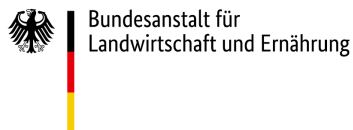


Gefördert durch:



Projektträger



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Abschlussbericht

# Kurze Darstellung (Sachbericht Teil I) zum Teilvorhaben „Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“ – OCELI von apic.ai

### Konsortium:

FZI Forschungszentrum Informatik	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



Förderkennzeichen

281C307B19

Laufzeit:

07.06.2021 - 31.12.2024

Koordinator:

FZI Forschungszentrum Informatik

## **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, das die Aktivität und den Zustand von Bestäubern automatisiert erfasst, mit Umwelt- und Geodaten kombiniert und mithilfe ökologischer Modelle wie BEEHAVE und Bumble-BEEHAVE auswertet. 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. 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.

## **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.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat

Projektträger



Bundesanstalt für  
Landwirtschaft und Ernährung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Abschlussbericht

## Eingehende Darstellung (Sachbericht Teil II) zum Teilvorhaben

### „Bienenbasiertes Biomonitoring zur Erschließung der synergetischen Wirkmechanismen von Landwirtschaft und Bestäuberinsekten“ – OCELI von apic.ai

#### Konsortium:

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



Förderkennzeichen

281C307B19

Laufzeit:

07.06.2021 - 31.12.2024

Koordinator:

FZI Forschungszentrum Informatik

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ergebnisse</b>	<b>2</b>
1.1 Überblick	2
1.2 Algorithmenentwicklung	4
1.3 Monitoringtechnologie	6
1.4 Pflanzenschutzmitteltests	9
1.5 Geodatenanalyse	13
1.6 Ökologische Systemanalyse	15
<b>2 Publikationen und Wissenstransfer</b>	<b>17</b>
2.1 Beiträge zur Wissenschaft	17
2.2 Öffentlichkeitsarbeit	20
<b>3 Ergebnisdarstellung von apic.ai</b>	<b>22</b>
3.1 Umsetzung der Arbeitspakete	22
3.2 Erreichung der Meilensteine	29
3.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	34
3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit	34
3.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses	34
3.6 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	35

# 1 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die zentralen Ergebnisse des Projekts für das gesamte Konsortium beschrieben. Detailliertere Ausführungen zur Erzielung der Ergebnisse von apic.ai finden sich in Kapitel 3.

## 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:

- 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.

---

<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.

- 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 Algorithmenentwicklung

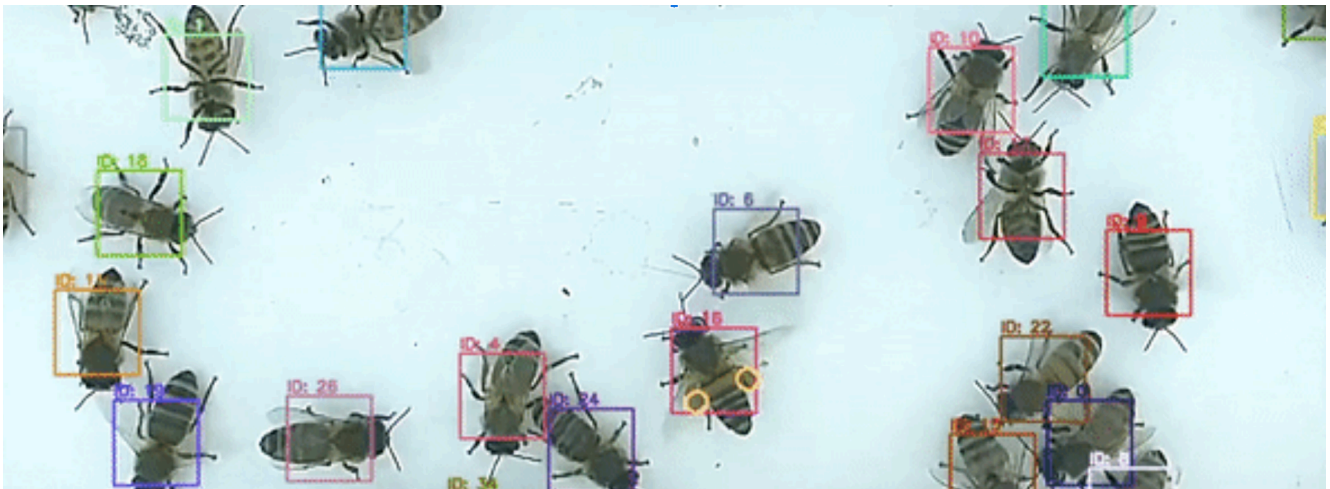


Abbildung A: Visualisierung der Arbeit des Algorithmus beim Tracking der Bienen und der Pollenerkennung.

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 A). 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.



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.

## 1.3 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 C: 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 D: 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 Dokumente, 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 E: Prototypischer Aufbau eines Monitoringsystems für bestimmte Wildbienen.

- Zudem gab es eine intensive Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten mittels automatisiertem Monitoring 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.

#### 1.4 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 in 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>.



Abbildung F: 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

<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.

normalisierte sich die Aktivität binnen wieder. In der Gruppe wurde durch Eurofins eine deutlich geringere Mortalität gemessen.

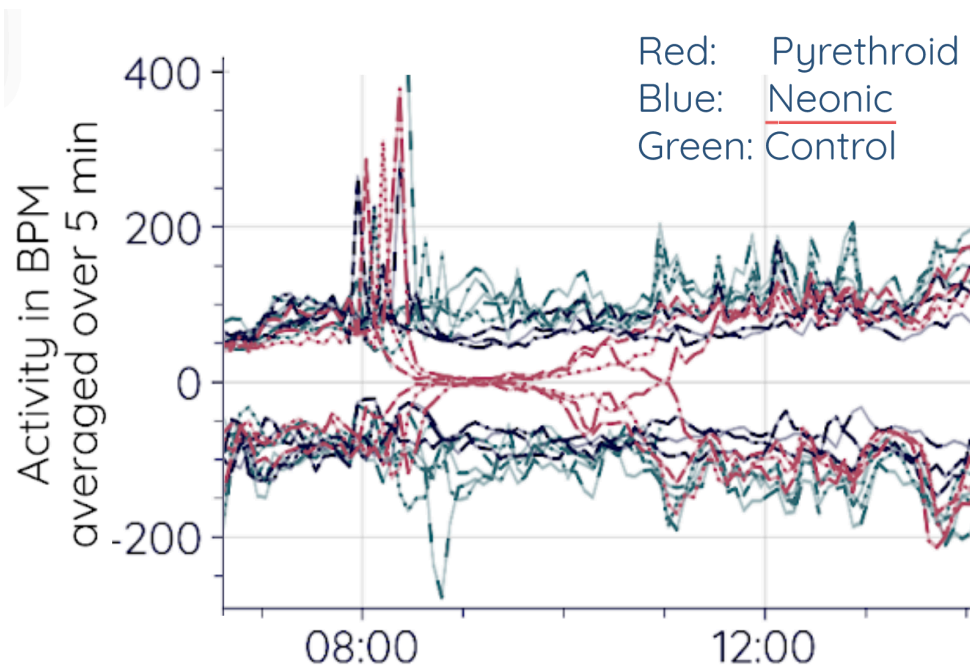


Abbildung G: Visualisierung minütlich gemessener Bienenaktivität im Versuch mit drei Gruppen. Die vier Völker, die Kontakt mit der repellenten Substanz hatten (rot), stellten temporär die Aktivität ein.

Der Versuch eröffnet die Perspektive Pflanzenschutzmittel in Kombination mit repellenten Substanzen zu applizieren, um den Kontakt von Bienen und anderen Bestäubern während der Applikation 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 H. 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.

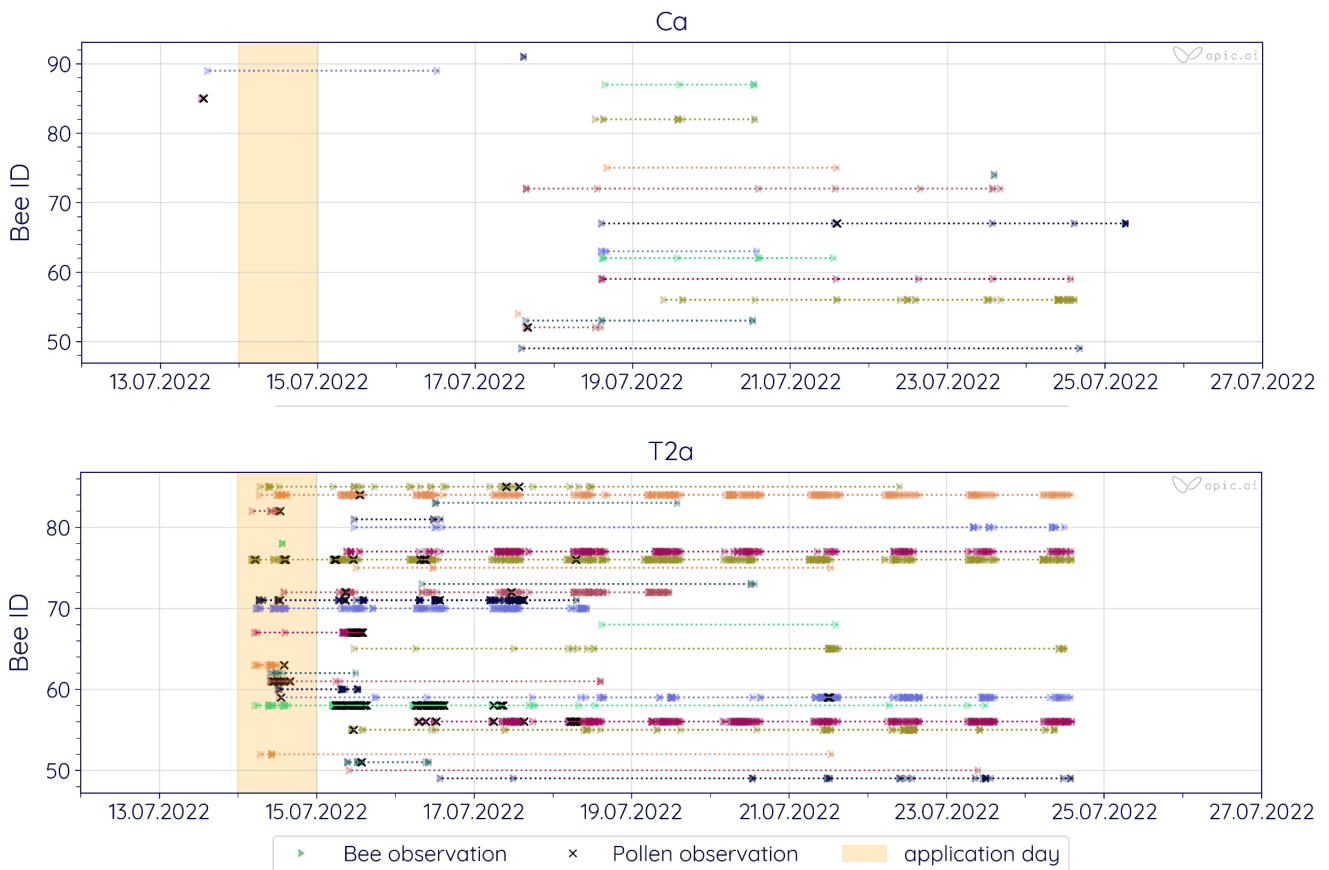


Abbildung H: Darstellung der Aktivität von frisch geschlüpften Bienen der Kontrollgruppe (oben) und der exponierten Gruppe (unten).

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.

## 1.5 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 großstrukturierten 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 großstrukturiert geprägten Königslutter über weite Teile des Jahres aktiver waren und mehr Nahrung in Form von Pollen sammeln konnten als jene im kleinstrukturierten Stutensee.

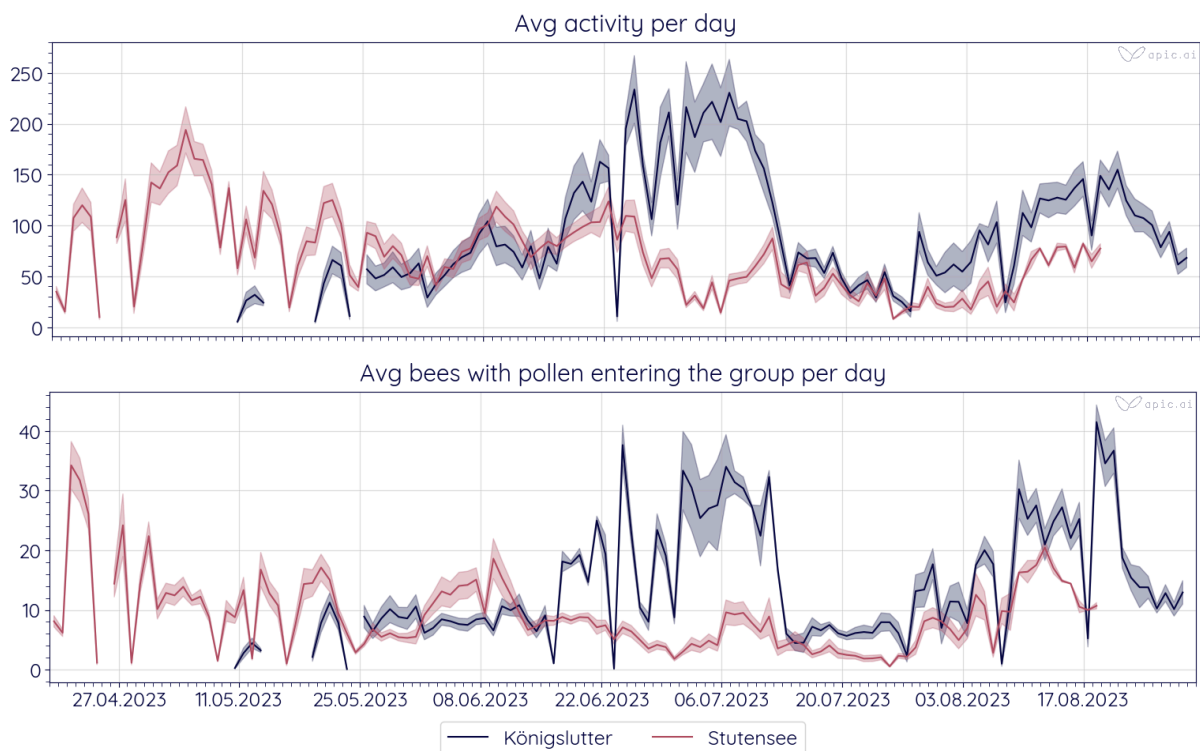


Abbildung I: Darstellung der Messwerte von zwei Gruppen von Bienenvölkern an strukturell verschiedenartigen Standorten im Jahresverlauf - durchschnittliche Einflugaktivität in Bienen pro Minute (oben) und durchschnittlicher Polleneintrag in Bienen mit Pollen pro Minute (unten). Der schattierte Bereich zeigt Unsicherheit und Variabilität innerhalb jeder Gruppen. 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.

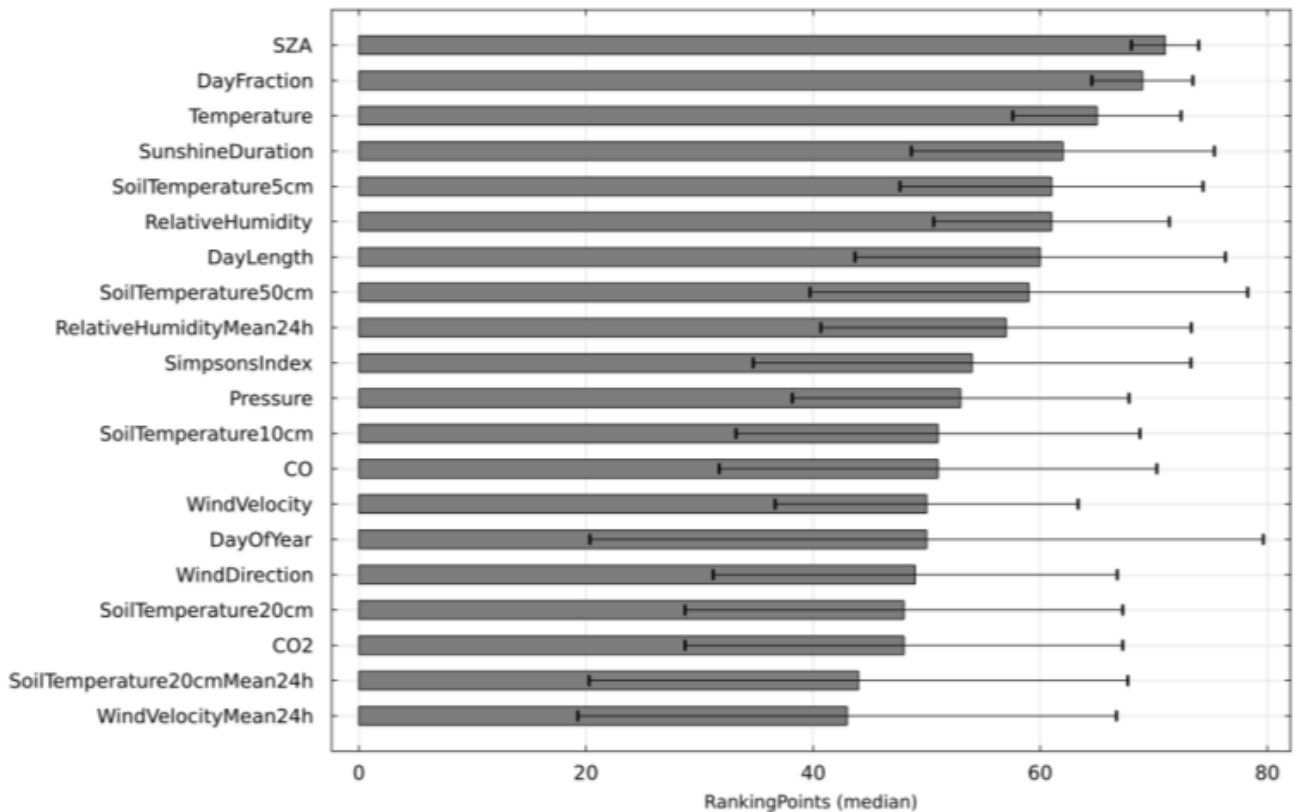


Abbildung J: Darstellung der 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von Bienenaktivität und Nahrungseintrag, basierend auf Daten von 2022 und 2023, aggregiert über verschiedene Analysen.

## 1.6 Ökologische Systemanalyse

Untersuchungen zur Erklärbarkeit von Effekten im Freiland mittels 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

### 2.1 Beiträge zur Wissenschaft

#### 2.1.1 Beiträge in wissenschaftlichen Journals

- 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-STEWARD: 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., Bargaen 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 Neonicotinoiden 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

- Mielke, Vincent „Vorhersage der Aktivität von Bestäuberinsekten anhand von Umweltfaktoren“, Bachelor-Thesis Hochschule Karlsruhe, 2022.
- Hartmann, Thomas „Entwicklung eines Systems zur Beobachtung und Bewertung von Hummelvölkern, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.

- Lammers, Dominik, Masterarbeit, Universität Osnabrück, „Implementierung neuer Pollen- und Eierlege-Module und Analyse des Einflusses auf die simulierte Dynamik der Bienenkolonie im BEEHAVE-Modell“
- Luttermann, Max „Advancing the application of a bumblebee simulation model to the national scale“. Master-Thesis, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2024
- Wagner, Jan „Automatisierte Erfassung der lokalen, floralen Diversität mittels Computer Vision, Master-Thesis KIT Karlsruhe, 2022.
- Hermann, Marius „Vorhersage und Mustererkennung der Aktivität von Apis Mellifera anhand von Umweltfaktoren“, 2023.
- Slobodyanik, Anastasia „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. [Link](#).
- 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 Geobranche.de 22.09.2022, abrufbar unter <https://www.geobranche.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 von apic.ai

Nachfolgend findet eine umfassende Darstellung der spezifischen Arbeitsinhalte und Ergebnisse von apic.ai statt.

#### 3.1 Umsetzung der Arbeitspakete

AP1: Spezifikation der Gesamtlösung

- Identifikation, Konsolidierung und Weiterdenken von Anwendungsszenarien auf wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Ebene, basierend auf dem Austausch mit potenziellen Anwendern, z.B. in Bezug auf Repellenz-Effekte, Homing-Studien, die Messung von Effekten auf Ebene von Kohorten markierter Individuen und die Machbarkeit des Aufbaus einer Pollenfarben-Datenbank und die Möglichkeit den Effekt von Greening-Maßnahmen zu bewerten.
- Erarbeitung, Präzisierung, Planung von wissenschaftlichen Studiensetups zum Testen der notwendigen Funktionalitäten in den Studienjahren. Dies beinhaltete auch die Erstellung und Fortführung des Lasten- und Pflichtenheftes.
- Sammlung von Erfahrungen mit der Technologie und der Zusammenarbeit unter den Konsortialpartnern während der Fallstudien. Entwicklung von Prozessen und Dokumenten zur Optimierung der Zusammenarbeit unter den Partnern. Erprobung während der Fallstudien und Ableitung von Erkenntnissen für weiteren Verbesserungsmöglichkeiten in der Zukunft.
- Fortwährende Bewertung der Ergebnisse betreffend die wirtschaftliche und technische Sinnhaftigkeit der Weiterentwicklung zu Lösungen, die am Markt angeboten werden können.
- In enger Zusammenarbeit mit 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) die Aufteilung von Zuständigkeit, Berechtigungen und Restriktionen durch Service Level Agreements,
  - (2) die Dokumentation von Eingriffen bei technischen Problemen durch verschiedene Parteien in verschiedenen Dokumente, je nachdem, ob diese vor Ort oder aus der Ferne bearbeitet wurden,
  - (3) die Definition, Speicherung und Übergabe von "Rohdaten" und die Zuständigkeit für deren 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, insbesondere der Messtoleranzen, vor und während der Datenaufnahme sowie deren Dekommissionierung nach Studienende.

#### AP2: Algorithmenentwicklung zur Merkmalsextraktion

- Anwendung der echtzeitfähigen Algorithmen, die im Rahmen von OCELI entwickelt wurden für die Erhebung der in den jeweiligen Fallstudien relevanten Parameter (Aktivität, Polleneintrag, Pollenfarben, Marker) im Demonstrator des Monitoringsystems.
- Zusammenarbeit mit dem FZI bei der Entwicklung und Verfeinerung eines zweistufigen Ansatzes zur Analyse der Bienenbilder mittels neuronaler Netze. Zunächst werden KI-basiert Marker erkannt und parallel mehrere Bilder pro Biene auf das Vorhandensein von Markern untersucht und, sortiert nach der Farbe der Marker, gespeichert. Im zweiten Schritt werden die Bilder dann manuell von zuvor geschulten Personen mithilfe eines Computerprogramms annotiert. Dieser Ansatz dient auch dazu, die Anforderungen der guten Laborpraxis an die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. apic.ai implementierte die Software entsprechend den Anforderungen der Fallstudien auf seinen Monitoringsystemen.
- Referenzerhebungen:

- o apic.ai begleitete die Annotation der Daten in Abstimmung mit Eurofins. Hier ein Beispielbild der Rohdaten mit einer markierten Biene:



- o Aufnahme von Referenzwerten für die KI-gestützten Farbanalysen der Pollenproben aus den Langzeitstudien, in denen die Bestäuberfreundlichkeit der Landschaftsstrukturen erhoben wurde, mithilfe des am FZI entwickelten „Lichtdoms“. Zusätzlich erfolgt die Ermittlung der Probengewichte als Referenzwerte für die Menge des Polleneintrags.



- Unterstützung des FZIs bei der Einschätzung der Machbarkeit, der im Antrag als durch visuelle Analyse möglicherweise automatisierbaren Tätigkeiten, mit Erfahrungswissen aus der Sichtung historischer Daten bei der Studiengestaltung, Algorithmenkonzeption und Datenauswertung:
  - o Zuordnung multispektral aufgezeichneter Pollenbilder zu Pflanzenarten - umgesetzt.
  - o Automatisierte Erkennung von individuell markierten Bienen - umgesetzt.
  - o Detektion von Larven und Puppen, die aus dem Volk getragen werden. Verhältnis von Aufwand zu Nutzen als zu gering eingeschätzt - nicht wirtschaftlich umsetzbar.
  - o Manuelle Erhebung der Volksstärke durch automatisierte, visuelle Analyse. Verhältnis von Aufwand zu Nutzen als zu gering eingeschätzt - nicht wirtschaftlich umsetzbar.
  - o Erkennung von Krankheiten und Parasitenbefall (z.B. Varroa). Aussagekraft wird nach Rücksprache mit Experten als nicht hoch genug eingeschätzt - nicht sinnvoll.

#### AP3: Geodatenanalyse und Flächenbewertung

- Auswertung und Aufbereitung der während der Langzeit-Studien gesammelten und zur Analyse in ein Labor geschickten Pollenproben, als Referenzerhebung für die Diversität der lokalen Flora im Zeitverlauf der Bienensaison.

- Austausch über die kundenseitigen Anforderungen an das Echtzeit-Reporting von Daten und deren Visualisierung, auch bezogen auf manuelle Erfassung unter dem Standard der Guten Laborpraxis (GLP).
- Aufbereitung von OCELI Studiendaten und der Daten historischer Studien für standortbezogene Auswertungen durch disy.
- Auswertung und Aufbereitung der 2022 und 2023 erhobenen Daten zum Nahrungsangebot von Bestäubern für die Bewertung der Bestäuberfreundlichkeit von verschiedenen Landschaftsstrukturen sowie Abgleich mit den Datenströmen der übrigen Konsortialpartner (Entwicklungen innerhalb des Bienenstocks durch Eurofins, Geoinformationen durch disy und BEEHAVE-Daten vom UFZ):
  - o (1) Polleneintrag mit dem Monitoringsystem
  - o (2) Nektareintrag mit Bienenstockwaagen und
  - o (3) Pollendiversität über regelmäßig entnommene Proben, mit einer Pollenfalle und mit dem Monitoringsystem über die Erfassung der Pollenfarben in Echtzeit.
- Weitere Untersuchung des Potenzials der Pollenfarbenanalyse in Echtzeit zum Zweck der Bewertung der Bestäuberfreundlichkeit von Landschaftsstrukturen. Hierbei wurden im Rahmen eines Papers Ergebnisse verglichen, sowohl betreffend die Echtzeitanalyse als auch die Farbauswertung von Pollenfotos aus den Jahren 2021, 2022 und 2023 mit State-of-the-Art Verfahren von Conti et.al.<sup>6</sup>.

Abgleich mit den Datenströmen der übrigen Konsortialpartner (Entwicklungen innerhalb des Bienenstocks durch Eurofins, Geoinformationen durch disy und BEEHAVE-Daten vom UFZ). Es wurden zusätzlich noch Daten aus weiteren Studien von apic.ai als Referenzerhebungen zur Verfügung gestellt.

#### AP4: Ökologische Systemanalyse

- Einarbeitung in das BEEHAVE Modell und Identifikation der Workflows für die Nutzung der BEEHAVE Daten. Erarbeitung der relevanten Parameter für Soll-Ist-Vergleiche zur Bewertung der Lebensraumqualität von Bestäubern durch den Vergleich der seitens apic.ai erhobenen Daten mit den Parametern aus BEEHAVE. Nutzung des BEEHAVE Modells zur Generierung von "Soll-Werten", und Abgleich mit den OCELI "Ist-Daten". Pilotierung einer Standortbewertung basierend auf einem Soll-Ist Vergleich. Hierzu wurden die Daten der 2023er Langzeitstudie in

---

<sup>6</sup> Ida Conti, Piotr Medrzycki, Francesca V. Grillenzoni, Francesca Corvucci, Simone Tosi, Valeria Malagnini, Martina Spinella, and Mauro G. Mariotti. Floral diversity of pollen collected by honey bees ( I.) – validation of the chromatic assessment method. *Journal of Apicultural Science*, 60(2): 209–220, 3916.

einer für den Abgleich mit BEEHAVE nutzbaren Form zur Verfügung gestellt, mitsamt Wetterdaten.

- Austausch über die Möglichkeiten des BEEHAVE Modells und die Anforderungen an die lokale Datenerfassung, damit die Fallstudien Daten zur Modellverbesserung genutzt werden können.
- Auswertung und Aufbereitung der Daten aus der Re-ID Studie zur Gewinnung von Erkenntnissen über das Verhalten von Kohorten markierter Jung- und Sammelbienen. Diese Daten sollen genutzt werden, um Vergleiche mit den Annahmen aus BEEHAVE anzustellen.
- Austausch mit UFZ Experten über die Wahl geeigneter statistischer Methoden zur Bestimmung der Signifikanz gemessener Effekte.

#### AP5: Systemintegration Monitoringtechnologie

Zu Beginn des Projektes identifizierte apic.ai die technischen Herausforderungen, die mit der Implementierung des OCELI Systems zu lösen sein würden. Dazu zählten insbesondere die Minimierung des Energiebedarfs, limitierte Rechenleistung und GLP Konformität. Darüber hinaus in AP1 die 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 Markeridentifikation zum Zweck der Re-Identifikation markierter Bienen. Diese technischen Herausforderungen wurden im Rahmen der Adaption der apic.ai Kamertechnologie für OCELI gelöst. Im Folgenden werden einige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten kurz beschrieben.

- o Hardwareseitige Prüfung des Einsatzes von spezialisierten Beschleunigern für die Echtzeitauswertung. Entwicklung und maßgebliche Erweiterung der bestehenden Algorithmen und Funktionalitäten zur Echtzeitfähigkeit und On-Device-Auswertung.
- o Identifikation von Problemen beim Internetempfang und der Batterielaufzeit. Ableitung sowie Realisierung von Verbesserungsmaßnahmen. Dazu zählt die Netzwerkfähigkeit der Akkus. Diese sind nun "intelligent", erfassen den Solareintrag, um kritische Batteriestände besser erkennen zu können und können aus der Ferne neu gestartet sowie zur Schonung des Akkus "schlafen gelegt" werden.
- o Verbesserte Anbringung am Bienenstock zur Erhöhung der Dichtigkeit der Systeme. Hierbei wurden auch Empfehlungen des Projektpartners Eurofins mit einbezogen. Darüber hinaus Tests mit Vaseline auf Hinweis der Uni Hohenheim und "Geckodan" zur Vermeidung von Bienen, die an der Decke laufen und deren Marker deshalb nicht lesbar sind. Diese waren jedoch leider nicht erfolgreich, da sie zu einem Schmierfilm im Sichtfeld führten und die Bienen zu irritieren schienen.

- o Integration des vom FZI entwickelten neuronalen Netzes zur Erkennung von Markern und Umsetzung der Kombinierbarkeit mit der Pollenerkennung.
- o Fallstudienspezifische Einrichtung der Software zur simultanen Erfassung von Pollenfarben, Aktivität und Polleneintrag in Echtzeit. Die Bildrate, mit der dies möglich ist, konnte mithilfe der im Vorjahr gewonnenen Erkenntnisse festgelegt werden.
- o Erarbeitung des Umgangs mit Downtimes infolge langanhaltender Schlechtwetterperioden, während denen die Solarpanels nicht ausreichend Strom für den Betrieb lieferten. Es wurden einerseits softwareseitige Lösungen geschaffen, wie das automatisierte Ausschalten außerhalb der Flugzeiten. Zudem wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern entschieden, dass es bei der Erfassung von Langzeitdaten für die Interpretierbarkeit besser ist, ganze Tage zu verlieren als nur Teile der Daten einzelner Tage zu haben. Definition des täglichen Zeitfensters, aus dem Studiendaten (je nach Fragestellung und Datenverfügbarkeit) als relevant betrachtet werden sollten. Für Langzeitdaten entspricht dies dem sich während der Saison dynamisch verschiebenden Zeitfenster der täglichen Aktivität (Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang  $\pm 0$  h). Weiterhin wurden Anforderungen an die "Uptime" gestellt, also den Anteil, an dem die Systeme täglich Daten gesammelt haben müssen, damit diese unter Gewährleistung der Vergleichbarkeit unter Völkern und Gruppen für eine Interpretation herangezogen werden können, z.B. 95% Datenverfügbarkeit aus dem täglichen Fenster der Aktivität. Weiterhin wurde bestimmt, welche Anzahl von Völkern einer Gruppe dieses Kriterium erfüllen muss, damit die Daten eines Tages für die Bildung aussagekräftiger Gruppenwerte vorhanden sein müssen, z.B. 3 von 4 Völkern.
- o Integration einer Bodenfalle und Adaption von Frontfallen zur Sammlung von Pollenproben.
- o Verfeinerte Visualisierung der Bienendaten und Systemparameter in Dashboards zur vereinfachten Betriebsüberwachung.
- o Es wurde ein Datenformat definiert, das alle Teildatenströme in einem gemeinsamen Cloudordner zusammenfasst und den programmatischen Zugriff zur Analyse ermöglicht. Ein live Datenstreaming einzelner Datenpunkte erwies sich als nicht nötig im Projektverlauf, da eine Betrachtung der Daten immer erst nach Studiendurchführung oder im Anschluss an eine Saison ausreicht.
- o Entwicklung von Skripten zur Durchführung von "Sanity Checks" zur weitgehend automatisierten Sicherstellung der Plausibilität von Studiendaten und ihrer korrekten Darstellung.

#### AP6: Fallstudien

Im Rahmen des Projekts wurden Fallstudien durchgeführt, die darauf abzielten, die Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln, Bestäuberfreundlichkeit von Landschaften und die Weiterentwicklung von technischen Ansätzen zur Bestäuberüberwachung im Allgemeinen zu untersuchen. Die Fallstudien

wurden in enger Zusammenarbeit der OCELI Partner unter Berücksichtigung der in Gesprächen mit potenziellen Kunden aus Industrie und Forschung gewonnenen Erkenntnisse entwickelt und durchgeführt. Einige Studien liefen über mehrere Saisons, wobei Technologie und Methodik im Zeitverlauf weiterentwickelt wurden. Unter Leitung von Eurofins wurden folgende Aspekte spezifiziert:

- Anzahl und Platzierung der Stöcke
- Notwendiges Zusatzequipment (z. B. Totenfallen, Marker, Pollenfallen, Waagen)
- Einbeziehung von externen Datenquellen wie Wetter, Nahrungsangebot und Bodenfeuchte
- Dokumentation von Eingriffen an Bienen und technischer Ausrüstung, um die Nachvollziehbarkeit der Daten und die Beurteilung von Beeinträchtigungen zu gewährleisten

apic.ai begleitete die Durchführung der Fallstudien und war für die Auswertung der Daten mit dem Monitoringsystem verantwortlich. Im ersten Schritt umfasste dies die Konzeption eines Kamerasystems zur Aufzeichnung und Auswertung der visuellen Daten der OCELI Fallstudien entsprechend den hard- und softwareseitigen Anforderungen. Darauf aufbauend war apic.ai verantwortlich für den Bau der OCELI Monitoringsysteme, mit denen der Einsatz in den in AP1 definierten Anwendungsbereichen in den Fallstudien getestet wurde. Während des Einsatzes der Kamerasysteme verantwortete apic.ai die Installation und gewährleistete den Betrieb durch Betreuung während der Einsatzdauer. Im Anschluss an die Studie war apic.ai verantwortlich für die Datensicherung, Datenbereinigung (Zeitfenster mit länger andauernd beschlagenen Scheiben während Zeiten mit hoher Aktivität wurden im Rahmen der Sichtung der von den Systemen im Jahr 2023 zur Qualitätssicherung gesendeten Bilder ausgeschlossen), Aufbereitung und Einrichtung des Zugangs durch die übrigen Projektpartner.

Die wichtigsten Studien und Ergebnisse werden im gemeinsamen, vorderen Teil des OCELI Abschlussberichts diskutiert.

#### AP7: Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination

Wie alle Partner des Konsortiums beteiligte apic.ai sich aktiv an der Projektkoordination. Zur Sicherstellung des kontinuierlichen Projektfortschritts fanden zwei- bis vierwöchig Online-Treffen statt sowie bei Präsenztreffen insgesamt vier Präsenztreffen.

Die Projektergebnisse wurden in Form von wissenschaftlichen Publikationen, Postern und Konferenzbeiträgen mit der Wissenschaft und potenziellen Kunden aus dem Bereich der Wissenschaft (z.B. Pflanzenschutz) geteilt. apic.ai nahm dabei eine aktive Rolle ein. Auch darüber hinaus trug apic.ai zur Verbreitung des Projektes bei weiteren potenziellen Kunden, der Imkerschaft und der interessierten Öffentlichkeit bei. Öffentlichkeitsarbeit fand statt über Podcasts,

Fernsehreportagen, Blog- und Magazinbeiträge, die Projektwebsite und viele bilaterale Gespräche. Eine Übersicht findet sich im vorderen Teil dieses Abschlussberichts.

### 3.2 Erreichung der Meilensteine

Die geplanten Meilensteine konnten erreicht werden. Im Folgenden wird die Meilensteinerreichung entsprechend der Zwischenberichte nochmal gebündelt dargestellt.

MS-1: Anforderungsanalyse, unspez. Datenerhebung, Aufbau eines Basissystems

Ziel: Eine detaillierte Anforderungsbestimmung an das OCELI Gesamtsystem, sowie der Aufbau eines Basissystems zur Datenerhebung als Grundlage für die explorative 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 waren. 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 das Forschungsvorhaben einfließen zu lassen. Darüber hinaus wurde sich zur projektbegleitenden Kommunikation auf eine zweiwöchig stattfindende Status-Videokonferenz samt Protokoll zum Austausch über die Fortschritte in den verschiedenen Arbeitspaketen und deren Ergebnissen festgelegt. Da das Konsortium internationale Mitglieder hat, wurden die Ergebnisse auf Englisch festgehalten. Die folgenden Übersichten stellen das Ergebnis der ersten Schwerpunktdefinition des Projektes dar.

## risk assessment



What?	<b>Objective:</b> More detailed and repeatable risk assessment of plant protection products	<b>Characteristics:</b> Short-term studies over a few weeks	
How?	<b>Study base:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluate test landscape, Pollen supply</li> <li>Colonies comparison</li> <li>Exposure assessment, capture pollen crop</li> <li>Digitizing of manual surveys</li> </ul>	<b>endpoints:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>homing studies                         <ul style="list-style-type: none"> <li>RFID alternative</li> </ul> </li> <li>Loss of foragers</li> <li>Deadfall determination                         <ul style="list-style-type: none"> <li>alternative to traps</li> </ul> </li> </ul>	<b>"wait of evidence":</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>sublethal effects                         <ul style="list-style-type: none"> <li>Collecting behavior</li> <li>Activity change</li> </ul> </li> <li>survival curves</li> </ul>
Result:	<b>obligatory:</b> optimize current methods	<b>optimal:</b> qualifying new endpoints for ecotoxicology	

## landscape assessment



What?	<b>Objective:</b> Assessing landscape quality from the perspective of pollinators	<b>Characteristics:</b> Long-term statements/simulation 3-5 years
How?	<b>Simulation of population development:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>Depending on remote sensing data <ul style="list-style-type: none"> <li>geo-reference (land use, land structure, flowering supply)</li> <li>weather (temperature, sunshine hours, wind)</li> </ul> </li> <li>Identification of short-term indicators <ul style="list-style-type: none"> <li>Sensitivity analysis</li> </ul> </li> </ol>	<b>Validation through field studies:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>long-term study as reference <ul style="list-style-type: none"> <li>Indicators: weight, flight activity, pollen intake, share of foragers, survival curves, amount of honey needed by a colony).</li> </ul> </li> <li>short term stimuli <ul style="list-style-type: none"> <li>For example comparison control ↔ treated with Neonic</li> </ul> </li> </ol>
Result:	<b>obligatory:</b> simulation model with all identified interfaces	<b>optimal:</b> short-term indicators identified and tested

Zur Klärung der Anforderungen wurden von Projektbeginn an umfangreiche Gespräche mit unterschiedlichen potenziellen Kunden und Partnern geführt, darunter Landmaschinenhersteller, Saatgutproduzenten, Pflanzenschutzmittelhersteller, Hummelproduzenten und Entomologen. Die Ergebnisse der Gespräche wurden bei einem Treffen der Projektpartner am 17. Dezember 2021 vorgestellt. Die 26 Anforderungen, Interessenbekundungen und Ideen wurden diskutiert und gingen in die Planung und Priorisierung der für das Jahr 2022 geplanten Fallstudien ein. Eine zentrale Erkenntnis der Gespräche mit einem Landmaschinenbauer und der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft bestand darin, dass seitens der Landwirtschaft kein Interesse daran besteht, Studien durchzuführen, bei denen mögliche negative Effekte bestehender landwirtschaftlicher Praktiken auf Honigbienen geschaffen wird. Die Verantwortung hierfür wird bei den Herstellern der Pflanzenschutzmittel gesehen.

Die Ergebnisse der Gespräche gingen in das Lasten- und Pflichtenheft mit ein, welches 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 wurden erste Tests mit dem Prototyp des OCELI Systems durchgeführt. Dabei wurden Erfahrungen gesammelt und Verbesserungspotenziale identifiziert, z.B. die Ausleuchtung.

MS-2: Präsentation der ersten Ergebnisse auf einer Fachkonferenz

Ziele: Zur Validierung der festgelegten Anforderungen wurden die ersten Ergebnisse aus den Saisons 2021 und 2022 aufbereitet und auf mehreren Fachkonferenzen präsentiert. Folgende Präsentationen

und Poster wurden der Fachwelt in Stuttgart, York, Dublin und Pittsburgh unter Beteiligung von apic.ai vorgestellt.

Präsentationen:

- Möglichkeiten des visuellen Bestäubermonitoring (Tagung der Bieneninstitute 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 effect on honey bees & studying pollen and nectar collection behaviour under semi-field conditions, Germany 2022 (ICPPR 22)

Konferenzposter:

- 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)

Im Rahmen und auch im Anschluss der Konferenzen wurden Diskussionen mit dem Fachpublikum geführt. Dabei wurden die Chancen und Limitationen der neuen Daten eruiert, es wurde Feedback zum Interesse an den einzelnen Features und zu Anforderungen für die Weiterentwicklung der Monitoringtechnologie gesammelt.

MS-3: On-Device Demonstrator einsatzbereit; Szenarien für Fallstudien definiert

Ziele: Für die Durchführung der spezifischen Fallstudien wurden echtzeitfähige Algorithmen zur Extraktion der relevanten Merkmale und die Gewinnung der entsprechenden Einblicke entwickelt. Die Speicher- und Verarbeitungsarchitektur für die Datenströme der apic.ai Monitoringsysteme und der Bienenstockwaagen wurden initial aufgesetzt.

Die Monitoringsysteme wurden optimiert und in der für die Erhebung notwendigen Anzahl produziert. Das Fallstudien-Design wurde so konzipiert und vorbereitet, dass die aufgestellten Hypothesen damit überprüft werden können.

Ergebnisse:

- Das Kamerasystem wurde hardwareseitig für die Fallstudien entsprechend der Anforderungsanalyse und unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Bienensaison 2021 konzipiert.

- Softwareseitig wurde die Echtzeitfähigkeit der Algorithmen für die Extraktion der zuvor definierten Parameter Aktivität, Polleneintrag und Pollenfarben erreicht. Während der Durchführung der Langzeitstudie musste eine Anpassung der Bildrate von 20 auf 18 FPS durchgeführt werden, da die Anzahl der Bienen im Bild in Situationen mit sehr hoher Bienenaktivität die Leistungsfähigkeit des Systems sonst überschritten hätte. Dies hatte jedoch nur minimale Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Messwerte. Weiterhin musste Mitte Juni 2022 das Netz nachtrainiert werden, da sich herausstellte, dass Drohnen und Bienen mit dunklen Pollen im Trainingsdatensatz unterrepräsentiert waren und nicht korrekt erkannt wurden. Dieses Problem konnte durch eine Erweiterung des Trainingsdatensatzes und ein erneutes Training der Algorithmen behoben werden.
- Mehrere Machbarkeitsstudien wurden durchgeführt und in Teilen bereits ausgewertet, interpretiert und der Fachwelt vorgestellt. Teils wurde dies 2023 umgesetzt. Beim Präsenztreffen der Partner im November 2022 wurden die vorliegenden Ergebnisse diskutiert. Auf dieser Basis und auch auf Basis der durch den Entwurf der EFSA Guidance implizierten Anforderungen für Ökotoxikologische Studien und der Homing Flight Guidance der EFSA wurde ein vorläufiger Plan für die Fortführung der Studien im Jahr 2023 entworfen, der Anfang des Folgejahres finalisiert wurde.
- Schnittstellen für die Erfassung von Daten von Bienenwaagen wurden implementiert.
- Die BEEHAVE “Soll”-Kennwerte, die es mit den “Ist”-Daten in OCELI abzugleichen gilt, wurden identifiziert und so transformiert, dass ein direkter Vergleich im Rahmen der Analyse der Bienenfreundlichkeit von Land(wird-)schaftsstrukturen möglich ist.

#### MS-4: Einsatzbereitschaft des Demonstrators der Gesamtlösung

Ziele: Die Integration aller Teildatenströme auf einer gemeinsamen Plattform wurde abgeschlossen. Das angepasste Messsystem als Demonstrator wurde in ausreichender Anzahl produziert und zur Verfügung gestellt und konnte in einer Reihe von simulierten Anwendungsszenarien getestet werden. Dabei stand wie geplant die Validierung der technischen Grundlagen im Fokus.

#### Ergebnisse:

- Integration aller Teildatenströme
- Die Forschung zur Erfassung und Integration der von apic.ai bereitgestellten lokalen Daten wurde abgeschlossen.
- Der BEEHAVE Workflow wurde finalisiert, es konnte eine erste Interpretation bspw. der Landschaftsstrukturen bzgl. Bestäuberfreundlichkeit getroffen werden und die Ergebnisse wurden für die Präsentation bei der Beenovation Abschlussveranstaltung aufbereitet.
- Studien zum Test der Gesamtlösung in simulierten Anwendungsumgebungen mit unterschiedlicher Landnutzung sowie Stress-Experimente wurden durchgeführt und die aufgenommenen Daten wurden bzgl. der folgenden Aspekte ausgewertet:
- Erstellung einer Pollenfarben-Datenbank zur Bestimmung der Vielfalt von Trachtquellen.

- Wirtschaftlichkeitsabschätzung der Features und Betrachtung der Produktdefinition von Teillösungen sowie Einschätzung des Informationsverlustes gegenüber der Volllösung.
- Die Möglichkeit zur Visualisierung von Trachtlücken sowie von Veränderungen der Vielfalt des Trachtangebots im Zeitverlauf wurde geschaffen.
- Das Hardware-Messsystem als Demonstrator wurde entsprechend der in AP1 definierten Anforderungen finalisiert und die Optimierung des Energiemanagements wurde umgesetzt.
- 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 incl. Dokumentation von Eingriffen und Bestimmung der relevanten täglichen Laufzeiten.
  - 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 Habitatseigenschaften 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 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Finanzposition im Projekt waren die Personalkosten. Diese teilten sich auf vier Mitarbeitende des Projektes auf, die schwerpunktmäßig den folgenden Tätigkeiten nachgingen:

	2021	2022	2023
Entwicklung	1.452,5 h	2.633 h	834 h
Projektkoordination	366 h	728 h	310 h
Studienplanung und -kommunikation	0 h	1.730,9 h	64,5 h

Daneben gab es Materialkosten, die für den Aufbau von Demonstratoren eingesetzt wurden, die während der Studien eingesetzt wurden. Die Position "sonstige unmittelbare Vorhabenskosten" beinhaltet Serverkosten und Kosten für die Annotation von Daten. Unter der Position "F&E Fremdleistungskosten" wurden im Projekt gesammelte Pollenproben durch das Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit Institut für Bienenkunde Celle analysiert. Weiterhin fielen Reisekosten an, um Projekttreffen durchzuführen und Ergebnisse auf Konferenzen zu präsentieren.

Position	Kosten
Material	12.834,32 €
Sonstine unmittelbare Vorhabenskosten	9.986,85 €
F&E Fremdleistungen	3.360,00 €
Projektkosten	9.000,49 €

### 3.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die im Projekt OCELI durchgeführten Arbeiten waren von hoher Notwendigkeit und Angemessenheit, um die im Projektantrag definierten Ziele zu erreichen. Die Mittel wurden eingesetzt, um die physischen Demonstratoren der Monitoringsysteme zu entwickeln und sie softwareseitig in die Lage zu versetzen die Bienendaten zu analysieren und mit weiteren Daten zu kombinieren.

### 3.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses

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.

Daneben kann apic.ai die gewonnenen Erfahrungen im Bereich der Entwicklung von Monitoringsystemen für Bestäubern auf andere Insekten übertragen. Hier läuft seit 2024 bereits ein von der Carl-Zeis-Stiftung gefördertes Anschlussprojekt unter dem Namen "BeeVision" mit dem Institut für Bienenkunde in Hohenheim, der Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft und der Hochschule Niederrhein.

### **3.6 Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Im Bereich der entwickelten 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.