

Gefördert durch:

Projektträger



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat



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

der Firma Eurofins Agrosience Services ecotox GmbH

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

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

1	Ergebnisse des Gesamtprojekts.....	2
1.1	Überblick	2
1.2	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	4
1.2.1	Algorithmenentwicklung	4
1.2.2	Monitoringtechnologie.....	6
1.2.3	Pflanzenschutzmitteltests.....	9
1.2.4	Geodatenanalyse.....	12
1.2.5	Ökologische Systemanalyse	15
2	Publikationen und Wissenstransfer.....	17
2.1	Beiträge zur Wissenschaft.....	17
2.1.1	Beiträge in wissenschaftlichen Journals	17
2.2	Öffentlichkeitsarbeit.....	19
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	21
2.4	Voraussichtlicher Nutzen	22
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen.....	23
3	Arbeitspakete und Meilensteine (Eurofins)	25
3.1	Umsetzung der Arbeitspakete	25
3.1.1	Spezifikation der Gesamtlösung (AP1).....	25
3.1.2	Ökologische Systemanalyse (AP4).....	25
3.1.3	Systemintegration Monitoringtechnologie (AP5).....	25
3.1.4	Fallstudien (AP 6 Leitung Eurofins)	25
3.1.5	Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination (AP7)	31
3.2	Vergleich zu den ursprünglichen Zielen (Zielabweichungen begründen).....	31
3.2.1	Erreichung der Meilensteine	32
3.3	Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung (Eurofins).....	34
3.4	Einhaltung der Arbeits- und Zeitplanung	35
3.5	Ergebnis des Vorhabens und gesammelte wesentliche Erfahrungen.....	36
3.6	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	37

1 Ergebnisse des Gesamtprojekts

Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel gemeinsam für das ganze Konsortium präsentiert, spätere Informationen beziehen sich nur auf die Firma Eurofins Agrosience Services ecotox GmbH.

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"¹ 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.
- 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 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.

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

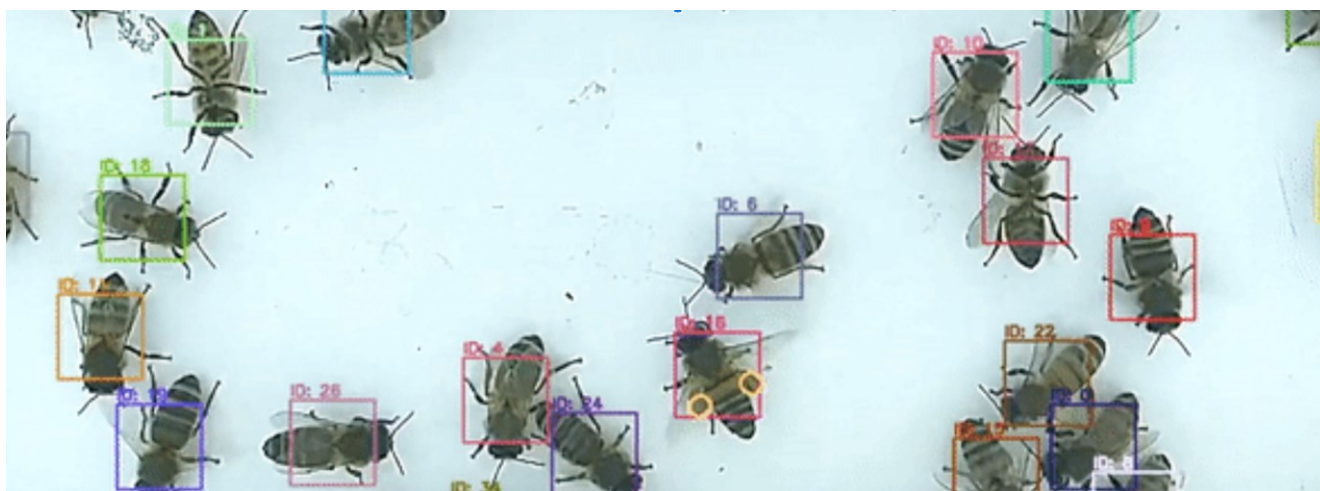


Abbildung A: Visualisierung der Arbeit des Algorithmus beim Tracking der Bienen und der Pollenerkennung.

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 Technik² 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 vorgestellt³. Durch ein weiteres Training könnte dieser Katalog erweitert und verfeinert werden und so eine automatisierte Dokumentation der Blühzeiten und Blühpflanzenzusammensetzung ermöglichen.

² BORLINGHAUS, Parzival; JUNG, Jakob; ODEMER, Richard. Smart Agricultural Technology.

³ 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.

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 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.³
- 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 Bienen Daten 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.

1.2.3 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 sublethaler 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 können⁴. 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 durchzuführen⁵.



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

⁴ 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>

⁵ 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.

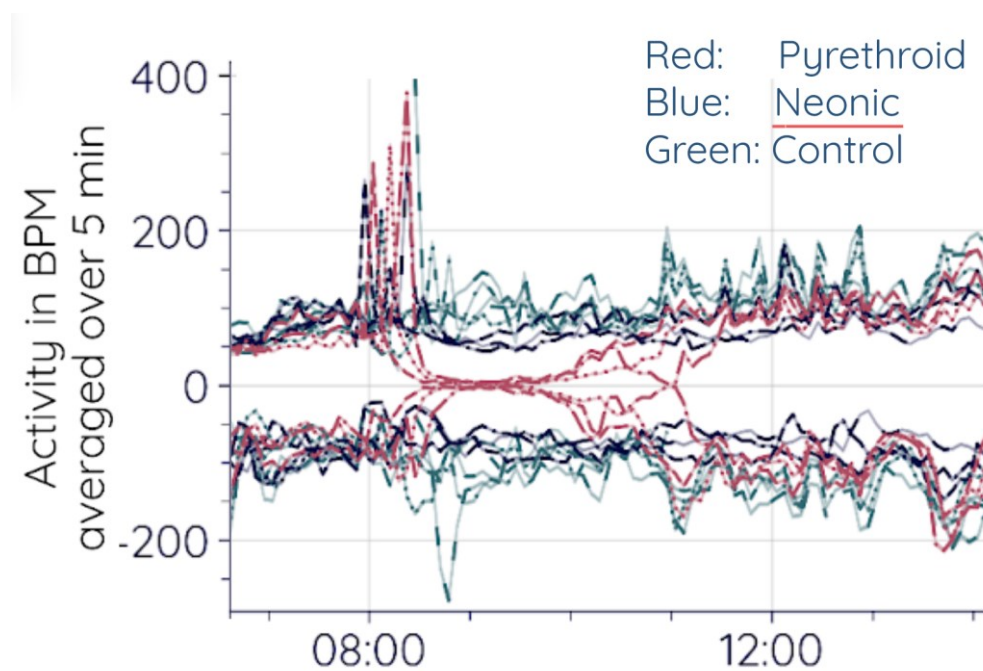


Abbildung G: Visualisierung minütlich gemessener Bienenaktivität im Versuch mit drei Gruppen. Die vier Völker, die Kontakt mit der repellenten Substanz hatten (rot), stellten temporär die Aktivität ein.

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

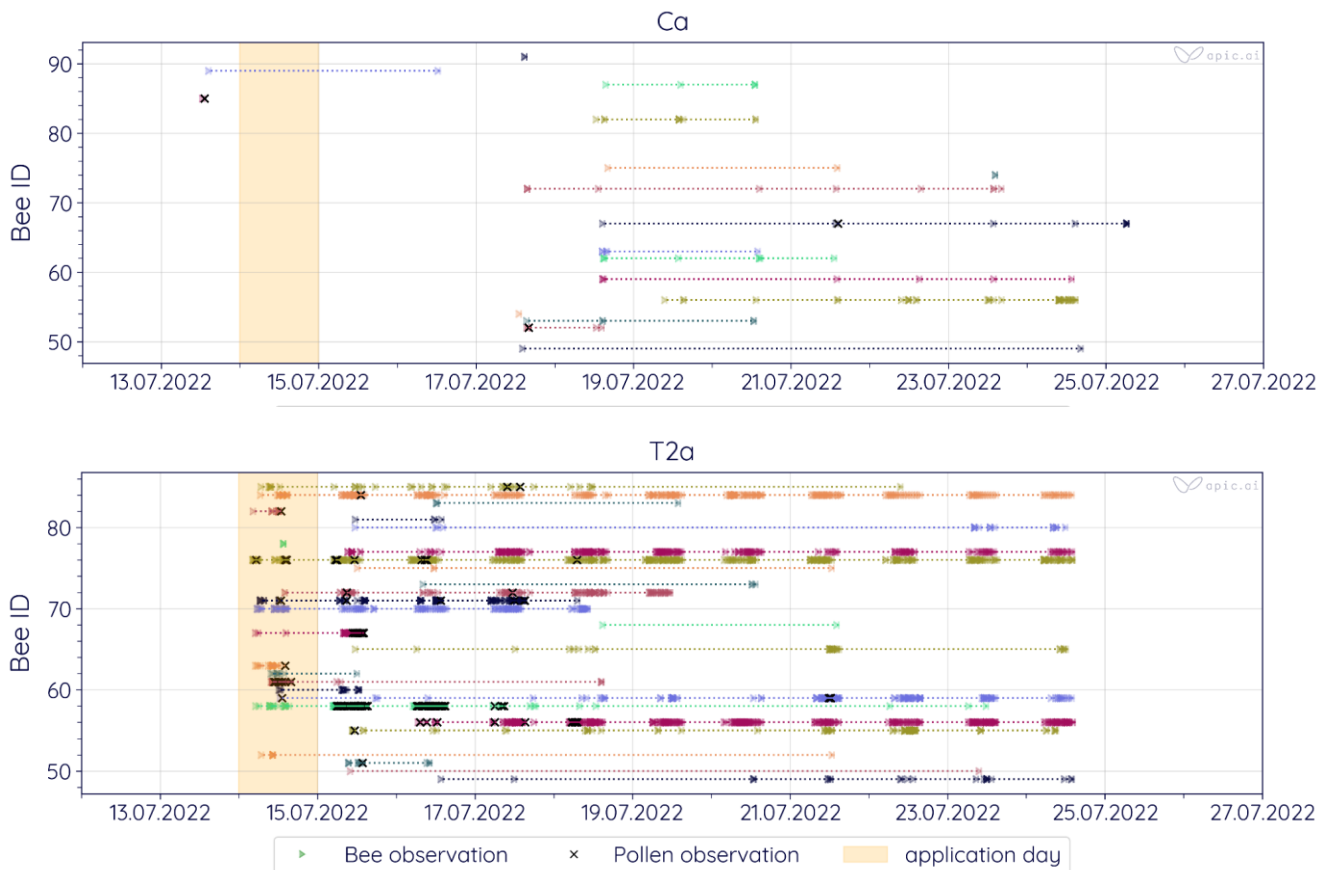


Abbildung H: Darstellung der Aktivität von frisch geschlüpften Bienen der Kontrollgruppe (oben) und der exponierten Gruppe (unten).

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.

1.2.4 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.

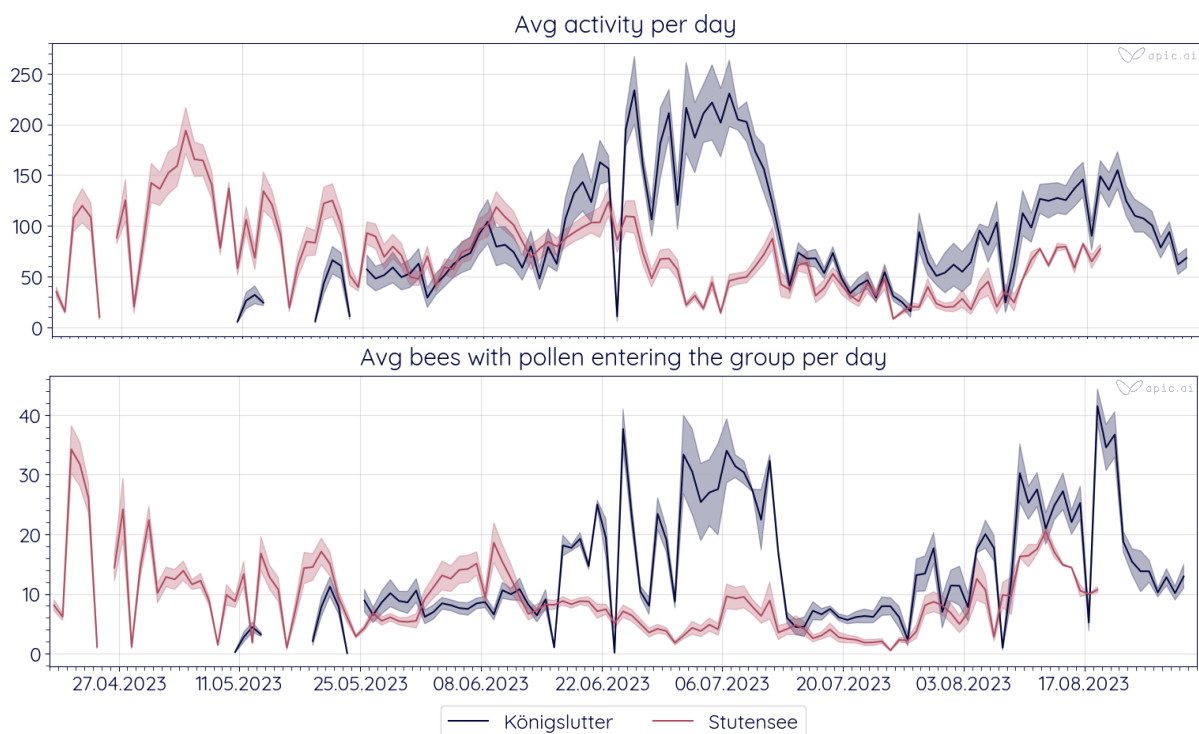


Abbildung I: Darstellung der Messwerte von zwei Gruppen von Bienenvölkern an strukturell verschiedenartigen Standorten im Jahresverlauf - durchschnittliche Einflugaktivität in Bienen pro Minute (oben) und durchschnittlicher Polleneintrag in Bienen mit Pollen pro Minute (unten). Der schattierte Bereich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

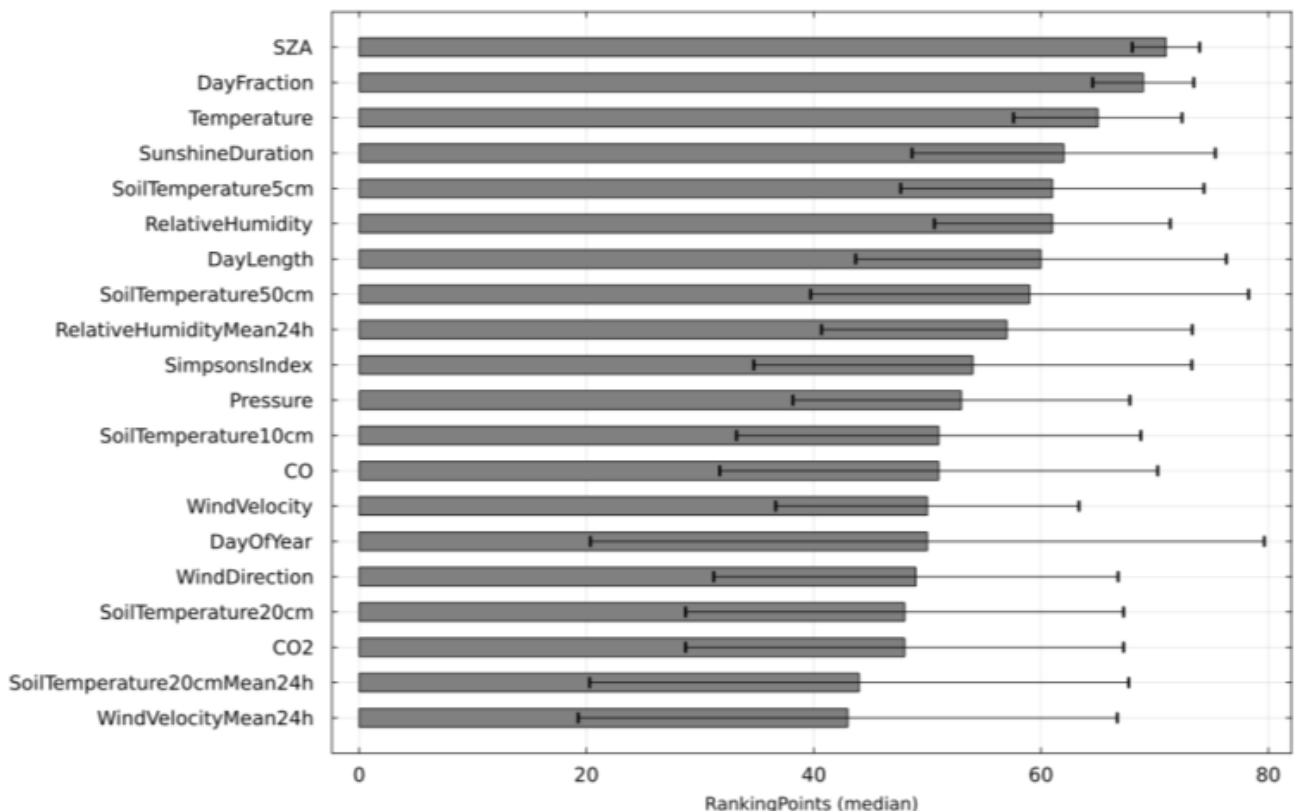


Abbildung J: Darstellung der 20 wichtigsten Parameter für die Beobachtungen von Bienenaktivität und Nahrungseintrag, basierend auf Daten von 2022 und 2023, aggregiert über verschiedene Analysen.

1.2.5 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-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:

- Groenveld 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 mimick 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 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>.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die im Projekt OCELI durchgeführten Arbeiten waren von hoher Notwendigkeit und Angemessenheit, um die im Projektantrag definierten Ziele zu erreichen. Die zentrale Herausforderung bestand darin, die komplexen, synergetischen Wirkmechanismen zwischen Landwirtschaft und Bestäuberinsekten messbar und verständlich zu machen. Bestehende Methoden, die sich oft auf die einfache Erfassung der Mortalität konzentrieren, reichen für die Bewertung von sub-lethalen Effekten oder Verhaltensänderungen nicht aus.

Die Angemessenheit der gewählten Vorgehensweise manifestiert sich in der interdisziplinären Zusammenarbeit des Konsortiums, das Expertise aus Informatik, Entomologie, Ökotoxikologie, Geointelligenz und ökologischer Modellierung bündelte. Diese ganzheitliche Herangehensweise ermöglichte es, die Fragestellung von unterschiedlichen Seiten zu beleuchten und eine integrierte Lösung zu entwickeln.

Konkret waren die Projektarbeiten notwendig, um:

Ein innovatives, KI-gestütztes System zur visuellen Erfassung von Bienen- und Hummelaktivität zu schaffen, das herkömmliche, oft weniger präzise oder invasivere Methoden (z. B. RFID-Tags) übertrifft.

Reproduzierbare Feldstudien zu ermöglichen, die die hohe natürliche Variabilität von Bienenvölkern berücksichtigen. Die Fähigkeit, die Effekte eines Pestizids im Feldversuch zu reproduzieren und mit einem Simulationsmodell nachzuvollziehen, ist ein bedeutender Fortschritt und belegt die Angemessenheit der gewählten Methoden.

Neue Messparameter zu entwickeln, wie die Erfassung von Pollenfarben, die Re-Identifikation markierter Bienen und die Quantifizierung von Repellenz-Effekten. Diese Parameter gehen weit über die reine Zählung hinaus und liefern wertvolle Einblicke in die tatsächliche Gesundheit und das Verhalten der Völker.

Die erfassten Daten in ein etabliertes ökologisches Simulationsmodell wie BEEHAVE zu integrieren. Diese Verknüpfung von empirischen Felddaten mit Modellierung ermöglichte es, komplexe Hypothesen zu überprüfen und Wirkmechanismen zu erklären, die allein durch Feldbeobachtungen nicht erschließbar gewesen wären.

Die technischen und methodischen Grundlagen für eine zukünftige GLP-konforme Anwendung in der ökotoxikologischen Risikobewertung zu schaffen. Die detaillierte Ausarbeitung der Anforderungen an die Daten- und Prozessdokumentation war hierfür essenziell.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse des OCELI-Projekts bergen ein erhebliches Potenzial für die Wissenschaft, die Wirtschaft und die Gesellschaft, das weit über die Projektlaufzeit hinausreicht.

Wissenschaftlicher Nutzen:

Das Projekt liefert eine fundierte Basis für die Forschung im Bereich des Biomonitorings von Bestäuberinsekten. Die entwickelten Algorithmen und Methoden (z. B. zur Re-Identifikation von Individuen) können in zukünftigen Studien zur Erforschung des Sammelverhaltens oder der sozialen Dynamik innerhalb der Bienenvölker eingesetzt werden.

Die Verknüpfung von automatisiert erfassten Felddaten mit dem BEEHAVE-Modell hat die Relevanz und Validität solcher Simulationsmodelle eindrucksvoll bestätigt. Dies wird die Entwicklung und den Einsatz ähnlicher Modelle zur Analyse von Umwelteinflüssen vorantreiben.

Die Publikationen und Abschlussarbeiten tragen zur Verbreitung dieses Wissens bei und stärken die wissenschaftliche Gemeinschaft in diesem Bereich.

Wirtschaftlicher Nutzen:

Die OCELI-Technologie kann als Werkzeug für Pflanzenschutzmittelhersteller und Zulassungsbehörden dienen, um die Risikobewertung zu verbessern und zu beschleunigen. Insbesondere die reproduzierbare Messung von Verhaltensänderungen (Repellenz, Pollensammelverhalten) könnte zu neuen Standards führen.

Die Erkenntnisse über Repellenz-Effekte eröffnen die Möglichkeit, Landwirtschaft und Bienenschutz besser miteinander zu vereinbaren. Landwirte könnten durch den gezielten Einsatz solcher Substanzen den Kontakt zwischen Bestäubern und Pflanzenschutzmitteln während der Applikation signifikant reduzieren.

Der entwickelte Demonstrator und die Algorithmen bilden eine solide Grundlage für die Kommerzialisierung der Technologie durch die Projektpartner, beispielsweise in Form von Dienstleistungen für die Landwirtschaft, imkerliche Betriebe oder die Landschaftsplanung.

Die Machbarkeitsstudien zu Wildbienen und Biodiversitätsassessments deuten auf ein breites Anwendungsspektrum hin, das auch für Immobilienentwickler und Naturschutzbehörden von Interesse ist.

Gesellschaftlicher Nutzen:

Das Projekt trägt direkt zum Ziel einer nachhaltigeren Landwirtschaft und zum Schutz der Bestäuberpopulationen bei. Indem es fundierte Daten über die Wechselwirkungen liefert, ermöglicht es eine informierte Entscheidungsfindung in Politik und Praxis.

Die in den Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse tragen zu einem tieferen Verständnis der Bedrohungen für Bestäuber bei und können helfen, wirksamere Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

Die umfangreiche Öffentlichkeitsarbeit in Fernsehen, Magazinen und Podcasts hat das Bewusstsein für die Bedeutung von Bienen und die Möglichkeiten moderner Technologie in ihrem Schutz gestärkt.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Die im OCELI-Projekt geleistete Arbeit stellt einen signifikanten Fortschritt in einem Forschungsfeld dar, das sich rasant entwickelt. Während andere Akteure ebenfalls an Lösungen arbeiten, hebt sich OCELI durch einige zentrale Alleinstellungsmerkmale ab:

KI-gestütztes visuelles Monitoring: Visuelle KI-Systeme für Bienen-Monitoring sind international ein aufstrebendes Feld. Die Stärke von OCELI liegt hier in der robusten On-Device-Verarbeitung, der Entwicklung spezifischer Algorithmen zur Pollenfarb- und Markererkennung und der praxistauglichen Erprobung unter Feldbedingungen (Autarkie, GLP-Konformität). Im Vergleich zu anderen Ansätzen, die oft auf RFID-Tags setzen, bietet die visuelle Re-Identifikation markierter Bienen eine weniger invasive und kostengünstigere Lösung, die zudem die Beobachtung von Pollen- oder Nektareintrag ermöglicht.

Verknüpfung von Feldversuch und Modellierung: Die Integration von hochauflösenden Felddaten mit dem BEEHAVE-Modell ist ein herausragender Fortschritt. Während das BEEHAVE-Modell bereits von der EFSA zur Risikobewertung eingesetzt wird, lieferte OCELI die notwendigen empirischen Daten, um die Modellannahmen zu validieren und die Vorhersagekraft für spezifische Effekte (z. B. erhöhte "handling time" durch Neonicotinoide) zu bestätigen. Dies führt zu einer neuen Qualität der Modellierung und übertrifft die Ansätze vieler anderer, die sich entweder nur auf Feldbeobachtungen oder nur auf die Modellierung beschränken.

Erforschung von sub-lethalen Effekten: Die regulatorische Risikobewertung von Pflanzenschutzmitteln konzentriert sich oft noch stark auf die letale Wirkung. OCELI hat bewiesen, dass auch sub-lethale Effekte wie Repellenz oder eine beeinträchtigte Orientierungsfähigkeit reproduzierbar im Feld gemessen werden können. Dieser Fokus auf das Verhalten der Bienen in ihrem natürlichen Umfeld stellt eine Weiterentwicklung der gängigen ökotoxikologischen Testverfahren dar und ist ein wichtiger Impuls für die Überarbeitung internationaler Richtlinien.

Technologische Übertragbarkeit: Die im Projekt durchgeführten Machbarkeitsstudien zur Anwendung der Technologie bei Hummeln und Wildbienen demonstrieren, dass das entwickelte System eine breite Anwendung findet und nicht nur auf Honigbienen beschränkt ist. Dies ist ein entscheidender Fortschritt für die umfassende Bewertung der Bestäubergesundheit in Agrarlandschaften.

3 Arbeitspakete und Meilensteine (Eurofins)

3.1 Umsetzung der Arbeitspakete

3.1.1 Spezifikation der Gesamtlösung (AP1)

AP1 wurde von allen Projektpartnern gleichermaßen mitgestaltet. 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 Ökologische Systemanalyse (AP4).

Eurofins 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. Mit UFZ und APIC wurden gemeinsam geplant welche Daten im AP& Fallstudien zu erheben sind.

3.1.3 Systemintegration Monitoringtechnologie (AP5)

Eurofins arbeitete besonders eng zusammen mit APIC bei den Optimierungen des Kamerasystems während des Anwendungsfalls in den konkreten Fallstudien.

3.1.4 Fallstudien (AP 6 Leitung Eurofins)

Dieses Arbeitspaket konzentrierte sich auf die Durchführung von Fallstudien zur Untersuchung spezifischer Forschungsfragen im Kontext der Bienengesundheit und Populationsdynamik. Ein zentrales Ziel war die Erfassung umfassender Daten um die Entwicklung und Validierung von Modellen zu unterstützen.

Projektziele und Methodik der Fallstudien

Die Fallstudien umfassten die Erfassung verschiedener Parameter wie Volksgewicht, imkerlichen Begutachtungen, Vegetationsbegutachtungen und lokale Wetterdaten (z.B. Niederschlag am Teststand). Diese Daten wurden sorgfältig erhoben und dokumentiert.

Zwei Arten von Studien-Setups kamen zum Einsatz:

- Kurzstudien: Diese untersuchten simulierte, temporäre Einflüsse auf die Volksentwicklung, wie beispielsweise imkerlichen Durchsichten.
- Langzeitstudien: Hierbei wurden strukturelle, langfristige Einflussfaktoren analysiert, die etwa durch spezifische Kulturlandschaften hervorgerufen werden.

Die projektspezifischen Fallstudien wurden im Rahmen von OCELI durchgeführt, um die notwendige Datenbasis für die Modellentwicklung und die Validierung der Auswertungssystematiken zu generieren. Besonders innovativ war die Kombination aus imkerlichen Erhebungen, die für die Populationsmodellierung entscheidend sind, und der komplexen technischen Erfassung von Lokal- und Fernerkundungsdaten. Die Validierung der Algorithmen am dynamischen Organismus Biene selbst, ausgestattet mit Referenzsystemen zur Bewertung der Datengüte, war ein weiterer Schwerpunkt. Der Studienaufbau entsprach dem Charakter industrieller Forschung und diente der Entwicklung und Validierung der OCELI-Technologie.

MS 3-8: Vorbereitende Studien zu Material und Methoden

Vorbereitende Studien wurden durchgeführt, um die Eignung von Material und Methoden für die Versuche zu klären.

Fängigkeit von Totenfallen

Zwischen dem 26. September und 11. Oktober 2021 wurde die Fängigkeit von Totenfallen für Honigbienen untersucht. Dabei wurden Bienenvölker mit Fallen des Typs „Gary“ und „underbasket“ ausgestattet. Pro Versuchstag wurden 100 farblich markierte Bienen pro Volk freigesetzt. Beide Fallentypen zeigten eine Fängigkeit von etwa 60 %. Damit konnte die Verwendbarkeit der „underbasket“-Fallen für zukünftige Studien mit dem apic ai KI-gestützten Kamerasystem nachgewiesen werden. Die Ergebnisse wurden auf der ICPBR 2022 als Poster und in einer zugehörigen Publikation im JKI Archiv veröffentlicht.

Eignung des KI-gestützten Kamerasystems für Homing-Studien

Die Eignung des apic ai KI-gestützten Kamerasystems als Alternative zur RFID-Technik für Homing-Studien konnte ebenfalls bestätigt werden. Bienen wurden hierfür mit Markern (Opalith-Plättchen) in vier Farben und individuellen Nummern versehen und 28 Tage lang mit dem Kamerasystem verfolgt. Die Markierung erfolgte in zwei Sessions: einmal durch erfahrene Imker und einmal durch unerfahrene Mitarbeiter. Die Erfolgsraten waren in beiden Sessions vergleichbar. Der Einsatz frisch geschlüpfter Bienen erwies sich als deutlich erfolgreicher als der von älteren Flugbienen. Es konnten der Zeitpunkt der ersten Flugerfahrungen sowie die tägliche Anzahl der Flüge registriert werden. Die Ergebnisse wurden auf der SETAC 2022 als Poster präsentiert.

Annotierung von Videomaterial: Die Annotierung von Videomaterial wurde von erfahrenem Personal vorgenommen.

M15-20: Fallstudien zum Einfluss von Manipulationen (2022)

Vom 5. Mai bis zum 27. Oktober 2022 wurden vier Bienenvölker hinsichtlich ihrer Volksentwicklung mittels zehn Volksschätzungen nach Liebefelder Methode verfolgt. Zusätzlich wurden zwölf Pollensammlungen und fünf Varroabefallserhebungen durchgeführt. Die Mortalität an den Völkern wurde vom 15. Juni bis 30. Juni 2022 täglich mit Totenfallen erfasst.

Spezifische Manipulationen:

Am 15. Juni wurden an zwei Völkern die Flugbienen entnommen, indem die Völker während des Bienenflugs versetzt wurden. An diesen Völkern wurde am 21. Juli Honig geerntet. An den anderen beiden Völkern wurde am 30. Juni die Brut entfernt.

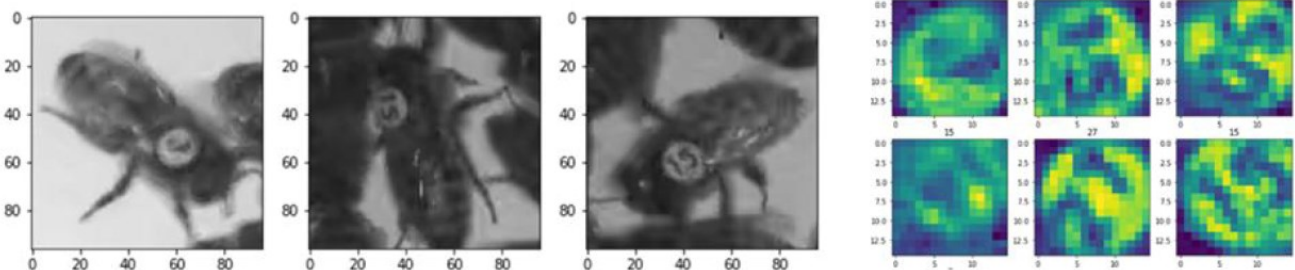
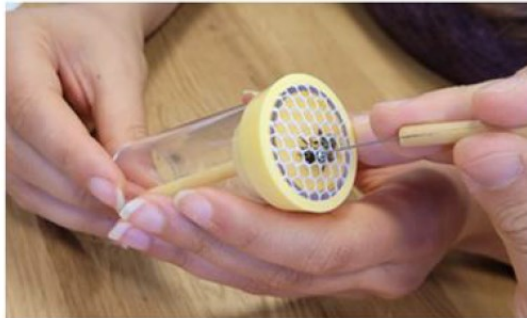
Wetteraufzeichnungen einer nahegelegenen LTZ-Wetterstation (ca. 1 km Entfernung) wurden verwendet. Leider gingen durch einen technischen Defekt die Aufzeichnungen der Kamerasysteme verloren, was die Auswertung nur bedingt ermöglichte.

Studie zur Einschätzung von Pflanzenschutzmittel auf Bienenverhalten (Juli 2022)

Im Juli 2022 wurden sechs Tunnelzelte über blühende Phaceliaflächen aufgebaut. Je zwei Zelte wurden einer Behandlungsgruppe zugewiesen:

- Kontrollgruppe: Nur mit Wasser behandelt.
- Pyrethroid-Gruppe: Behandlung mit Lambda-Cyhalothrin.
- Neonicotinoid-Gruppe: Behandlung mit Thiamethoxam.

Erste Assessments der täglichen Flug- und Mortalitätswerte in den Zelten fanden drei Tage vor der Applikation statt. Die Applikation erfolgte am 14. Juli 2022. Zusätzlich wurden individuelle Bienen markiert. Dabei wurden zwei getrennte Katen Markiert, Flugbienen und frisch geschlüpfte Bienen mit dem Ziel zu untersuchen ob Pflanzenschutzmittel die Kasten im Volk unterschiedlich beeinflussen.



Markierung der Bienen für Versuch

Die Erfassung der Mortalitäts- und Flugwerte aller Bienen und der markierten Bienen in den Zelten wurde bis zum Auswandern der Bienen am 28. Juli 2022 fortgesetzt. An der Monitoring-Stelle wurden die Mortalitätswerte mit Totenfallen bis zum 11. August 2022 erhoben.

Ergebnisse der Behandlungsstudie:

Am Tag der Applikation und am Folgetag war der Flug in beiden Behandlungsgruppen signifikant reduziert. Dieser Repellent-Effekt konnte sehr gut mit dem KI-unterstützten Kamerasystem von apic ai dokumentiert werden.

Am Tag 2 und 3 nach der Applikation war der Flug nur noch in der Neonicotinoid-Gruppe signifikant reduziert. Die Behandlung hatte, außer am Applikationstag (wo beide Behandlungsgruppen eine signifikant erhöhte Mortalität zeigten), keinen signifikanten Einfluss auf die Mortalität der Bienen. Markierte Flugbienen waren mit Ausnahme von zwei Bienen ab dem Tag nach der Applikation in den behandelten Gruppen nicht mehr zu finden. In der Kontrollgruppe zeigten sich markierte Flugbienen bis zu neun Tage nach der Applikation. Markierte junge Bienen begannen in der Pyrethroid-Gruppe ab dem Tag der Applikation zu fliegen. In größerem Umfang setzte der Flug junger markierter Bienen in der Kontrollgruppe ab Tag 3 und in der Neonicotinoid-Gruppe ab Tag 5 nach der Applikation ein. Mit den markierten Bienen konnten Überlebenskurven erstellt werden.

Die Daten zu diesem Versuch wurden in zwei Vorträgen auf der ICP-PR 2022 in York (UK) vorgestellt.

MS 27-32: Weitere Fallstudien und Ergebnispräsentation (2023)

Die Langzeitstudie im Jahr 2023 begann mit dem Anwandern der Völker am 18. April 2023. Blühende Flächen im Umfeld der Völker (Radius 2 km) wurden am 25. April und 17. Mai 2023 erfasst. Fünf Volksschätzungen nach Liebefelder fanden zwischen dem 18. April und 10. Juli 2023 statt. Die Mortalität in den Totenfallen wurde zwischen dem 19. April und 18. Mai 2023 erhoben. Aufzeichnungen von Bienenwagendaten liegen für den Zeitraum vom 25. April bis 21. Mai 2023 vor. Im Studienverlauf wurden insgesamt sechs Pollensamplings durchgeführt und der Varroabefall dreimal registriert, wobei dieser zu keinem Zeitpunkt problematisch war. Die Völker verblieben nach der letzten Volksschätzung am Standort für weitere Pollensamplings.

Langzeitmanipulationen an den Völkern (27. April 2023):

Brutentnahme bei zwei Völkern. Honigernte bei zwei Völkern. Entfernung von Flugbienen bei zwei Völkern durch Versetzen während des Bienenflugs an einen anderen Ort auf dem Studiengelände. Zwei Völker nahe der ursprünglichen Position nahmen die zurückkehrenden Flugbienen auf.

Zwei Völker blieben als Kontrollen ohne Manipulation. Eines der Kontrollvölker verlor leider zu Beginn des Versuchs die Königin. Die nachgeschaffte Königin begann erst spät mit der Eiablage, sodass verdeckelte Brut erst am 7. Juni festgestellt wurde, was auf eine Eiablage spätestens am 29. Mai hindeutet.

Fütterungsstudie (nach Oomen, 2023)

In einer Fütterungsstudie wurden vier Kontrollvölker und vier Test-Item-Völker zehn Tage lang täglich mit einer behandelten (Imidacloprid, 200 µg/kg Zucker) bzw. unbehandelten Zuckerlösung im Volk zugefüttert. Wieder wurden Bienen mit einem vom FZI entwickelten Code markiert. Mortalitätsdaten wurden vom 21. Juli (sieben Tage vor erster Fütterung) bis 25. August 2023 (28 Tage nach erster Fütterung) mit „underbasket“-Totenfallen erhoben. Der erste Fütterungstag war der 28. Juli 2023.



Bienen mit von FZI entwickelten Code auf Signalplättchen

Ergebnisse der Fütterungsstudie:

Mit Ausnahme von Tag 4 nach der ersten Fütterung, wo die Mortalität in der Behandlungsgruppe signifikant höher war als in der Kontrollgruppe, gab es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Behandlung und Kontrolle bezüglich der Mortalität. Temperatur und Niederschlag wurden mit einer Wetterstation vor Ort (Hobos System) aufgezeichnet.

Je zwei Völker der Kontroll- und der Behandlungsgruppe waren mit Bienenwaagen ausgestattet.

Die Volksentwicklung wurde in insgesamt sechs Volksschätzungen nach Liebefelder erfasst, wodurch ein kompletter Brutzyklus nach Einsetzen der Fütterung abgebildet ist.

Jedes Bienenvolk war vom ersten bis zum letzten Studientag mit KI-unterstützten Kamerasystemen von apic ai ausgestattet. Zusätzlich waren 428 Bienen von zwei Kontrollvölkern und 436 Bienen in zwei behandelten Völkern mit individuellen Signalplättchen versehen. Dies ermöglichte die Erkennung der Bienen im Kamerabild sowie die Registrierung ihres Ein- und Ausflugs und ob sie mit oder ohne Pollenhöschen zurückkamen.

Wichtige Beobachtungen der Fütterungsstudie:

Nach Behandlungsbeginn ging die Anzahl der Pollensammlerinnen in den behandelten Völkern stark zurück. Entsprechend war die Pollenmenge bei den Volksschätzungen geringer als in der Kontrolle.

Auch die Brut ging in den behandelten Völkern etwas zurück. Dies könnte das stärkere Anwachsen des Honigvorrats in den behandelten Völkern im Vergleich zur Kontrolle erklären, was bei den Volksschätzungen festgestellt wurde.

Die Rekrutierung junger Bienen setzte in den behandelten Völkern etwas später ein (Tag 14 im Treatment vs. Tag 9 in der Kontrolle).

Die Bienen der behandelten Völker neigten im Vergleich zu den markierten Bienen der Kontrollvölker deutlich stärker dazu, beim Heimkommen das falsche Volk anzufliegen. Die Aufzeichnung mit dem KI-unterstützten Kamerasystem von apic ai fand vom 18. April bis 9. Juni 2023 statt. Wetterdaten der ca. 1 km entfernten Wetterstation des LTZ in Stutensee (Lindenhof) wurden verwendet.

Effekte der Manipulationen (2023):

Die reduzierten Volksbestandteile konnten beim ersten Assessment (fünf Tage nach Manipulation) erkannt werden. Bereits am 17. Mai, 20 Tage nach der Manipulation, waren Unterschiede zwischen den Gruppen kaum noch erkennbar. Die Gruppen, die durch das Abwandern der um Flugbienen reduzierten Völker zusätzliche Flugbienen erhielten, verzeichneten das größte Volkswachstum.

Auf diese Weise konnten die sogenannte "trip duration" und somit die "handling time" gemessen werden. Der oben gezeigte Effekt des Neonicotinoids auf das Sammelverhalten konnte reproduziert

werden. Auch der Effekt auf die "handling time" wurde beobachtet; statt einer zehnfachen Erhöhung war sie während der Exposition um das Dreifache erhöht, wie die Abbildung aus Wang et al. 2025 zeigt.

3.1.5 Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination (AP7)

Eurofins war hauptsächlich für die Fallstudien und mit APIC für die Erprobung des Geräts im praktischen Einsatz zuständig. Eurofins nahm an allen Projekttreffen und der zweiwöchentlichen Statustreffen teil.

Im Jahr 2022 und 2023 wurden außerdem umfangreiche Präsentationen und Publikationen 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 des FZI, 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 Informatik 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 einvielversprechendes 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.

Ergebnis:

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 - Projektmonat 10

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 das Ziel erreicht, s. Abschnitte 2.1.2, 2.1.3 und 2.2.

MS-3: On-Device Prototyp ist einsatzbereit; Szenarien für Fallstudien wurden definiert – Projektmonat 14

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 Bienen wurden für die Versuche vorbereitet und die gewählten Parameter zur Erfassung ausgewählt. Zusätzliche wurde für zwei Versuche Flächen gemietet, Kulturen angepflanzt und später mTunnel für Versuche errichtet. Die erforderlichen Daten aus den Versuchen und anderen Quellen (Open Data, amtliche Daten) wurden in ein Datenbanksystem eingespeist und erstmals analysiert.

Ergebnisse:

Das Fallstudien-Design wurde so konzipiert und vorbereitet, dass die aufgestellten Hypothesen damit überprüft werden konnte. Es wurden erfolgreich Versuche mit dem Prototyp durchgeführt. Weitere Versuche folgten mit der endgültigen Version des Gerätes (Hardware und Software) Beobachtungen der Völker erfolgten Kurzzeit und Langzeit und die Völker waren mit dem angebauten Gerät lebensfähig.

MS-4: Demonstrator der Gesamtlösung ist einsatzbereit – Projektmonat 25

Ziele:

Die die Vorbereitung aller Versuche und die Durchführung unter Standardbedingungen 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:

Die Stressexperimente und toxischen Fallstudien wurden durchgeführt. Eine Wiederholung der Stressexperimente, diesmal ohne Honigentnahme, aber mit mehr Völkern, wurde beschlossen. Trachtlücken wurden aufgrund der Fokussierung auf die Effekte von Pestiziden auf das Pollensammelverhalten nicht näher untersucht. Fütterungsstudie nach Oomen wurde durchgeführt, um vorherige Ergebnisse zu bestätigen.

- 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 – Projektmonat 36

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:

Das hohe Potential der Gesamtlösung wurde vor allem durch die Arbeiten zum Effekt eines Neonicotinoides auf das Pollensammelverhalten bewiesen und Publikationen (Wang et al. 2024, 2025) dargestellt, sowie auf Konferenzen vorgetragen (Abschnitt 2.2), sowie auf der Abschlussveranstaltung von Beenovation sowie den Innovationstagen des BLE, beides in Berlin in 2024.

Eine besondere Chance besteht in der Möglichkeit, einen Beitrag zur bevorstehenden Überarbeitung der Zulassungsrichtlinien und des Risikobewertungsschemas für Pflanzenschutzmittel zu leisten. Als Werkzeug für ökotoxikologische Untersuchungen kann OCELI neue Standards für Qualität und Quantität der Datenerhebung setzen, die derzeit auf europäischer Ebene noch offen sind. Eine hinreichend hohe Ergebnisgenauigkeit ist für Aktivität erzielt. Für die Erfassung der Mortalität reicht die Genauigkeit noch nicht aus. Allerdings kann durch die Erfassung des Polleneintrags eine gute Abschätzung der Belastung eines Bienenvolks durch Pflanzenschutzmittel erfolgen.

3.3 Einhaltung der Ausgaben-/Kosten- und Zeitplanung (Eurofins)

Die Kostenplanung wurde eingehalten. Es wurden weniger Mittel genutzt als geplant. Die gesamten bewilligten Kosten betragen im Projektantrag 97.534,25 Euro. Davon wurden insgesamt 53.925,41 Euro abgerufen.

Es wurden für das Projekt 2023 für Versuche Bienenvölker für 6.033,52 Euro gekauft. Alle folgenden Versuche wurden intern aus diesen Völkern nachgezogen. Die restlichen 47.891,89 Euro wurden für

Personalkosten verwendet. Die entstandenen Personalkosten verteilen sich hauptsächlich auf die technische und wissenschaftliche Betreuung der Fallstudien.

3.4 Einhaltung der Arbeits- und Zeitplanung

Die Arbeits- und Zeitplanung des Projekts wurde weitestgehend eingehalten, mit erfolgreicher Durchführung der geplanten Aktivitäten über die verschiedenen Arbeits- und Messpakete (AP) hinweg. Trotz kleinerer Herausforderungen und leichter zeitlicher Verschiebungen wird davon ausgegangen, dass die im ursprünglichen Antrag festgelegten Meilensteine bis zum Projektende erreicht werden können.

Arbeits- und Zeitplanung nach Arbeitsbereichen:

AP4 - Fallstudien (Versuchssaison 2021 & 2022) Die drei **Mikrostudien von 2021** (mit älteren Zählermodellen) sowie die **Planung für 2022** wurden fristgerecht und vollständig erfüllt. Standortwahl, Installation und Versuchsaufbau erfolgten in enger Abstimmung mit allen Partnern. Für die **Langzeitstudie 2022** wurden die Standorte intensiv mit den Partnern diskutiert, um eine fundierte Landschaftsanalyse und Modellierung zu gewährleisten. Es wurde entschieden, sich auf zwei geographische Standorte mit geringer landwirtschaftlicher Nutzung zu konzentrieren: **Stutensee** und ein weiterer Standort bei **Braunschweig**. Ein detailliertes Versuchsprotokoll wurde erstellt. Für eine **Mikrostudie mit 14 Zelten** wurde ein Prüfplan-Entwurf erstellt. Die erhobenen Daten dienen als Grundlage für die Versuchsplanung 2023.

AP5 - Ökologische Systemanalyse & Systemintegration Monitortechnologie Erste empirische **Mikrostudien-Ergebnisse wurden erfolgreich in das BeeHave-Modell integriert**. Stressexperimente für 2022 wurden gemeinsam mit dem UFZ durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen sind weitere Versuche für 2023 geplant, die vor der Rapsblüte im April 2023 beginnen sollen. Alle geplanten Versuche konnten 2022 durchgeführt werden. Zusätzliche Versuche mit Bienenzählern sind für April 2024 am Standort Eurofins Niefern geplant. Datenüberprüfungen mit dem neuen Modell-Lesegerät fanden im Februar 2023 statt. **AP5 wird somit als erfüllt betrachtet**. Die gesammelten Daten werden zur Kalibrierung des BeeHave-Modells herangezogen.

AP6 - Fallstudien (Versuchssaison 2022 & 2023) AP4 für die **Versuchssaison 2022** (eine Langzeitstudie und eine Mikrostudie mit neuem Zählermodell) wurde fristgerecht und vollständig erfüllt. Standortwahl, Installation und Versuchsaufbau wurden gemeinsam abgestimmt und umgesetzt. Für die **Langzeitstudie 2023** wurde die Standortwahl ebenfalls intensiv mit den Partnern diskutiert, um alle relevanten Faktoren für eine Landschaftsanalyse und Modellierung zu berücksichtigen. Auch hier konzentriert man sich weiterhin auf die Standorte **Stutensee und Braunschweig**, passend zur Fragestellung von UFZ und BeeHave.

AP7 - Ergebnisverbreitung, -verwertung und Koordination Die **Zusammenstellung der Versuchsdaten aller Projektpartner aus allen Saisons liegt vor**, und AP6 wurde vollständig erfüllt. Die Datenauswertung wurde 2024 abgeschlossen.

Koordinationsmaßnahmen und Ereignisse:

- Regelmäßige **zweiwöchentliche virtuelle Meetings** stellten eine kontinuierliche und rechtzeitige Kommunikation zwischen den Projektpartnern sicher. Protokolle wurden erstellt, um alle Partner auf dem Laufenden zu halten.
- **Technische Probleme mit dem Zählgerät** führten im März 2023 zu einer Verzögerung bei der Verfügbarkeit von Ergebnissen.
- Die durch die Projektzusage bedingten Freilandversuche konnten in der ersten Saison nur bedingt durchgeführt werden.
- Die geplante Feldstudie wurde abgearbeitet.
- Alle Datensätze standen den Partnern (APIC, DISY, UFZ, FZI) zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung.

3.5 Ergebnis des Vorhabens und gesammelte wesentliche Erfahrungen

Das zentrale Ergebnis des OCELI-Projekts ist die erfolgreiche Konzeption, Entwicklung und Validierung eines neuartigen, integrierten technologischen Gesamtsystems für das bienenbasierte Biomonitoring. Dieses System kombiniert modernste KI-Algorithmen mit robuster Monitoring-Hardware und ökologischer Modellierung, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Bestäubern und ihrer Umgebung erstmals umfassend und reproduzierbar zu erfassen.

Wesentliche Ergebnisse:

- **Technologie-Demonstrator:** Ein energieautarkes und vernetztes Kamerasystem wurde entwickelt, das in der Lage ist, kontinuierlich und in Echtzeit am Bienenstock Daten zu erfassen. Die Integration spezialisierter Beschleuniger ermöglicht eine On-Device-Analyse, was den Bedarf an externer Rechenleistung und Cloud-Anbindung minimiert.
- **Algorithmenentwicklung:** Es wurden erfolgreiche Algorithmen für die Erfassung neuartiger Parameter entwickelt und validiert:
 - **Pollenfarberkennung:** Ein automatisch erzeugter Pollenkatalog ermöglicht die Dokumentation von Blühzeiten und Nahrungsdiversität.
 - **Individuelle Bienen-Erkennung:** Die Re-Identifikation von Bienen mithilfe selbstgedruckter Marker liefert detaillierte Einblicke in das Flugverhalten einzelner Individuen.

- **Hummel-Erkennung:** Die Übertragbarkeit des Ansatzes auf Hummeln wurde in einem Prototyp erfolgreich demonstriert.
- **Reproduzierbare Feldstudien:** Die Durchführung von Feldstudien unter Realbedingungen hat gezeigt, dass die Effekte von Pflanzenschutzmitteln auf das Sammelverhalten reproduzierbar sind. Insbesondere konnte der Repellenz-Effekt von Pyrethroiden und die verlängerte "handling time" durch Neonicotinoide bestätigt und quantifiziert werden.
- **Verknüpfung mit Simulationsmodell:** Die Integration der Felddaten in das BEEHAVE-Modell ermöglichte eine Interpretation der beobachteten Effekte und die Überprüfung von Hypothesen zu Wirkmechanismen.
- **Analyse von Umweltfaktoren:** Durch die Verknüpfung von Monitoringdaten mit Geodaten wurde gezeigt, dass Sonnenfaktoren, Temperatur und Biodiversität die Bienen- und Sammelaktivität am stärksten beeinflussen.

Gesammelte wesentliche Erfahrungen:

- Die hohe Variabilität von Bienenvölkern macht die Durchführung von Feldstudien komplex und erfordert eine sorgfältige Planung und ausreichend große Stichproben.
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den Fachbereichen war entscheidend für den Erfolg, da ein einzelner Partner die Projektziele nicht hätte erreichen können.
- Die Einhaltung von Standards wie der Guten Laborpraxis (GLP) stellt besondere Anforderungen an die Hard- und Softwareentwicklung sowie die Dokumentation von Prozessen.
- Die frühzeitige Einbindung potenzieller Kunden und die Erfassung ihrer Bedarfe ist entscheidend für eine erfolgreiche Verwertung der Projektergebnisse.

3.6 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Obwohl die meisten Projektziele erfolgreich erreicht wurden, gab es einzelne Teilvorhaben, die im Projektverlauf nicht umgesetzt oder nicht zu einer finalen, marktfähigen Lösung geführt haben. Diese Entscheidungen wurden oft getroffen, um die Fokussierung auf die zentralen Projektziele zu gewährleisten oder weil sich im Laufe der Entwicklung alternative, robustere Lösungen als überlegen erwiesen haben.

- **Datenstromanalyse zur Anomaliedetektion:** Das ursprüngliche Ziel des FZI, eine umfassende Datenstromanalyse zur Erkennung von Anomalien durchzuführen, wurde nicht weiterverfolgt. Durch den technischen Fortschritt bei der direkten Integration von Algorithmen auf dem Kamerasystem war eine externe, cloudbasierte Analyse nicht mehr erforderlich.
- **Eigene Wetterstation:** Die Entwicklung einer eigenen Wetterstation, die mit den Monitoringsystemen gekoppelt ist, wurde zugunsten der Nutzung etablierter, zuverlässiger Wetterstationen von Eurofins und dem LTZ zurückgestellt. Obwohl die Funktionstests der

Eigenentwicklung erfolgreich waren, bot diese pragmatische Entscheidung eine höhere Sicherheit für die Durchführung der Fallstudien.

- **Eigene Bienenstockwaage:** Eine eigens entwickelte Bienenstockwaageeinheit stieß in den Feldstudien auf technische Herausforderungen, insbesondere im Bereich der Temperaturkompensation und des Einflusses von Holzfeuchte. Da kommerziell verfügbare Waagen für die im Projekt verfolgten Ziele einen ausreichenden Informationsgehalt lieferten, wurde die Weiterentwicklung eingestellt.
- **Analyse von Videobildern auf Bienenkrankheiten, Larven und Puppen:** Die Analyse von Krankheitsbildern sowie der Zustand von Larven und Puppen auf den Waben wurde nicht umgesetzt. In der Anforderungsanalyse wurden andere, für die Risikobewertung von Pflanzenschutzmitteln relevantere Schwerpunkte priorisiert. Die technische Grundlage für solche Analysen wurde jedoch geschaffen und bietet ein vielversprechendes Potenzial für zukünftige Erweiterungen.