Umweltfaktoren für die Bienen- und Sammelaktivität am wichtigsten sind. Dies waren, je Vorverarbeitung und Modellierungsansatz. Sonnenfaktoren (wie Tages- und Jahreszeit, Sonnenscheindauer), Temperatur oder relative Luftfeuchtigkeit, die beständig zu den wichtigsten Umweltfaktoren gehörten. Auch die Biodiversität erwies sich als wichtiger Faktor, während für die Landnutzung (Art und Zusammensetzung) per se hier keine zentrale Rolle nachgewiesen werden konnte - hier wären jedoch für weiterführende

Analysen auch kleinräumigere Eingangsdaten vonnöten gewesen. Dies ist in der folgenden Abbildung dargestellt, welche die 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von 2022 und 2023 aggregiert über die verschiedenen Analysen zeigt. Insgesamt waren typischerweise 70-80 % der beobachteten Variabilität über die berücksichtigten Umweltfaktoren erklärbar. Somit bietet die KI-basierte Überwachung von Bienenstöcken und die ML-basierte Datenanalyse grundsätzlich eine gute Plattform zum Studium der Bienen- und Sammelaktivität und ermöglicht ein tieferes Verständnis ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Umwelteinflüssen. Hier sind jedoch in der Zukunft sicherlich noch deutlich umfangreichere Untersuchungen möglich und notwendig. Im OCELI-Vorhaben konnten hierfür methodische und softwaretechnische Grundlagen bereitet werden.

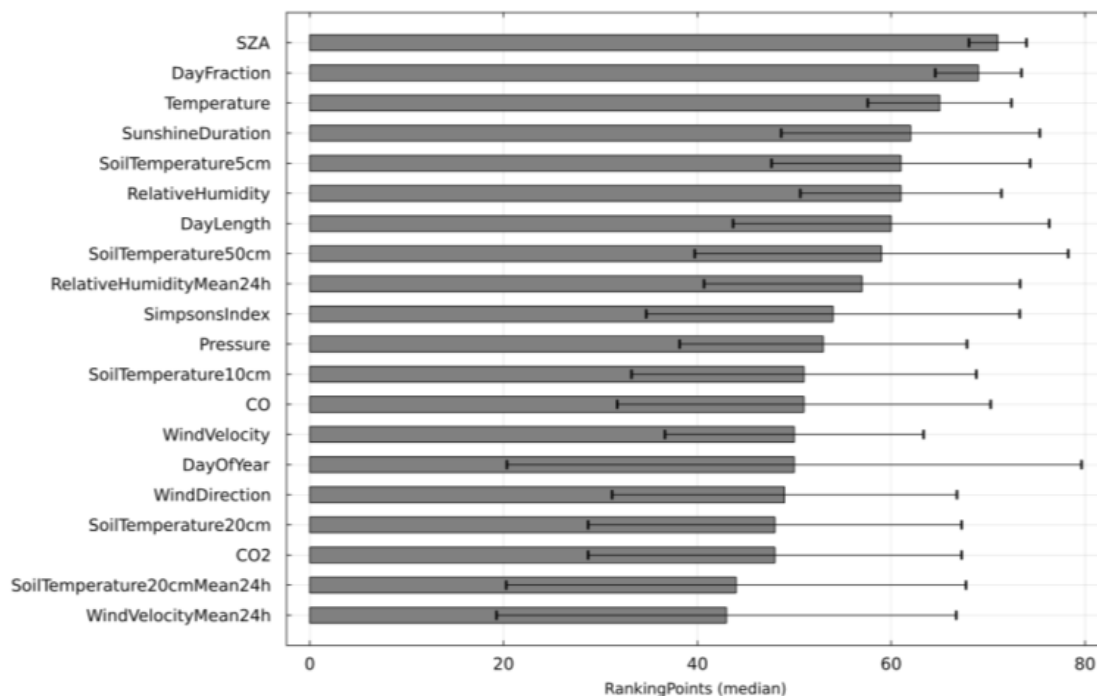


Abbildung 10: Darstellung der 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von Bienenaktivität und Nahrungseintrag, basierend auf Daten von 2022 und 2023, aggregiert über verschiedene Analysen.

### 1.2.5 Ökologische Systemanalyse

Untersuchungen zur Erklärbarkeit von Effekten im Freiland mittels dem Simulationsmodell BEEHAVE.

- Die bereits erwähnten Simulationen der Feldversuche zur Risikobewertung zeigten eine überraschend gute Übereinstimmung. Hierbei wurden die entsprechenden Wetterdaten verwendet, aber keine detaillierte Darstellung der umgebenden

Agrarlandschaft. Für die Reproduktion der Flugaktivität reichte es aus, eine Standardoption von BEEHAVE zu verwenden, in der summarisch je ein Frühjahrs- und Sommertrachtverlauf angenommen wird. Dies ist ein wichtiges Ergebnis: wenn nicht die Landschaftsbewertung im Vordergrund steht, und wenn es um Bestäubungsleistungen bzw. Sammelflüge geht, liefert bereits die Annahme einer summarischen Nahrungsverfügbarkeit gute Ergebnisse.

- Pilotierung einer Lebensraumbewertung für Bienen über die Dauer von mehreren Monaten. Schwerpunkt der Untersuchung war die Verfügbarkeit von Pollen und Nektar im Zeitverlauf sowie die Nahrungsvielfalt. Im Feld wurden hierzu “Ist”-Daten von Bienenvölkern gesammelt, welche die tatsächliche Verfügbarkeit von Pollen wiedergeben. Diese wurden mit “Soll”-Werten zur Nahrungsmenge aus BEEHAVE Simulationen verglichen, welche den Bedarf der Völker entsprechend dem Stand der Forschung darstellen. Die Bewertung der Pollenverfügbarkeit wurde erfolgreich mit dem Kamerasystem von OCELI umgesetzt. Für den konkreten Studienort und -zeitraum wurde im Vergleich zu den BEEHAVE Annahmen ein Überangebot an Pollen gemessen. Die Bewertung der Nektarverfügbarkeit wurde mit kommerziell verfügbaren Stockwaagen umgesetzt. Für diese wurde eigens eine Messeinheit entwickelt, um eine höhere Auflösung zu erzielen. In der Studie wurde ein deutlicher Mangel an Nektar gemessen. Dies deckte sich mit der Beobachtung des Imkers, der aufgrund des Nahrungsmangels zufüttern musste. Es zeigte sich jedoch, dass die OCELI-spezifischen Erweiterungen nicht zu einer relevanten Verbesserung des Detailgrads der Gewichtswerte beitragen konnten. Kommerziell verfügbare Waagen können entsprechend im Vergleich mit BEEHAVE genauso gute Ergebnisse liefern. Die Nahrungsvielfalt wurde mittels Pollenproben untersucht, die in regelmäßigen Abständen mit von Pollenfallen gesammelt wurden. Diese Proben wurden zur Analyse in ein Labor geschickt. Die Ergebnisse wiederum wurden genutzt, um die Verfahren zur automatisierten Vielfaltserkennung zu entwickeln. Quantifiziert wurde die Vielfalt des Nahrungsangebotes mit dem sogenannten Simpson’s Index. Die Ergebnisse und das Vorgehen zur automatisierten Erfassung der Pollenfarben können im entsprechenden Paper nachgelesen werden.
- Weiterentwicklung einer 2019 durchgeführten Fütterungsstudie im Freiland in Kombination mit der Re-identifikation von Kohorten markierter Bienen. Die 2019 erhobenen Ergebnisse konnten mit der Simulation von BEEHAVE zu den Effekten einer subletalen Dosis eines Neonicotinoids in Einklang gebracht werden. Dies ist ein beeindruckendes Ergebnis, welches die Relevanz von Simulationsmodellen wie BEEHAVE demonstriert und eine Chance für deren Nutzung zum Einsatz des Schutzes

von Bestäubervorkommen darstellt. Mit der Wiederholung des Versuchs sollte geprüft werden, ob die Ergebnisse reproduzierbar sind und nicht etwa Zufall. Zusätzlich sollte mit der Integration der Erhebung von Daten von Kohorten markierter Individuen die Hypothese für die Ursache der Effekte geprüft werden. Die mit den Daten der ersten Studie erstellte Hypothese besteht darin, dass die Substanz die sogenannte Handling-Time, also die Dauer von Sammelflügen, um den Faktor 10 erhöht, indem sie das vegetative Nervensystem der Bienen beeinträchtigt. Dies konnte anhand der beobachteten Flugdauern der markierten Bienen in der Behandlungs- und Kontrollgruppe geprüft werden. Die Reaktion der Bienen auf Volksebene war bezogen auf die Aktivitätsdaten und den Polleneintrag sehr ähnlich zu jener, die 2019 beobachtet werden konnte. Anders als damals hielt der Effekt jedoch auch über die Expositionsdauer hinaus an und wurde nicht kompensiert. Dies könnte damit zusammenhängen, dass die Studien zu unterschiedlichen Jahreszeiten stattfanden oder auch mit dem verfügbaren Nahrungsangebot. In Bezug auf die Effekte auf Individualebene zeigte sich, dass der vorhergesagte Effekt auf die Handling-Time in der Tat auftrat, allerdings nur um einen Faktor von ca. 2 bis 3. Eine entsprechende Publikation stellt die Methoden und Ergebnisse im Detail dar.

Verbesserung des Simulationsmodells BEEHAVE durch Training mit realen Messwerten und dadurch neue Einsichten in die Faktoren, welche die Vitalität der Bienenvölker bzw. -populationen bestimmen.

- Es wurden sog. “Stressexperimente” an Bienenvölkern durchgeführt, bei denen entweder die komplette Brut entnommen wurde, oder die Sammelbienen (indem der Bienenstock so weit verschoben wurde, dass die Sammelbienen ihn bei der Rückkehr nicht mehr fanden). Es wurden Flugaktivitäten aufgenommen sowie die sog. Volksentwicklung, d.h. geschätzte Werte der Brutentwicklung und Volksgröße. Die Stressexperimente wurden mittels BEEHAVE nachgestellt. Die Volksentwicklung wurde weitgehend reproduziert, während es bei der Flugaktivität teilweise deutliche Unterschiede in der Antwort auf den Stress gab (Wang et al., in Vorbereitung). Die Ergebnisse bestätigen zum einen, dass BEEHAVE Grundmechanismen der Volksentwicklung richtig wiedergeben kann, aber die Daten zur Flugaktivität waren aufgrund der geringen Anzahl an Wiederholungen (je vier Kontroll- und Behandlungsvölker) zu variabel, um weitere Einsichten zu erlangen.

## 2 Publikationen und Wissenstransfer des Projekts

Die Publikationen werden im folgenden Kapitel gemeinsam für das ganze Konsortium präsentiert, spätere Informationen beziehen sich nur auf das FZI Forschungszentrum Informatik.

### 2.1 Beiträge zur Wissenschaft und Projektkommunikation

#### 2.1.1 Beiträge in wissenschaftlichen Journals

Publiziert:

- Odemer, R., Jakoby, O., Barth, M., Knäbe, S., Pistorius, J., & Schmidt, K. (2024). Making way for the implementation of automated bee counters in regulatory risk assessment. *Journal of Applied Entomology*, 00, 1–7. <https://doi.org/10.1111/jen.13256>.
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., Diehl M., Knaebe S., Bargaen H., Materne L., Groeneveld J., Grimm V. Honeybee pollen but not nectar foraging greatly reduced by neonicotinoids: insights from AI and simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*; Volume 221 (2024); ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108966>.
- Borlinghaus, P., Tausch F., and Odemer R. Natural color dispersion of corbicular pollen limits color-based classification. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*; Volume 12 (2024), ISSN 2667-3932, <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2024.100063>.
- Tausch F., Wagner J., Klaus S. Pollinators as Data Collectors: Estimating Floral Diversity with Bees and Computer Vision. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) Workshops, 2023*, pp. 643-650.
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., et al. Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation. *Environmental Science and Technology*. 2025; 59(10):4883-4892. doi:10.1021/acs.est.4c13656.
- Luttermann, M., Prestele, R., Grimm, V., & Groeneveld, J. (2025). Expanding the Scope of the Bumblebee Model BEE-STEWART: A Simple Foraging Module Facilitates the Parameterization. *Ecology and Evolution*, 15(5), e71468

Eingereicht:

- Wang M., Grimm V., Requier F., Groeneveld J., Bargaen H., Knaebe S., Odemer R. Pesticide impacts on honey bee foraging behaviour: current knowledge and research gaps. Eingereicht bei "Agriculture, Ecosystems & Environment", Juni 2025.

- Lammers D., Grimm V., Requier F., Focks A, Groeneveld J. Towards using the BEEHAVE honey bee model across climates: a heuristic approach to let egg-laying rates emerge from weather conditions, pollen storage and brood pheromones. *Ecological Modelling*. Eingereicht April 2024, Revision Juni 2025.

In Vorbereitung:

- Groeneveld J, Requier F, Becher M, Wang M, Grimm V. The integrative honey bee colony model BEEHAVE: lessons learned and to be learned. (unveröffentlichtes Manuskript).
- Wang M., Tausch F., Schmidt K., Diehl M., Knaebe S., Bargas H., Faramarzi F., Grimm V. Insight from using the BEEHAVE MODEL to mimic stress experiments with honey bee colonies. (unveröffentlichtes Manuskript)

### 2.1.2 Vorträge

- Möglichkeiten des visuellen Bestäubermonitoring (Tagung der Bieneninstitute 22)
- The integrative honeybee colony model BEEHAVE: lessons learned (SETAC Europe 22)
- How can an automatic flighty activity monitor contribute to influence our understanding of risk for pollinators? (SETAC North America 22)
- Honey bee lifecycle assessment and homing success in field observations with the help of visual bee monitoring technology (ICPPR 22)
- Determination of repellency effects on honey bees & studying pollen and nectar collection behaviour under semi-field conditions, Germany 2022 (ICPPR 22)
- Bewertung des Lebenszyklus von Honigbienen anhand von Feldbeobachtungen mittels visuellem Monitoring (EuroBee 2023)
- From in silico to in vivo: understanding honeybee foraging under pesticide exposure, Tallinn 2024 (EURBEE September 2024 16-19)
- AI-Powered Field Monitoring with Modelling: Uncovering the Hidden Impacts of Sublethal Neonicotinoids on Bees (ICPPR 24)
- Survival Analysis of Marked Honey Bees Using Re-Identification: Insights from two Studies (ICPPR 24)
- Digital Farming Conference in Berlin, Panel Diskussion „Algorithmus schlägt Bauernregel – wie digital ist die Zukunft der Landwirtschaft“ with Dr. Ophelia Nick, 17.05.2022. [Video](#)
- Honigbienen am Computer simuliert... Geht das überhaupt und warum?“, 7.11.2023, Bremer Imkerverein, Bremen
- Vorstellung der Projekterkenntnisse beim gemeinsamen Beenovation Abschluss am 17.10.2024 in Berlin mit 3 thematisch abgegrenzten Vorträgen zu den zentralen Projektergebnissen.

- KI-basiertes Monitoring im BEEHAVE-Modell nachgestellt: neue Erkenntnisse über den Einfluss von Neonikotinoiden auf die Honigbiene
- Zuordnung der Bienenaktivität zu Umweltfaktoren
- Möglichkeiten des KI-basierten Bienenmonitorings für den Schutz von Honigbienen und weiteren Bestäuberinsekten.
- “Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten”, Innovationstage 2024 (BLE), Berlin
- Vorstellung der Echtzeit- und Farbanalyse als zukünftige Möglichkeit im Rahmen einer eigenen Webinar-Reihe 5 Terminen im Winter 2021/22 und internationalem Fachpublikum als vorwettbewerbliche Aktivität zur Gewährleistung der zeitnahen und nachhaltigen praktischen Nutzung der Projektergebnisse

### 2.1.3 Poster für wissenschaftliche Konferenzen

- Measuring the quality of pollinator habitats and the effectiveness of measures to increase feed availability (Tagung der Bieneninstitute 22)
- Honey bee lifecycle assessment and homing success in field observations with the help of visual bee monitoring technology (SETAC Europe 22)
- GLP requirements for using visual bee monitoring technology in ecotoxicological studies (ICPPR 22)
- Eurofins - Comparison of Dead Bee Traps for Honey Bees (ICPPR 22)
- Evaluation of bee counters - a new protocol for measuring the accuracy of daily losses (ICPPR 22)

### 2.1.4 Abschlussarbeiten

Es wurden die folgenden 6 Abschlussarbeiten im Rahmen dieses Projektes abgeschlossen:

- „Vorhersage der Aktivität von Bestäuberinsekten anhand von Umweltfaktoren“, Bachelor-Thesis Hochschule Karlsruhe, 2022.
- „Entwicklung eines Systems zur Beobachtung und Bewertung von Hummelvölkern, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.
- “Advancing the application of a bumblebee simulation model to the national scale”. Master-Thesis, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2024
- „Automatisierte Erfassung der lokalen, floralen Diversität mittels Computer Vision, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.

- „Vorhersage und Mustererkennung der Aktivität von Apis Mellifera anhand von Umweltfaktoren“, 2023.
- „Multitask Self-Training for Detection of Honeybees and their Attributes“, 2023.

## 2.2 Öffentlichkeitsarbeit

- “Science Release” Pressemeldung der American Chemical Society anlässlich der Veröffentlichung des Papers “Reduced Honeybee Pollen Foraging under Neonicotinoid Exposure: Exploring Reproducible Individual and Colony Level Effects in the Field Using AI and Simulation” von Wang et. al. im März 2025. Abrufbar unter: <https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2025/april/simulations-predict-how-pesticides-may-affect-honeybee-colonies.html> ab dem 17.05.2025.
- Pressemitteilung zu den Projektergebnissen von Disy. Veröffentlicht am 10.03.2025 auf der disy Website, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/unternehmen/presse/pm-ki-gestuetzte-analyse-der-bienenaktivitaet/>
- Disy-Newsletter-Beitrag „KI-gestützte Analysen: Welche Umweltfaktoren die Bienenaktivität beeinflussen“, veröffentlicht auf der Disy-Homepage am 11.03.2025, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/beitraege/ki-gestuetzte-analysen-zur-bienenaktivitaet/>
- Pressemitteilung zur BEENOVATION Abschlussveranstaltung vom 18.10.2024, abrufbar unter <https://www.beenovation.de/post/pressemitteilung-abschlussveranstaltung-der-vernetzungs-und-transferma%C3%9Fnahme-beenovation>.
- Beenovation Podcast Beiträge von Silvio Knaebe (Eurofins) und Katharina Schmidt (apic.ai) <https://www.beenovation.de/post/beenovation-jetzt-summt-s-auch-auf-den-ohren>
- Beitrag in Financial Times Podcast Episode „The future of AI in Sustainability“ <https://shows.acast.com/the-next-five/episodes/the-future-of-ai-in-sustainability>. 28.11.2023
- Image video des Landes Baden-Württemberg mit Besuch eines der OCELI Studienorte. 17.11.2022. <https://www.thelaend.de/unternehmensprofil-apicai/>
- Wirtschaftsmagazin der IHK November 2022
- 37° Leben TV Reportage, Bewusstes imkern mit dem Besuch eines der OCELI Studienorte, 14.10.2022. (<https://www.zdf.de/dokumentation/37-grad-leben/anders-ackern---bewusst-imkern-102.html>)
- Beitrag auf der Seite von Soll-Galabau 04.10.2022. <https://www.soll-galabau.de/aktuelle-news/ansicht-aktuelles/datum/2022/10/04/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur.html>

- Pressemitteilung disy, „Mit Geodatenanalysen dem Bienensterben auf der Spur“, veröffentlicht auf der Disy-Homepage 21.09.2022, abrufbar unter <https://www.disy.net/de/unternehmen/presse/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur/>.
- Beitrag auf der Seite Geobranchen.de 22.09.2022, abrufbar unter <https://www.geobranchen.de/mediathek/geonews/item/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur>.
- Beitrag auf der Seite von VDV-Online 22.09.2022., abrufbar unter <https://www.vdv-online.de/aktuelles/vdvaktuell/mit-geodatenanalysen-dem-bienensterben-auf-der-spur.html>.
- Vodafone Blog Beitrag und Pressemitteilung, Bericht über Vodafone’s Unterstützung von apic.ai und die Freigabe ihrer Daten für die OCELI Forschung. 27.08.2022, abrufbar unter <https://newsroom.vodafone.de/gigabeeprotect-iot-ki-fuer-bienchen-und-bluemchen>.
- Der Spiegel online & magazine, OCELI and apic.ai. 20.06.2022.
- Deutsches Bienenjournal, Nennung von apic.ai’s Präsentation bei der Tagung deutscher Bieneninstitute. 01.05.2022
- Land in Form Magazin, Report über Katharina Schmidt, apic.ai und OCELI Anwendungen in der Landwirtschaft. 01.03.2022
- Gemeinsame Pressemitteilung zur Vorstellung des OCELI Projektes. Veröffentlichung u.a. über die FZI Website am 21.02.2022, abrufbar unter <https://www.fzi.de/wp-content/uploads/2021/07/doku-presse-oceli.pdf>.

### **3 Ergebnisdarstellung des FZI Forschungszentrum Informatik**

Nachfolgend findet eine umfassende Darstellung der spezifischen Arbeitsinhalte und Ergebnisse des FZI Forschungszentrum Informatik statt.

#### **3.1 Umsetzung der Arbeitspakete**

##### **3.1.1 Spezifikation der Gesamtlösung (AP1)**

AP1 wurde von allen Projektpartnern gleichermaßen mitgestaltet. Das FZI als Konsortialführer übernahm zusätzlich die Moderation und Zusammenfassung der Ergebnisse. Allgemein wurden folgende Punkte abgedeckt und in einem agilen Lasten- und Pflichtenheft festgehalten. Die Identifikation und Konsolidierung von Anwendungsszenarien in der Landwirtschaft auf wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Ebene, zum Beispiel durch Homing-Studien. Zudem wurde die gemeinsame Definition wissenschaftlicher Studiensetups zum Test der notwendigen Funktionalitäten vorgenommen. Die Partner stellten gemeinsam Hypothesen über Wirkmechanismen zwischen Bestäubern und ihrer Umgebung auf, die sich im Rahmen von Fallstudien überprüfen lassen. Erste Erfahrungen für ein technisches Konzept wurden gesammelt. Außerdem wurden Herausforderungen identifiziert, die mit der Implementierung des OCELI Systems zu lösen sein werden. Dazu gehören die Minimierung des Energiebedarfs, die limitierte Rechenleistung und die GLP-Konformität. Die Ergebnisse sind unter Meilenstein 1 zusammengefasst.

##### **3.1.2 Algorithmenentwicklung zur Merkmalsextraktion (AP2)**

Auf Basis der Anforderungen aus AP1 wurden verschiedene Merkmale identifiziert, die für die Fallstudien von Relevanz sind. Das FZI hat dabei die Aufgabe PoCs durchzuführen bzw. geeignete Referenzerhebungen in Ergänzung zu apic.ai aufzuzeichnen. Wie bereits in der Antragsphase aufgeführt, wird großes Potenzial in der Pollenfarbenerkennung gesehen. Bei der Sichtung historischer Videodaten von apic.ai wurde allerdings festgestellt, dass das Kamerasystem für das sichtbare Lichtspektrum und auf sich bewegende Objekte optimiert wurde, wodurch keine laborähnliche Aufnahme der Farben ermöglicht wird. Daher wurde im Sinne eines PoC ein optimales System zur Farbaufnahme vom FZI konzeptioniert, aufgebaut und eine erste Studie mit Pollen vom Bieneninstitut in Mayen durchgeführt wie in Abbildung 11 – Pollenkamera

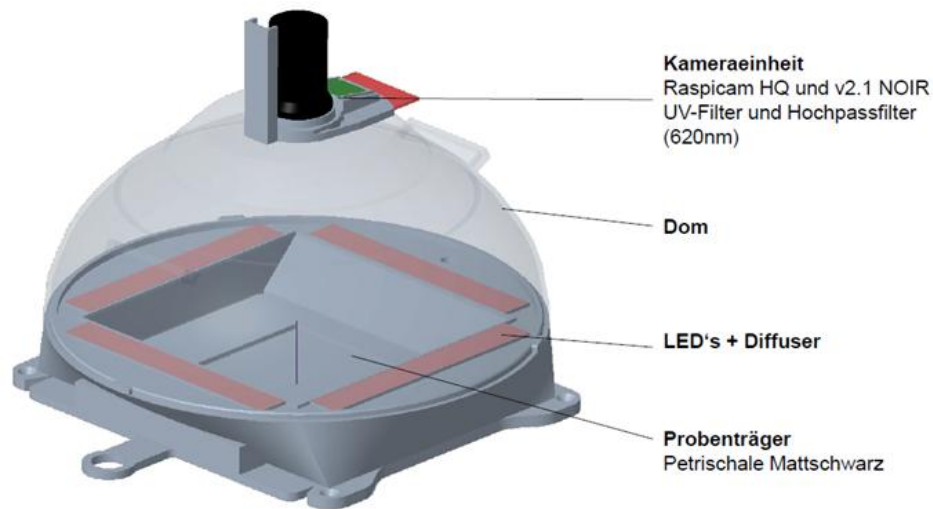


Abbildung 11: Pollenkamera

Durch Ergebnisse aus einem vergangenen Projekt in Mayen konnte auf eingefrorene Pollen zurückgegriffen werden, die bereits durch menschliche Analyse, mikroskopisch klassifiziert wurden. Die Aufnahmeeinrichtung verfügt über drei Lichtszenarien (Norm-/Weißlicht D65, UV und IR). Die Weißlicht- und UV-Bilder werden dabei durch eine PiCam HQ aufgenommen, die IR Bilder durch eine zweite NOIR PiCam 2.1. Das Ergebnis ist in Abbildung 12 - Aufnahmen Pollenkamera mit unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien dargestellt.

### Aufnahmen Pollenkamera

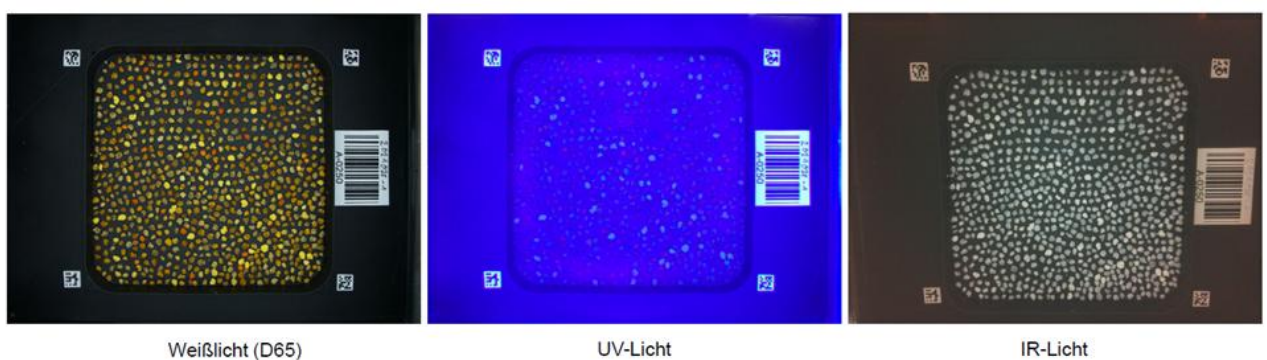


Abbildung 12: Aufnahmen Pollenkamera mit unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien

Über das System konnte ein erster Datensatz aufgenommen werden, der im nächsten Schritt analysiert werden soll. Dabei werden die Pollen zuerst segmentiert und anschließend verschiedene Merkmale extrahiert, die zur Klassifikation herangezogen werden. Außerdem

wurde im Konsortium ein Index zur Biodiversität diskutiert, um eine Metrik für die Vielfalt einer Probe abzubilden. Dazu soll im nächsten Schritt auch der Simpsons's Index auf die Ergebnisse der Merkmalsextraktion angewendet werden. (siehe Abbildung 13)

### Data Mining

Pollenweise Instanzsegmentierung und clustern mit verschiedene Algorithmen aus scikit-learn

### Evaluations Metrik Simpson's Index <sup>[10]</sup>

In Ökologie häufig genutzt um Diversität eines Habitats zu beschreiben.

Berücksichtigt Richness und Evenness

Höhere Gewichtung Dominanter Spezies

$$D = \sum \left(\frac{n}{N}\right)^2 = \sum p_i^2$$

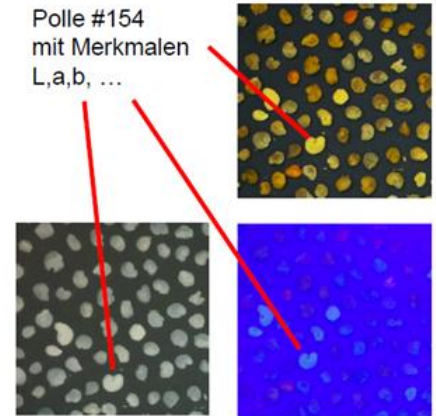


Abbildung 13: Merkmalsextraktion und Diversitätsindex

Das Konzept des automatischen Clusterings in Farbgruppen wurde entwickelt. Die aufgenommenen Rohdaten der verschiedenen spektralen Bilder werden zuerst vorverarbeitet, wie in Abbildung 14 anhand der Weißlichtbilder exemplarisch dargestellt.

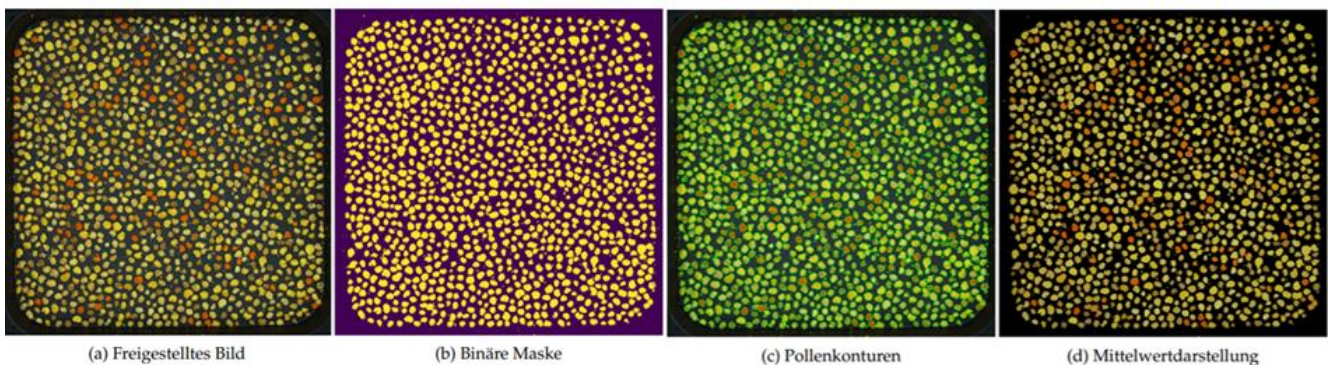


Abbildung 14: Prozess der Vorverarbeitung der Rohbilder

Das Ergebnis der Vorverarbeitung einer Pollenprobe im gesamten Spektrum ist in Abbildung 15 abgebildet.

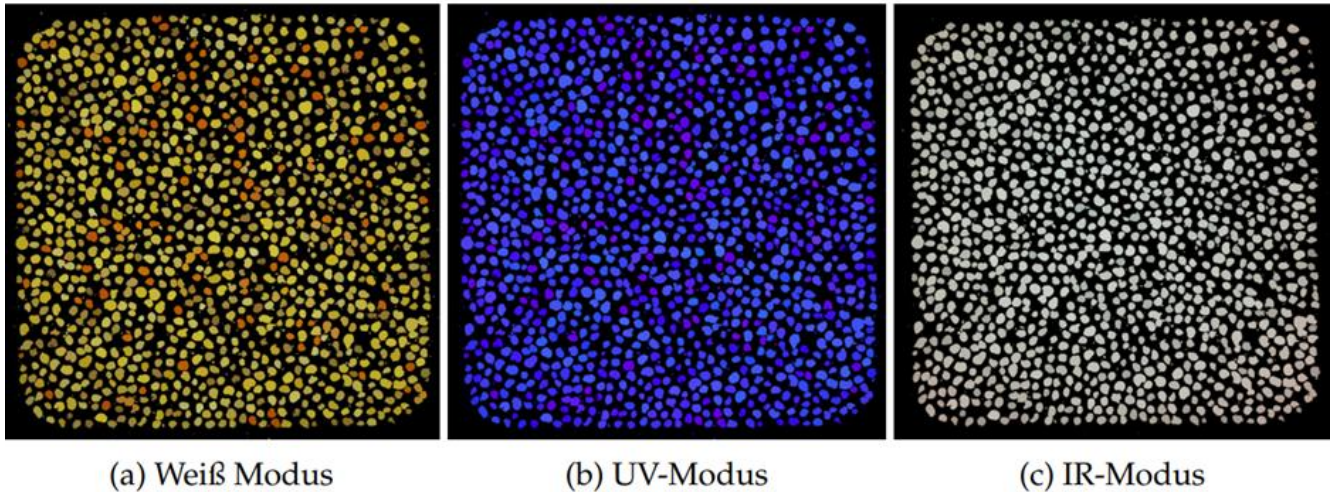


Abbildung 15: Vorverarbeitung Ergebnis

Mit dem Ergebnis der Vorverarbeitung wird ein Clustering durchgeführt, Referenz ist dabei die händische, mikroskopische Analyse im Labor. Der Cluster-Algorithmus HDBSCAN stellte sich dabei als sehr geeignet heraus. HDBSCAN zeichnet sich dadurch aus, auch abstrakte Formen von Clustern zu erkennen und unterschiedliche Clustergrößen und Dichten mit Ausreißern zu berücksichtigen. Der PoC konnte eine gute Schätzung der Größe dominanter Cluster erreichen. Kleinere Cluster hingegen werden nicht immer erkannt und teilweise als Rauschen deklariert. In Abbildung 16 sind drei Proben als Kuchendiagramm der verschiedenen Pollensorten und des Farbclustering durch unterschiedliche Algorithmen aufgeführt.

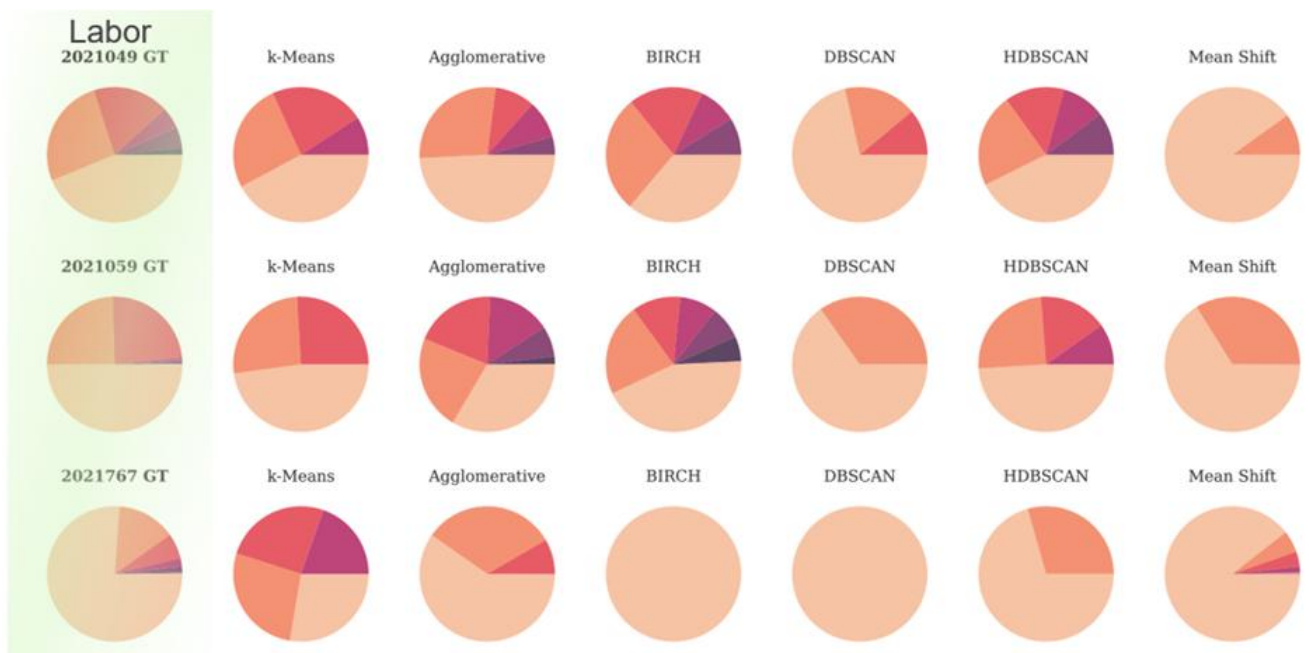


Abbildung 16: Ergebnisse Clustering

Zusätzlich zur Pollenanalyse wurde das Thema der Wildbienenintegration durch Hummel-Aktivitätsmessung durch das FZI behandelt. Dabei wurde auch eine Untersuchung zu low-cost KI-Beschleuniger in den Aufbau integriert, der mögliche Limitationen auch für das OCELI-Kamerasystem aufzeigen kann. Im Vorfeld wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, um die spezifischen Anforderungen bei der Aufnahme von Hummeln zu gewinnen und ein Konzept wie in Abbildung 17 erstellt.

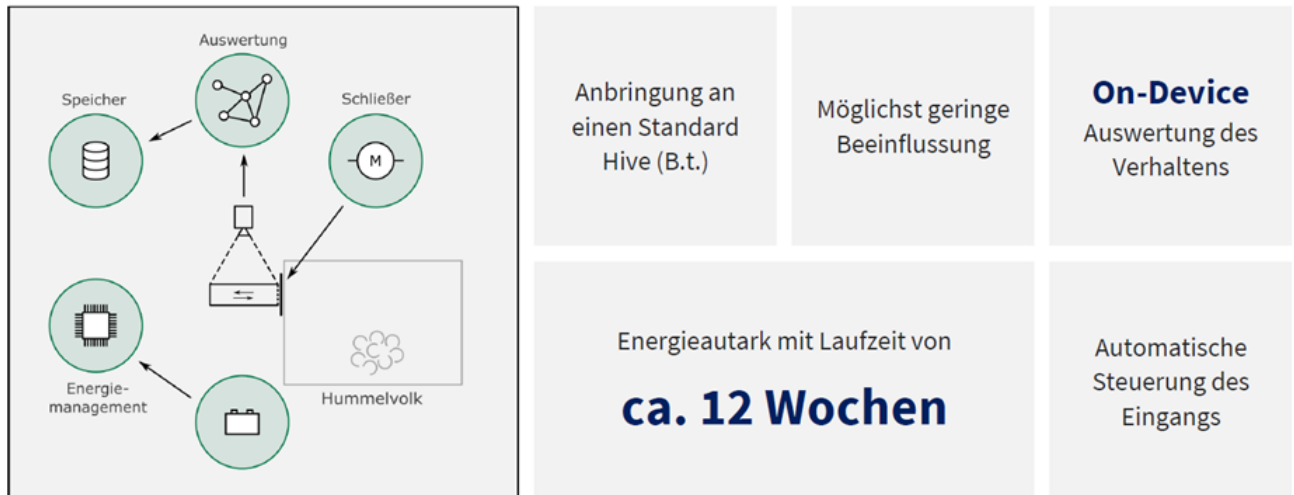


Abbildung 17: Konzept Hummelsystem

Aus verschiedenen mehrtägigen Beobachtungen eines Hummelvolks ging hervor, dass Lichtquellen nur einen geringen bis gar keinen Einfluss auf das Verhalten von Hummeln haben. Da eine Lichtquelle für ein Kamerasystem unerlässlich ist, stellt dies eine wichtige Erkenntnis für weitere Arbeiten in diesem Bereich dar. Eine weitere Erkenntnis ist die erfolgreiche Detektion von Hummeln durch einen kapazitiven Sensor (Abbildung 18). Betritt eine Hummel die entwickelte Sensorplatte, wird zuverlässig ein Peak in den Sensorwerten detektiert. Die energieintensive Kameraanalyse erfolgt entsprechend nur nach Auslösen des kapazitiven, low power Sensors.

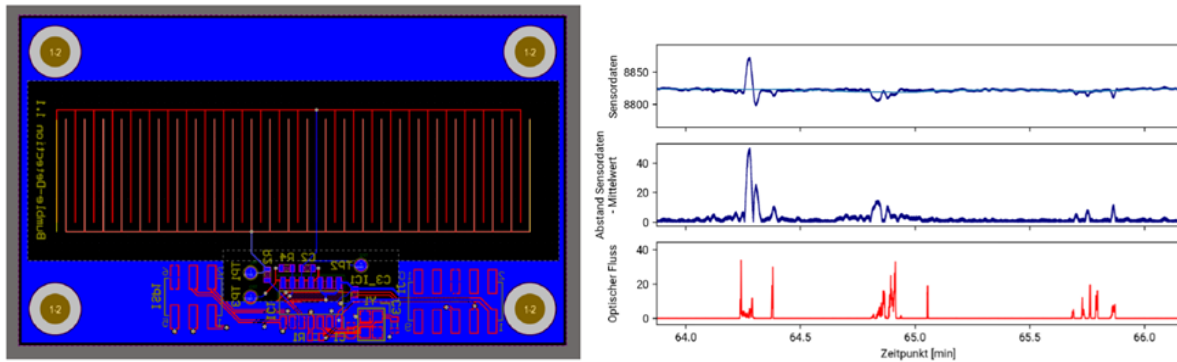


Abbildung 18: (links) Platinenlayout kapazitiver Sensor, (rechts) Messreihe

Zuletzt wurde ein Demonstrator aufgebaut (Abbildung 19), der alle Bestandteile des Konzepts umfasst. Hierfür ist ein Gehäuse entworfen worden, welches das System vor Witterung schützt und gleichzeitig die Montage an einen Hummelstock ermöglicht. Mittels eines 3D-gedruckten Entwurfs konnte eine einfache Möglichkeit gefunden werden, um die Idee eines Systems zur Beobachtung von Hummeln zu realisieren. Des Weiteren ist eine Platine inklusive der notwendigen Sensorik und Aktorik entstanden, die das System um ein Energiemanagement erweitert und dessen Laufzeit deutlich erhöht.

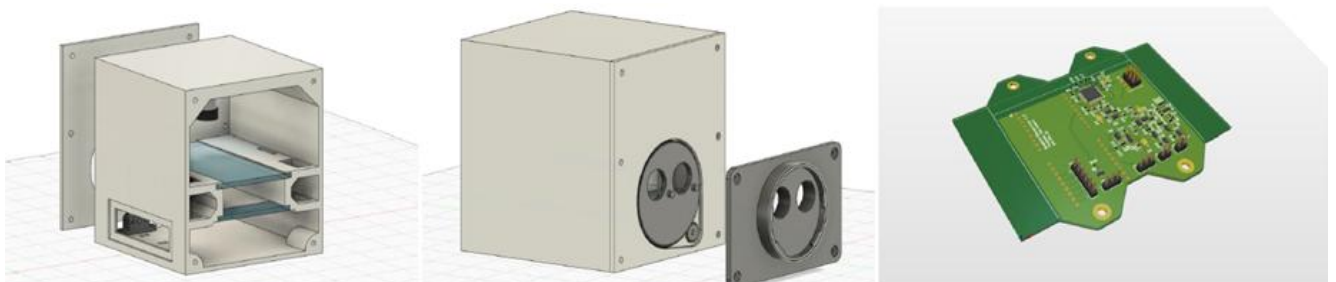


Abbildung 19: CAD Darstellung Demonstrator

Gerade hier hat der kapazitive Sensor große Vorteile gezeigt. Der Energieverbrauch des Systems von 58 mW im Standby ermöglicht es, mithilfe eines Akkus sämtliche Aktivitäten über die Lebenszeit eines Hummelvolks hinweg aufzuzeichnen und direkt auf dem Gerät auszuwerten.

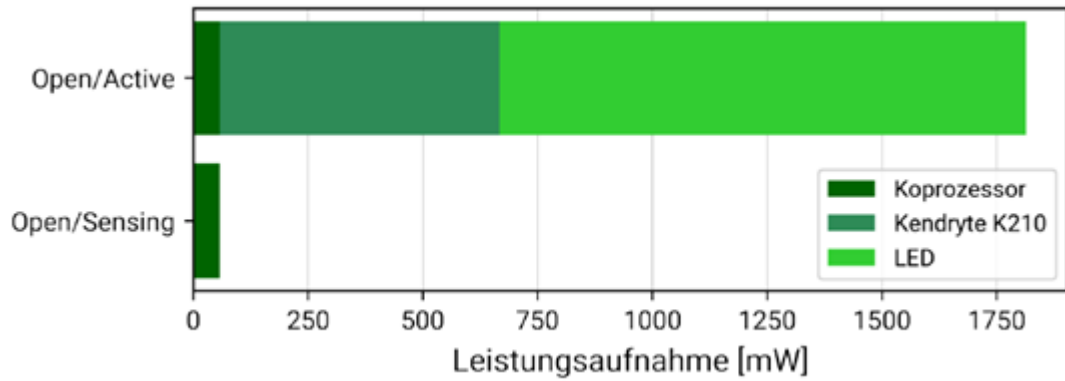


Abbildung 20: Leistungsvergleich Kameraauswertung (oben) und kapazitive Messung (unten)

Zum Training wurde auf historische Hummelvideos von apic.ai zurückgegriffen. Zusätzlich wurde der verschließbare Eingang für das Hummelvolk mit einer Kombination aus Zahnrädern und einem Motor in das System integriert und kann dadurch elektronisch geschlossen und geöffnet werden.

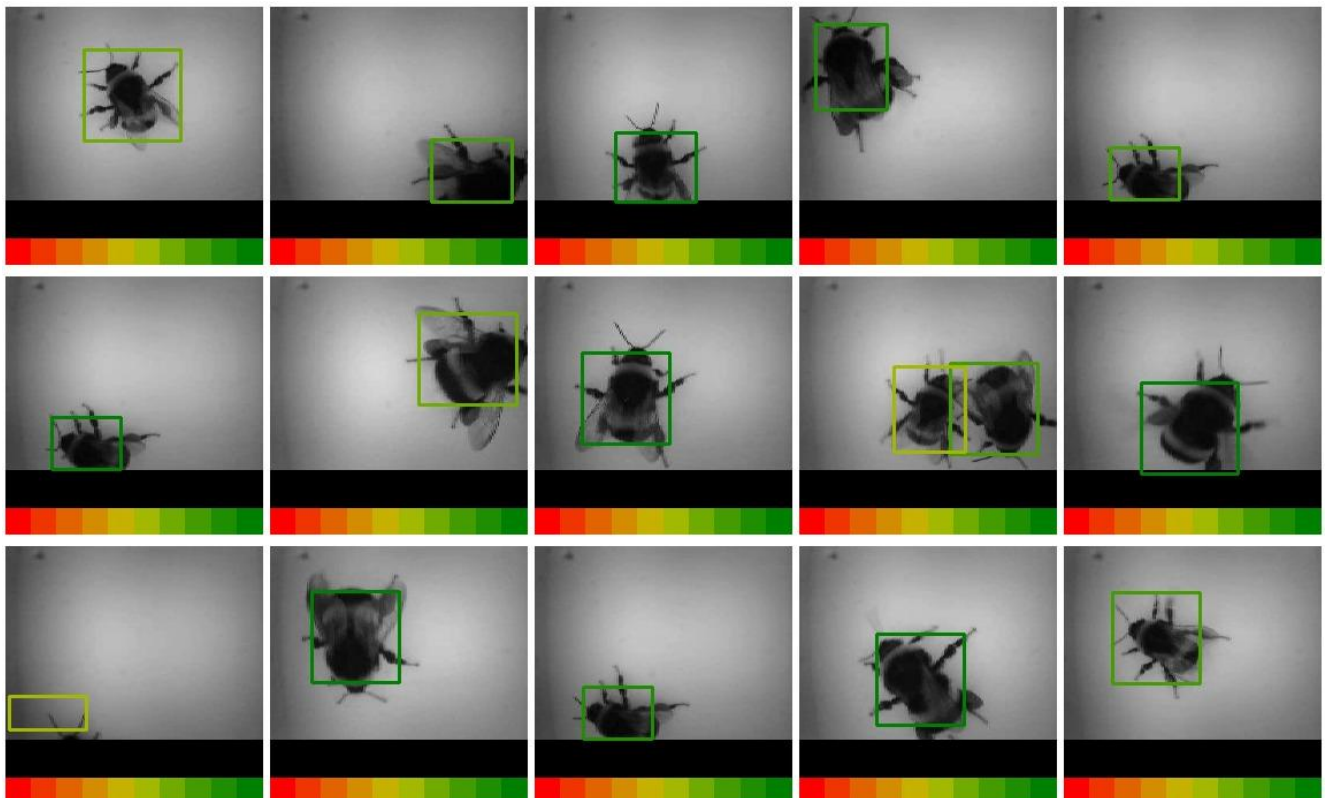
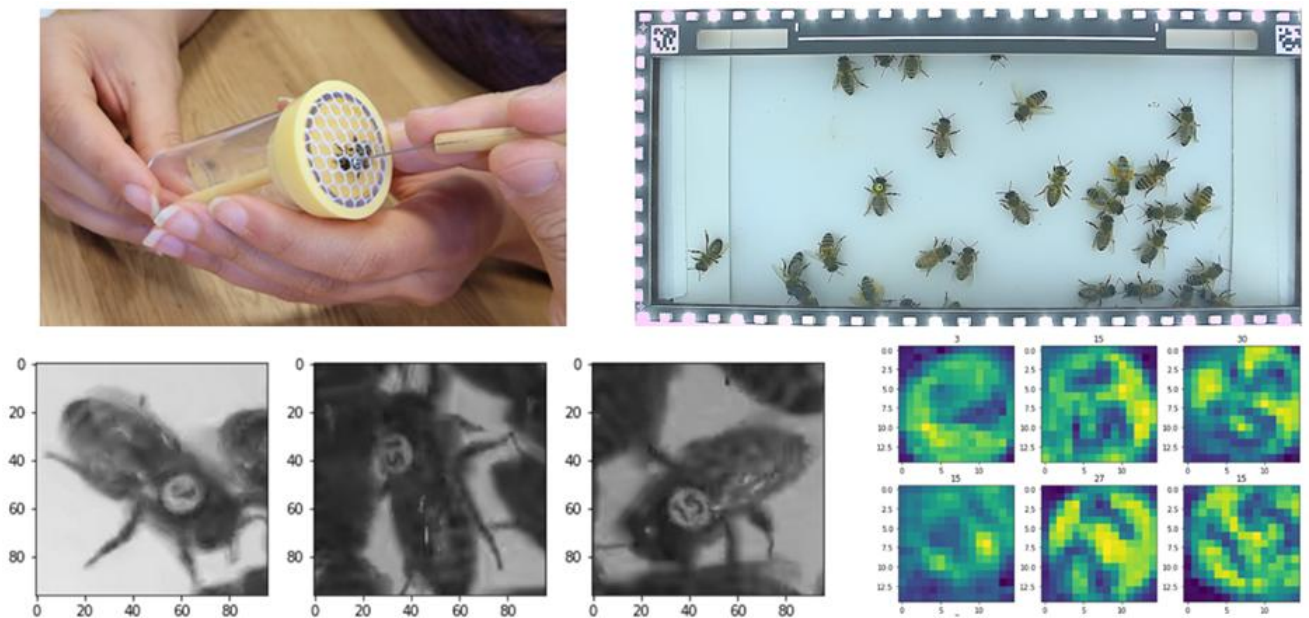


Abbildung 21: Hummel Erkennung live

In Abbildung 21 ist ein Ausschnitt aus dem ausgewerteten Videomaterial des Feldversuchs mit Angabe der Konfidenzen dargestellt. Unterhalb der Bilder sind die zehn Konfidenzstufen zwischen 0 und 1 von Rot bis Grün farblich ergänzt. Die Umrandungen der Hummeln entsprechen hierbei der Konfidenz nach diesen Farbstufen.

Außerdem wurde die Beobachtung einzelner Bienen als relevant im Konsortium identifiziert. Dabei soll die visuelle Erkennung der Biene, um eine individuelle Markierung ergänzt werden. Dadurch kann das Flugverhalten einzelner Bienen beispielhaft verfolgt werden, um so beispielsweise die Sammeldauer zu untersuchen. Die Bienen wurden dazu von eurofins mit Opalith Plättchen beklebt (Abbildung 22, oben links), durch das apic.ai Kamerasystem aufgezeichnet (Abbildung 22, oben rechts) und anschließend durch Methoden der Bildverarbeitung eine automatische Erkennung der Zahlen untersucht (Abbildung 15, unten).



*Abbildung 22: ReID PoC, vom Bekleben der Bienen (oben links), über das Live-Kamerabild (oben rechts), bis zum Extrahieren der Bienen mit ID (unten links) und schließlich der Erkennung des einzelnen ID (unten rechts)*

Der erste PoC im Frühjahr 2022 verlief dabei positiv und so wurde in Abstimmung mit apic.ai eine Überführung der Erkenntnisse auf produktive Algorithmen für die Fallstudien im Rahmen der Repellency Fallstudie umgesetzt.

Die Bienen wurden dazu von eurofins bei der Repellency Zeltstudie im Jahr 2022 mit Opalith Plättchen beklebt durch das apic.ai Kamerasystem aufgezeichnet und anschließend durch Methoden der Bildverarbeitung eine automatische Erkennung der Zahlen untersucht. Die

aufgezeichneten Daten konnten anschließend analysiert werden und eine erste Darstellung der Einzelflüge erzeugt werden (Abbildung 23).

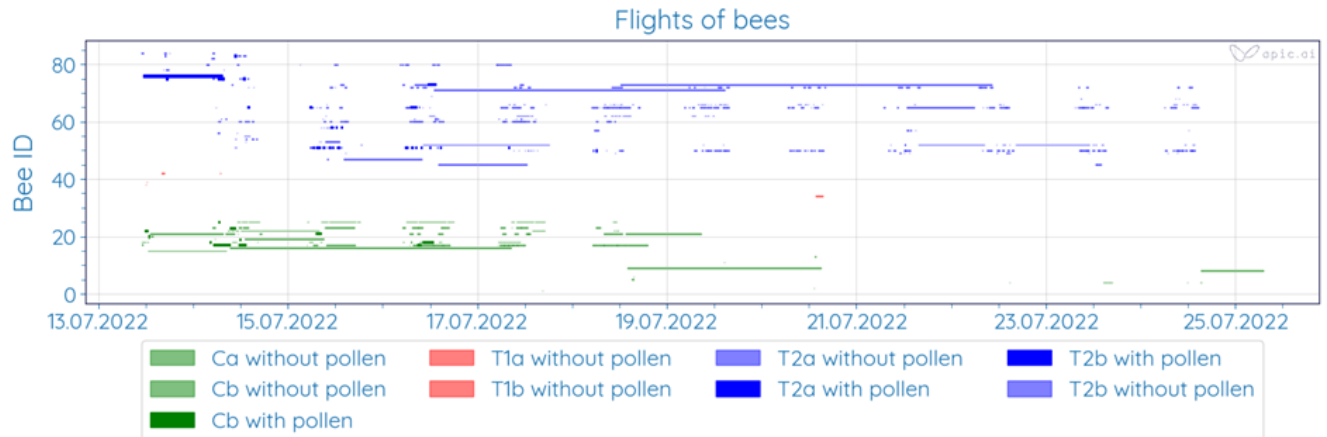


Abbildung 23: ReID der Bienen aus der Repellency Studie

Die Ergebnisse wurden vom Konsortium positiv bewertet, lediglich die beschränkte Anzahl der markierten Bienen wurde als nicht ausreichend identifiziert. In Vorbereitung der Studiensaison 2023 wurden daher einige technische Anpassungen umgesetzt. Zum einen wurde die Implementierung folgendermaßen angepasst:

- Pollen- und Markererkennung werden in einem Schritt im selben "Netz" ausgeführt (zusammengeführte fps-Geschwindigkeit ist in Abbildung 24 dargestellt). Wie abgebildet kann dabei eine Geschwindigkeit > 20 fps im Mittel stabil erreicht werden, was ein akkurates Tracking der Bienen weiterhin ermöglicht
- Bienen mit einem Marker  $\geq$  Schwellenwert werden gespeichert
- Alle gespeicherten Bienen werden anschließend manuell auf Marker überprüft

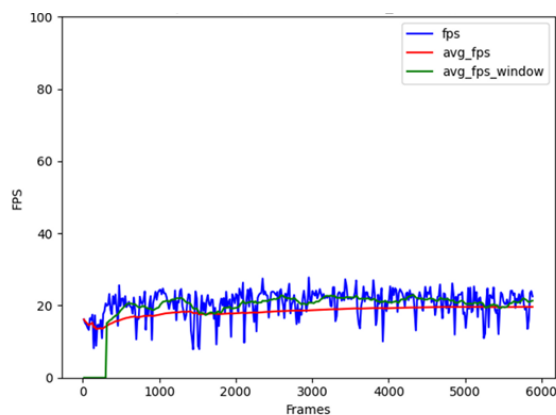


Abbildung 24: Geschwindigkeit der Bildverarbeitung auf dem Kamerasystem in fps über die Frames

Darüber hinaus wurden die Marker selbst erweitert. Anfängliche Versuche, bei Anbietern von Opalithplättchen im Imkereibedarf erweiterte Zahlenbereiche zu bekommen, scheiterten leider an Lieferschwierigkeiten in Folge des Ukraine-Konflikts. Daher wurde auf selbst gedruckte Sticker ausgewichen (Abbildung 25). Es wurde eine Kombination aus zwei Zeichen gewählt, die einen hohen Wiedererkennungswert aufweisen. Die Farbe Gelb als Trägermaterial hatte sich in den Versuchen als guter Kontrast erwiesen. Zusätzlich wurde ein schwarzer Balken zur Bestimmung der Ausrichtung eingefügt. Die gedruckten Folien wurden anschließend mit einem Lasercutter in die nötige Form ausgeschnitten und es konnten 992 unterscheidbare Marker erzeugt werden.



Abbildung 25: Selbst gedruckte Marker

Beim Start der Oomen Studie wurden Bienen durch Eurofins-Imker abgefangen und anschließend mit Markern beklebt (Abbildung 26). Dabei stellten sich die selbst hergestellten Marker als schwer handelbar heraus. Durch die flache Form passen sie sich nicht optimal der Physiologie der Bienen an, außerdem war die Größe nicht klein genug, um leicht durch die Fixierungsnetze zu passen. Außerdem wurde das Material teilweise von den Bienen selbst angefressen.



Abbildung 26: Beklebung der Bienen für die Oomenstudie

Darüber hinaus beschäftigte sich das FZI mit einer grundlegenden Anpassung der Netzstruktur auf dem Kamerasystem. Bisher folgt die Auswertung auf den *apic.ai* Geräten einem sequenziellen Ansatz. Erst werden Bienen erkannt, verfolgt und anschließend auf Eigenschaften, wie Pollen untersucht. Das FZI untersuchte einen alternativen Ansatz, der ein universelles Multinet einsetzt, mit dem Ziel, die Ausführungszeit zu verringern und somit auch den Leistungsbedarf zu reduzieren. Um einen Vergleich durchzuführen, wurden von *apic.ai* annotierte Bilddaten zur Verfügung gestellt, die reale Szenarien im Blickfeld beinhalten und einen Benchmark der Methoden zulassen. Abbildung 27 zeigt die Erzeugung der Trainingsdaten für das Multinet auf Basis der Netze der sequenziellen Auswertung. Jedes Eingabebild in voller Größe wird an den *Bee Teacher* eingespeist, der eine Heatmap für die Lokalisierung der Bienenzentren ausgibt. Die Lokalisierungsinformationen, die aus der Heatmap extrahiert werden, werden verwendet, um Ausschnitte von erkannten Bienen zu erstellen. Die Ausschnitte werden an die *Attribut-Teacher* weitergeleitet, die Heatmaps für die Lokalisierung des entsprechenden Attributs ausgeben. Die ausgeschnittenen Heatmaps werden auf dem schwarzen Hintergrund platziert, um die ursprüngliche Auflösung des Eingabebildes zu rekonstruieren. Die Eingabebilder und die drei Heatmaps in voller Größe werden für das Training des Multitasking Studenten verwendet.

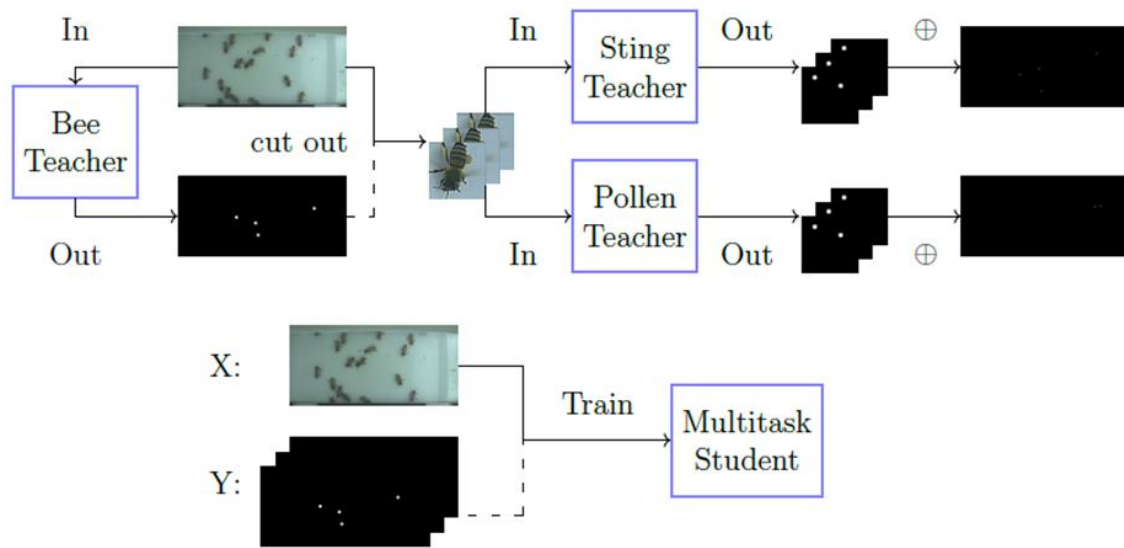


Abbildung 27: Multinet Ansatz

Dabei konnten bereits sehr gute Ergebnisse beim Training erzielt werden. In Abbildung 28 ist der Vergleich der Leistungsmetriken für die Erkennung von Bienen, Stacheln und Pollen Aufgaben für die Single-Task-Lehrermodelle, das Multitask-Schülermodell und das Baselinemodell dargestellt. Die Metriken umfassen durchschnittliche Präzision (AP), durchschnittliche Distanz (AD), Präzision (P), Rückgewinnung (R) und mittlerer absoluter Fehler (MAE). Fettgedruckte Werte zeigen die beste Leistung für die jeweilige Aufgabe und Metrik an.

	AP	AD	P	R	MAE
<b>Bee detection</b>					
Bee Teacher	0.98	4.16	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	<b>0.35</b>
Student	<b>0.99</b>	4.43	<b>0.97</b>	<b>0.99</b>	0.38
Baseline	0.85	5.37	0.96	0.95	0.6
<b>Stinger Detection</b>					
Stinger Teacher	<b>0.97</b>	<b>3.19</b>	0.97	<b>0.97</b>	<b>0.04</b>
Student	0.96	3.99	<b>0.98</b>	0.91	0.96
Baseline	0.9	3.54	0.92	0.9	0.95
<b>Pollen Detection</b>					
Pollen Teacher	0.85	3.96	<b>0.91</b>	0.85	<b>0.07</b>
Student	<b>0.9</b>	6.55	0.97	<b>0.90</b>	0.42
Baseline	0.83	<b>3.39</b>	0.87	0.35	2.72

Abbildung 28: Ergebnisse Multinet-Ansatz

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Multinet bei allen Aufgaben eine angemessene Leistung erzielt. Es ist in der Lage, Bienen zu erkennen, hat aber Probleme mit den weiteren

Aufgaben. Die durchschnittliche Präzision (AP) für die Stachelerkennung ist dabei noch kritisch niedrig, was auf eine große Anzahl von falsch-positiven Vorhersagen hinweist. Umgekehrt ist der AP-Wert für die Pollenerkennung groß; das Modell identifizierte jedoch nur 35 % der der Pollen im Testdatensatz. Dies verdeutlicht aktuell noch die Grenzen des Modells.

### 3.1.3 Geodatenanalyse und Flächenbewertung (AP3)

Das FZI stimmte sich mit den Partnern, vor allem mit disy, über die lokale Datenerhebung sowie weitere Kennwerte wie Wetter, Luftqualität, sowie Gewicht etc. ab. Auf dieser Basis entwickelte das FZI eine lokale Wetterstation, die über eine Schnittstelle an das Kamerasystem angeschlossen werden kann und ihre Daten in die Datenbank ablegt. Dabei wurden ein Sensorkonzept mit den Kennwerte Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlagsmenge, Temperatur, CO<sub>2</sub>, Luftdruck, Luftqualität (VOCs) und Ozon konzipiert, eine elektronische Leiterplatte (siehe Abbildung 29) entwickelt und eine Schnittstelle entworfen. In Abstimmung mit dem Konsortium wurde allerdings für die Feldstudien auf eine kommerzielle, lokale Wetterstation von eurofins und eine Wetterstation des LTZ am Lindenhof zugegriffen, die sich etwa 1 km entfernt zum OCELI Langzeitmesstand befand, um eine Vergleichbarkeit mit bisherigen und zukünftigen Studien durch sicherzustellen.

Der Funktionstest der Eigenentwicklung konnte aber erfolgreich abgeschlossen und diese integriert werden. Für zukünftige Entwicklung stellt die Wetterstation jedoch einen erheblichen Mehrwert da, da diese in Kombination mit dem OCELI Systems eine integrierte Umweltdatenerhebung bereitstellen und so die technische Gesamtlösung in OCELI erheblich erweitern kann.

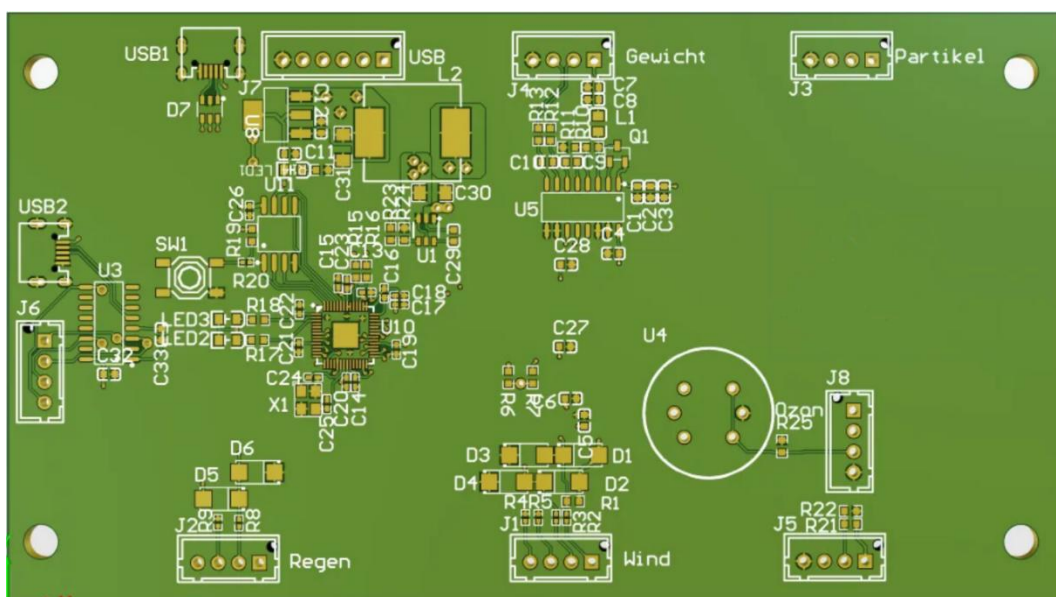


Abbildung 29: Elektronische Leiterplatte der Wetterstation

### **3.1.4 Ökologische Systemanalyse (AP4)**

Das FZI tauschte sich mit den Partnern über die Möglichkeiten des BEEHAVE Modells und die Anforderungen an die lokale Datenerfassung aus, damit die Fallstudien Daten zur Modellverbesserung nutzen können.

### **3.1.5 Systemintegration Monitoringtechnologie (AP5)**

Das FZI unterstützte die Partner bei der Auswahl möglicher Optimierungen des Kamerasystems für den angedachten Anwendungsfall.

### **3.1.6 Fallstudien (AP6)**

Begleitung der Partner bei der Durchführung der Fallstudien, Unterstützung bei der Auswahl möglicher Optimierungen des Kamerasystems und der Übertragbarkeit der PoC Ergebnisse.

### **3.1.7 Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination (AP7)**

Als Konsortialführer kümmerte sich das FZI um die Terminfindung, Organisation und Vorbereitung der Projekttreffen und der zweiwöchentlichen Statustreffen. Außerdem wurde eine Projektinfrastruktur zur Dokumentation und Datenaustausch auf FZI eigenen Servern eingerichtet.

In Abstimmung mit den Partnern wurde durch das FZI eine Pressemitteilung vorbereitet und verfasst, um deutschlandweit Aufmerksamkeit für das Vorhaben zu schaffen und mögliche relevante Interessengruppen zu adressieren.

Im Jahr 2022 wurden außerdem umfangreiche Veröffentlichungen auf Basis der Ergebnisse von OCELI vom Konsortium erstellt.

## **3.2 Vergleich zu den ursprünglichen Zielen (Zielabweichungen begründen)**

Im Verlauf des Projekts konnten nahezu alle definierten Ziele erfolgreich erreicht werden. Eine Ausnahme bildet das ursprüngliche Ziel, eine umfassende Datenstromanalyse zur Anomaliedetektion und Identifizierung von Optimierungspotenzialen durchzuführen. Im Projektverlauf zeigte sich, dass dies aufgrund des technischen Fortschritts bei der Übertragbarkeit von Algorithmen auf das Kamerasystem nicht mehr notwendig war. Die Algorithmen konnten direkt in das Kamerasystem integriert werden, wodurch eine stark

kondensierte Datenrepräsentation ohne Cloud-Streaming-Anbindung möglich wurde. Diese Entwicklung vereinfachte die Systemarchitektur erheblich und führte zu einer robusteren Lösung.

Eine eigens entwickelte Wetterstation kam in den Feldstudien nicht zum Einsatz. Stattdessen entschied sich das Konsortium, auf etablierte Wetterstationen von Eurofins und dem LTZ am Lindenhof zurückzugreifen, um den Erfolg der Studien sicherzustellen. Die Funktionstests der Eigenentwicklung verliefen jedoch erfolgreich, und die Wetterstation bietet ein vielversprechendes Potenzial für zukünftige Anwendungen, insbesondere im Bereich der integrierten Umweltdatenerhebung.

Zusätzlich wurde eine eigene Bienenstockwaageneinheit entwickelt und erprobt, die in den Feldstudien jedoch auf technische Herausforderungen stieß, insbesondere bei der Temperaturkompensation sowie Effekten wie der Durchfeuchtung der Holzbienenstöcke. Ein deutlicher Mehrwert der Eigenentwicklung wurde nur dann gesehen, wenn auch die Flugaktivität der Bienen präzise messbar gewesen wäre. Da dies nicht realisiert werden konnte, boten kommerziell verfügbare Waagensysteme den gleichen Informationsgehalt und wurden daher bevorzugt eingesetzt.

Ein weiteres Ziel, die Analyse von Videobildern zur Identifizierung von Bienenkrankheiten sowie von Larven und Puppen, wurde nicht umgesetzt. In der Anforderungsanalyse wurden andere Schwerpunkte priorisiert, die eine höhere Relevanz für die Projektziele hatten. Trotz dieser Abweichungen wurde die technische Gesamtlösung nicht beeinträchtigt, und die entwickelten Technologien bieten eine solide Grundlage für mögliche Erweiterungen in der Zukunft.

Nachfolgend findet eine Detaillierung der erreichten Ziele und Meilensteine statt.

### **3.2.1 Erreichung der Meilensteine**

#### **MS-1: Anforderungsanalyse, unspezifische Datenerhebung sowie Aufbau eines Basissystems**

##### **Ziel:**

Eine detaillierte Anforderungsbestimmung an das OCELI Gesamtsystem, sowie der Aufbau eines Basissystems zur Datenerhebung als Grundlage zur explorativen Merkmalsextraktion.

## **Ergebnisse:**

☑ Das Konsortium traf sich am 15. Juli 2021 in Karlsruhe. Ergebnis dieses Treffens war u.a. die Schwerpunktlegung auf zwei OCELI Bereiche – die Landschaftsbewertung und die Risikobewertung. Für beide wurden Ziele und Ergebnisse festgehalten, sowie eine Timeline für Fallstudien, die noch 2021 durchführbar sind. Weiterhin wurden Gesprächspartner identifiziert, mit denen bezüglich der beiden Bereiche Gespräche geführt werden sollten, um die Anforderungen und Bedarfe besser zu verstehen und diese von Beginn an in die Entwicklung einfließen zu lassen. Darüber hinaus gab es einen kontinuierlichen Austausch (min alle zwei Wochen) über die Fortschritte in den verschiedenen Arbeitspaketen, deren Ergebnisse in einem fortlaufenden Protokoll festgehalten wurden.

☑ Es wurde gemeinsam ein Lasten- und Pflichtenheft erstellt, das seit Mitte 2021, parallel zur Durchführung der ersten Fallstudien, kontinuierlich entwickelt und fortgeschrieben wurde. Darin wurden insbesondere Anforderungen an die Hardware festgehalten, sowie erste Erkenntnisse zu den am Standort zu erfassenden Daten, z.B. Akku-Größe und Gefahrgutklasse, Waagenintegration, Dauerbetrieb, Sicherstellung von Internet- und Echtzeitfähigkeit. Im Oktober 2021 wurden erste Tests mit dem Demonstrator des OCELI Systems durchgeführt. Dabei wurden Erfahrungen gesammelt und Verbesserungspotenziale identifiziert, die wiederum in das Lasten- und Pflichtenheft flossen.

## **MS-2: Präsentation der ersten Ergebnisse auf einer Fachkonferenz (ICPPR)**

### **Ziele:**

Zur Validierung der festgelegten Anforderungen wurden die Ergebnisse aus der ersten Saison aufbereitet und auf einer Fachkonferenz präsentiert. Hierbei wurden anhand einer Abschätzung der möglichen Datenqualität und des Spektrums der multisensoriellen Datenquellen die weiteren Projektperspektiven geschärft.

### **Ergebnisse:**

☑ Wie geplant wurde Öffentlichkeitsarbeit durch Präsentation des Fortschritts und der ersten Erkenntnisse durchgeführt. Siehe 1.7 *Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination (AP7)*.

### **MS-3: On-Device Demonstrator ist einsatzbereit und Szenarien für Fallstudien wurden definiert**

#### **Ziele:**

Für die Durchführung der spezifischen Fallstudien wurden echtzeitfähige Algorithmen für die Extraktion der relevanten Merkmale und die Gewinnung der entsprechenden Einblicke entwickelt. Die Monitoringsysteme wurden optimiert und in der für die Erhebung notwendigen Anzahl produziert. Die Speicher- und Verarbeitungsarchitektur für die Datenströme sowie Massen- und Geodaten wurde entworfen und initial aufgesetzt. Die erforderlichen Daten aus der Fernerkundung und anderen Quellen (Open Data, amtliche Daten) wurden in ein Datenbanksystem eingespeist und erstmals analysiert. Das Fallstudien-Design wurde so konzipiert und vorbereitet, dass die aufgestellten Hypothesen damit überprüft werden können.

#### **Ergebnisse:**

☑ Für die Fallstudien wurde eine ausreichende Menge an funktionsfähigen Demonstratoren mit den Partnern hergestellt, die Schnittstellen für weitere Sensoren für die Anbindung von Waagen zur Erfassung des Stockgewichts und der Wetter und Umwelt Sensorik bereitstellen. Zusammenfassend konnten die Fallstudien 2022 erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen werden. Durch übliche Verzögerungen bis zur fehlerfreien Datenerhebung an den Standorten der Langzeitstudien, wodurch die Rapsblüte nicht aufgezeichnet werden konnte, wurde dieser Zeitraum im Jahr 2023 wiederholt. Dafür wurde die Definition der Fallstudien/Stresstests für die zweite Bienensaison in Form eines Studienplans gemeinsam entwickelt.

### **MS-4: Demonstrator der Gesamtlösung ist einsatzbereit**

#### **Ziele:**

Die Integration aller Teildatenströme auf einer gemeinsamen Plattform ist abgeschlossen und das angepasste Messsystem als Demonstrator steht in ausreichender Anzahl zur Verfügung, sodass es in einem simulierten Anwendungsszenario getestet werden kann. Dabei steht weiterhin die Validierung der technischen Grundlagen im Fokus.

#### **Ergebnisse:**

☑ Integration aller Teildatenströme

- ✓ Die Forschung zur Erfassung und Integration der lokalen Daten unterschiedlicher Quellen ist abgeschlossen (AP5).
- ✓ Studien zum Test der Gesamtlösung in simulierten Anwendungsumgebungen mit unterschiedlicher Landnutzung sowie Stress-Experimente wurden wie in MS3 definiert durchgeführt und die aufgenommenen Daten wurden bzgl. der folgenden Aspekte ausgewertet:
  - ✗ Anomaliedetektion und Identifizierung von Optimierungspotentialen mittels Datenstromanalyse. Das ursprüngliche Ziel einer gesammelten Datenstromanalyse wurde im Projektverlauf als nicht sinnvoll durchführbar gesehen. Durch den technischen Fortschritt bei der Übertragbarkeit der Algorithmen auf das Kamerasystem selbst konnte bereits eine sehr kondensierte Datenrepräsentation erreicht werden und auch die Notwendigkeit einer dauerhaften Cloud-Streaming-Anbindung muss nicht mehr gewährleistet werden.
- ✓ erste Datenbank für Pollenfarben zur Bestimmung der Vielfalt von Trachtquellen wurde erstellt.
- ✓ Visualisierung von Trachtlücken sowie von Veränderungen der Vielfalt des Trachtangebots im Zeitverlauf ist möglich.
- ✓ Hardware-Messsystem als Demonstrator wurde finalisiert
- ✓ Anpassungen hinsichtlich der Möglichkeit zur Erreichung der in AP1 definierten Anforderungen wurden durchgeführt, z.B. Optimierung des Energiemanagements.
- ✓ Die Skalierbarkeit für eine Sicherstellung der Anschlussfähigkeit und Verwertung wurde im Rahmen einer Risikoanalyse insbesondere bzgl. der folgenden Teilaspekte untersucht
- ✓ Kompatibilität mit der gängigen Praxis bei der Studienplanung und -durchführung.
- ✓ Hardware-Produktentwicklung und weitere Schritte zu einem marktfähigen Produkt.
- ✓ Softwarekomponenten für einen möglichen anschließenden wirtschaftlichen Betrieb.

## **MS-5: Projektabschluss und Abschlusspräsentation**

### **Ziele:**

Alle Projektarbeiten wurden abgeschlossen und dokumentiert. Letzte Konsolidierungen der Gesamtlösung (Hardware, Software, Modelle, Workflows) wurden realisiert. Die nachhaltige Nutzbarkeit der Projektergebnisse wurde vorbereitet. Alle Voraussetzungen für eine zügige wirtschaftliche und wissenschaftlich-technische

Verwertung wurden geschaffen. Die Gesamtergebnisse wurden der Fachöffentlichkeit vorgestellt.

## Ergebnisse:

- ✓ Die Studie zur Möglichkeit unterschiedliche Flächen bezüglich ihrer Habitateigenschaften und deren Eignung für Bestäuber zu unterscheiden, wurde in einem simulierten professionellen Studienaufbau mit dem technischen Gesamtsystem durchgeführt.
- ✓ Präsentationen der im Rahmen von OCELI neu geschaffenen Möglichkeit zum Monitoring von Kohorten markierter Individuen wurde auf der ICPPR 2024 gehalten. Im Anschluss wurden im Rahmen von Gesprächen mit Wissenschaftlern und potenziellen Kunden Verwertungsperspektiven im Bereich der Risikobewertung von Pflanzenschutzmitteln diskutiert.
- ✓ Präsentationen der OCELI Gesamtlösung und der erzielten Ergebnisse im Rahmen der Projekt-Abschlussveranstaltung in der Berlin am 17.10.2024 und der BMEL Innovationstage vom 4. bis 6. November in Berlin.

## 3.3 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung

Bis auf zeitliche Abweichung durch den verzögerten Start und damit der Verschiebung der Fallstudien, konnten alle Arbeitspakete fristgerecht erreicht werden. Auch beim Kostenplan ergaben sich keine wesentlichen Änderungen. Aufgrund der Erkrankung eines Mitarbeitenden eines Konsortialpartners wurde das Projekt kostenneutral bis Ende 2024 verlängert.

### 3.3.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

#### Personalkosten:

Mit der Durchführung der Arbeiten waren wechselnde wissenschaftliche mitarbeitende Personen je nach benötigter Qualifikation im Zeitraum des Projektes beschäftigt. Zusätzlich unterstützte eine erfahrene Führungskraft beim Projektstart und bei einfachen Implementierungsarbeiten kamen wissenschaftliche Hilfskräfte zum Einsatz.

	2021	2022	2023	2024
<b>Personen-Monate (PMs)</b>	11,00	11,00	11,75	0,25
<b>Gesamt</b>	34 PMs			

#### **Reisekosten:**

Es wurden während der Laufzeit verschiedene Reisen unternommen, um einen kontinuierlichen Austausch mit Projektpartnern (Workshops, Konsortialtreffen), die Feldstudie durchzuführen und auf Veranstaltungen des BMEL das Projekt vorzustellen. Hierfür fielen 1.464,04 € an.

#### **Materialkosten:**

Zur Entwicklung des Demonstrators/Wetterstation fielen vor allem Materialkosten für Bauteile in Höhe von 939,20 € an.

### **3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit**

Das FZI entwickelte die maßgeblichen KI-Algorithmen und ihre energieoptimierte Echtzeit-Implementierung, ohne die die autonome Messstation nicht einsatzfähig gewesen wäre, ergänzte sie um ein erweiterbares Sensormodul und steuerte das Konsortium so effizient, dass Doppelarbeit vermieden und das Budget eingehalten wurde; damit waren Umfang und Tiefe der FZI-Beiträge zugleich notwendig und angemessen.

### **3.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Das Projekt OCELI liefert mit seiner entwickelten Plattform für das automatisierte Bestäubermonitoring eine technisch und wissenschaftlich anschlussfähige Grundlage für zahlreiche Anwendungsbereiche. Die energieautarke Kombination aus KI-basierter Bilderkennung, modularer Sensorik und ökologischer Modellintegration ermöglicht eine präzise, skalierbare Erfassung von Umweltwirkungen auf Bestäuberinsekten. Die erzielten Ergebnisse sind sowohl in der ökotoxikologischen Bewertung als auch in der landwirtschaftlichen Praxis verwertbar und bieten hohes Potenzial für den Technologietransfer in Folgeprojekte, praxisorientierte Anwendungen sowie in wissenschaftliche Weiterentwicklungen im Bereich der Umwelt- und Agrarinformatik.

### **3.6 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Bereich der entwickelte Algorithmen, um Pollenfarben, Marker-IDs und individuelle Bienen gleichzeitig zu erkennen, um Parameter zur Bewertung der Bestäuberaktivität automatisiert zu

erfassen, sind uns während der Durchführung keine anderen Fortschritte auf dem Gebiet bekannt. Ebenso sind uns keine Forschungen zum Thema Wetter- und Geodaten verknüpfen, um ökologische Zusammenhänge zwischen landwirtschaftlicher Praxis und Bestäuberpopulationen quantifizierbar zu machen, bekannt.

### **3.7 Erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF.**

Neben öffentlichkeitswirksamen Darstellungen des Projekts fand eine Beteiligung an den wissenschaftlichen Publikationen der Partner statt. Genaue Details finden sich in Kapitel 2.